

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 550.34.013.04; 551.24

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ РИСКОВ
НА ТЕРРИТОРИЯХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

В. П. Корячко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой САПР ВС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

В. А. Минаев, д.т.н., профессор, профессор кафедры специальных информационных технологий
МосУ МВД России, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0002-5342-0864, e-mail: mlva@yandex.ru

Р. О. Степанов, к.т.н., доцент, проректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0001-9124-5924, e-mail: stepanovr@bmstu.ru

А. О. Фаддеев, д.т.н., доцент, профессор кафедры экономической безопасности МосУ МВД России,
Москва, Россия;
orcid.org/0000-0002-7259-1693, e-mail: fao1@mail.ru

В статье представлена математическая технология оценки мест возможного возникновения геодинамических катастроф, в частности, землетрясений, основанная на анализе геодинамической неустойчивости, а именно горизонтальных градиентов аномалий гравитационного поля в изостатической редукции. Целью работы является создание системы математических моделей, составляющих основу технологии оценки сейсмических рисков. Особое внимание уделено вероятностной математической модели оценки сейсмических рисков, основанной на представлении возможных геодинамических состояний геологической среды как простейшего потока событий. Приведены и рассмотрены основные результаты практической реализации разработанных авторами математических моделей оценки сейсмических рисков на примерах Байкальского региона, территорий севера Японии и российского Дальнего Востока.

Ключевые слова: математическое моделирование, сейсмический риск, аномалии гравитационного поля, геодинамические опасности, напряжения и смещения, геологическая среда, землетрясения.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-133-142

Введение

Прогноз землетрясений является одной из самых острых проблем современности [1-4]. Сейсмические катастрофы, как показало недавнее землетрясение в Турции, приводят не только к огромным материальным потерям, но и являются причиной массовой гибели людей. Потому эта проблема имеет не только научное, но и важнейшее практическое значение.

Необходимость прогноза землетрясений неуклонно возрастает. География сейсмической опасности не ограничивается общеизвестными высокосейсмичными зонами, но и охватывает многие регионы, ранее считавшиеся малосейсмичными и даже асейсмичными [5-8]. В частности, это относится и к таким стабильным тектоническим структурам, как платформы.

Согласно статистическим данным, Землю ежегодно сотрясают около 20 сильных и сильнейших землетрясений с магнитудой, равной или превышающей 7 баллов [9, 10]. Конечно, не все они оборачиваются трагическими последствиями, так как происходят в малонаселён-

ных местностях, а также на дне морей и океанов (если, конечно, не порождают смертоносные цунами).

Наиболее опасны периоды времени, когда приуроченность сильных землетрясений к густонаселённым территориям возрастает. Одним из таких периодов можно считать последние годы второго и начало третьего тысячелетия. В качестве примера можно привести такие землетрясения, как Спитакское 1988 г., Калифорнийское (Сан-Франциско и Лос-Анджелес) 1989 и 1991 г.г., Японское и Сахалинское 1995 и 2011 г.г., Турецкие и Тайваньское 1999 и 2023 г.г., Индонезийское (Суматра) 2004 г. Ни одно из этих катастрофических сейсмических событий фактически не было предсказано объективными научными методами. Это свидетельствует о том, что сегодняшние системы прогнозирования своего назначения не оправдывают.

В XX веке предприняты активные международные попытки ученых найти решения этой проблемы, однако они не увенчались ожидаемым успехом.

Так, по мнению В. И. Кейлис-Борока, существующие системы прогнозирования землетрясений способны обеспечить довольно грубые оценочные характеристики [11, 12]: 1) точность предсказания места готовящегося землетрясения – сотни километров; 2) точность определения возможной энергии ожидаемого землетрясения – шесть порядков; 3) точность прогноза по времени – годы.

Совершенно очевидно, что такой прогноз особой практической ценности не имеет. Более того, в реальной действительности он порождает как ложную тревогу, так и ложную успокоенность. Именно это произошло в 1989 г. в Калифорнии, когда сильное землетрясение ожидали в Паркфилде (300 км от Сан-Франциско), а оно произошло именно под Сан-Франциско.

Очевидно, что проблемы защиты населения и территорий от воздействия опасных сейсмических процессов невозможно решать, не владея информацией об их пространственном распределении, интенсивности воздействия и периодичности проявления. Традиционно используемыми для получения такой информации являются технологии оценки динамики опасных сейсмических процессов на основе статистических данных.

А если такой статистики нет или её недостаточно? Или требуется оценить возможность реализации сейсмических событий для конкретных «точечных» объектов, особенно относящихся к критической инфраструктуре?

В этом случае необходимо разрабатывать и использовать современные математические модели, позволяющие превентивно оценивать зоны сейсмического риска.

Для того, чтобы оценка была эффективной, необходим постоянный высококачественный мониторинг геологической среды в этих зонах, ориентированный на выявление динамики опасных геодинамических процессов. Такой мониторинг в настоящее время основывается либо на методах традиционного качественного описания, либо на проведении дорогостоящих приборных исследований, которые позволяют отслеживать реализацию опасных геодинамических событий в режиме реального времени.

Однако и тот, и другой подходы, что наглядно продемонстрировали события в Японии 11 марта 2011 г., приведшие к катастрофе на АЭС «Фукусима-1», не дали достаточных данных, позволяющих осуществлять эффективные превентивные мероприятия защиты объектов на высокорисковых территориях.

Теоретические исследования

В результате многолетних исследований авторами разработана новая математическая технология оценки риска в местах возможного возникновения геодинамических катастроф, в частности – землетрясений, на основе анализа пространственного распределения геодинамических аномалий [13-16]. Ее суть состоит в том, что на основе анализа характеристик геодинамической нестабильности, а именно горизонтальных градиентов аномалий гравитационного поля в изостатической редукции, строится математическая модель геологической среды исследуемой территории. И по результатам математического моделирования выполняется восстановление полей тектонических напряжений и смещений в этой среде.

Для иллюстрации сказанного отвлечёмся на некоторое время от реальной геологической среды и представим себе однородное изотропное замкнутое упругое пространство в форме параллелепипеда – некоторую «плиту» с известными осреднёнными значениями плотности, модуля сдвига и модуля Юнга. Также предположим, что эта среда («плита») рассматривается в рамках ньютоновской реологии и на нее снизу вверх, строго в вертикальном направлении действует некоторая распределённая нагрузка, или внешнее воздействие. В результате такого воздействия в изотропной среде («плите») возникают неоднородные по своей структуре поля напряжений и смещений (рисунок 1).

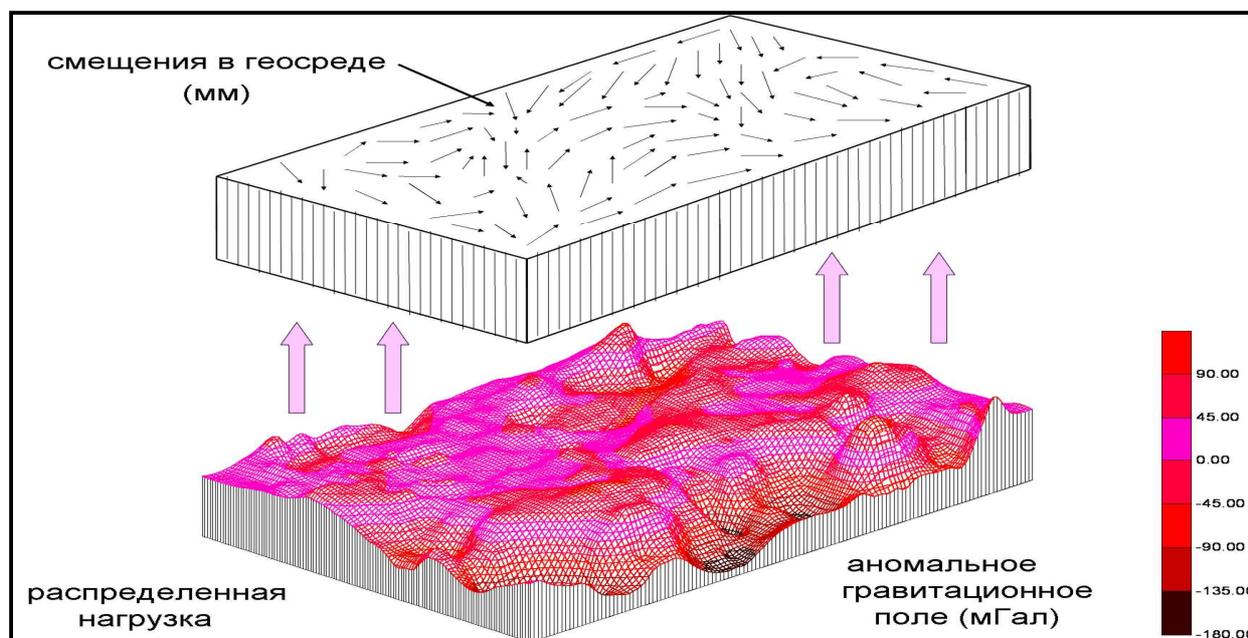


Рисунок 1 – Модель напряжений и смещений в упругой геосреде
Figure 1 – Model of stresses and displacements in elastic geomedium

В таком случае распределённое внешнее воздействие $P(x, y)$, дискретные значения которого заданы с некоторым фиксированным шагом по осям X и Y , представляется в виде соотношения (1), т.е. выполняется разложение аномального гравитационного поля в изостатической редукции на составляющие его зональные гармоники [15]:

$$P(x, y) = \frac{p_{00}}{4} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^s p_{m0} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^l p_{0n} + \sum_{m=1}^s \sum_{n=1}^l p_{mn}, \quad (1)$$

где, например, $p_{mn} = a_{mn} \cdot \cos k_x x \cdot \cos k_y y + b_{mn} \cdot \sin k_x x \cdot \cos k_y y + c_{mn} \cos k_x x \cdot \sin k_y y + d_{mn} \cdot \sin k_x x \times \sin k_y y$.

$$a_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b p(x, y) \cos k_x x \cos k_y y dx dy; \quad k_x = \frac{\pi m}{a}; \quad k_y = \frac{\pi n}{b}; \quad a, b - \text{соответственно длина}$$

(X) и ширина (Y) рассматриваемой территории.

Тогда компоненты тензора напряжений и составляющие вектора смещений в геосреде представляются аналогичным образом, например для нормальных компонент тензора напряжений – соотношениями вида (2):

$$\sigma_\alpha(x, y, z) = \frac{1}{4} \sigma_\alpha^{(00)} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^s \sigma_\alpha^{(m0)} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^l \sigma_\alpha^{(0n)} + \sum_{m=1}^s \sum_{n=1}^l \sigma_\alpha^{(mn)}. \quad (2)$$

Подобный подход является весьма эффективным, не предполагая проведения приборных исследований. Рассмотренную математическую модель назовем условно моделью I-го типа.

В отличие от неё модель II-го типа предполагает, наряду с данными по аномальному гравитационному полю в изостатической редукции, наличие информации о современных вертикальных либо горизонтальных движениях земной коры на поверхности.

Тогда в случае известных данных по современным вертикальным движениям земной коры на поверхности модель представляет следующую картину (рисунок 2). Эта модель более точна, но, к сожалению, не для всех регионов имеется подобная информация.

Математическая модель будет ещё точнее, если известны пространственные распределения по объёму геосреды величины плотности и значений постоянных Ламе (модель III-го типа).

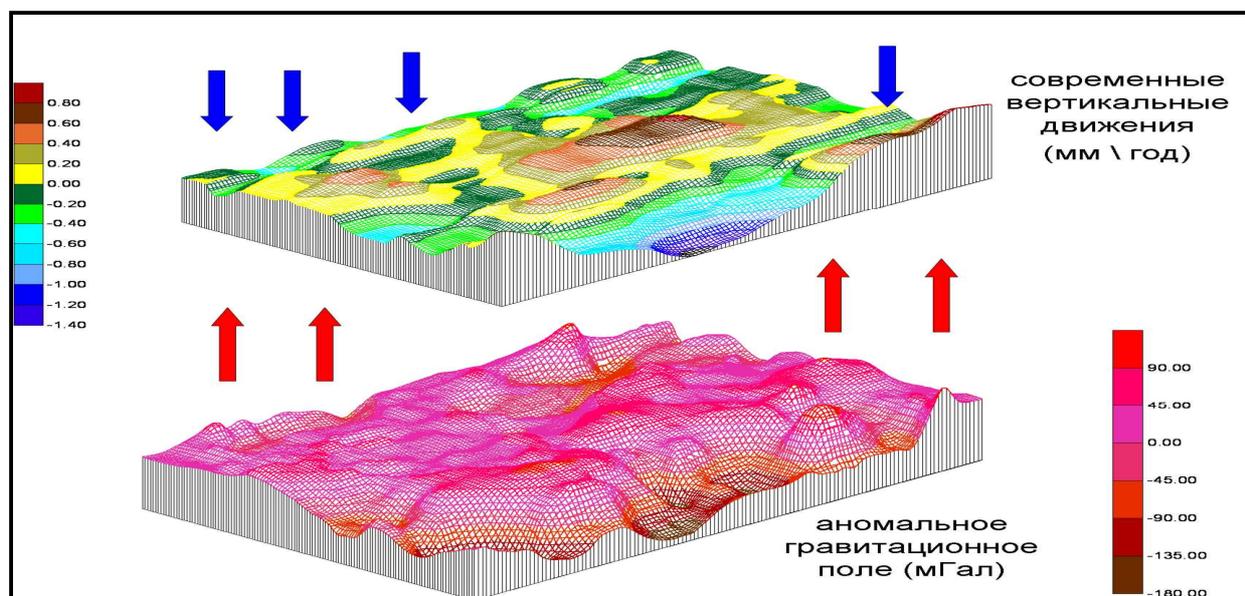


Рисунок 2 – Модель напряжений и смещений в геосреде (модель II типа)
Figure 2 – Model of stresses and displacements in geomedium (Type II model)

Наконец, самой точной является модель IV-го типа, в которой рассматривается максвелловская реология среды. Эта модель имеет особое значение в прогностическом плане, поскольку позволяет учитывать диссипацию сейсмодетформационной энергии.

Все эти модели объединяет одно важное качество – они позволяют на детерминированном уровне количественно оценивать компоненты тензора напряжений и составляющие вектора смещений в геологической среде. Последующая математическая обработка полученных полей напряжений и смещений дает возможность определять такие важные для оценок сейсмической опасности характеристики геологической среды, как относительная плотность потенциальной энергии деформируемых пород геосреды, вертикальные и горизонтальные смещения в геологической среде, градиенты этих смещений, а также построить оценочные карты эквипотенциального распределения показателей опасностей геодинамического происхождения.

Информация о территориальном распределении указанных характеристик позволяет перейти к построению вероятностной математической модели оценки сейсмического риска, названной авторами моделью V-го типа. Модель основана на представлении возможных геодинамических состояний геологической среды [17] в виде простейшего потока событий с последующим построением системы дифференциальных уравнений Колмогорова относительно вероятности нахождения геосреды в этих состояниях (рисунок 3):

$$\begin{cases} p_1'(t) = -\alpha_{13}p_1(t) + \alpha_{31}p_3(t), \\ p_2'(t) = -\alpha_{23}p_2(t) + \alpha_{32}p_3(t), \\ p_3'(t) = \alpha_{13}p_1(t) + \alpha_{23}p_2(t) - (\alpha_{31} + \alpha_{32})p_3(t), \\ p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) = 1. \end{cases} \quad (3)$$

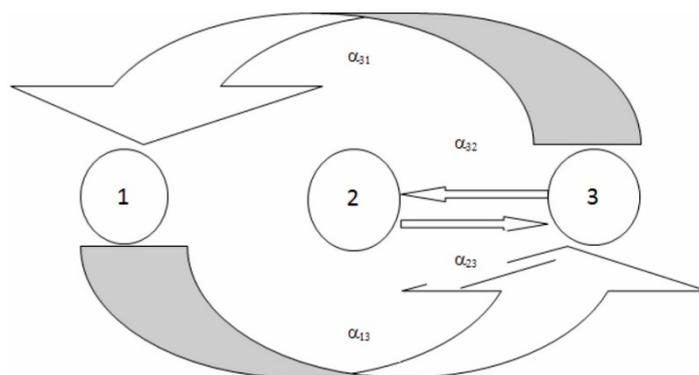


Рисунок 3 – Схема переходов модельного объёма геосреды между состояниями 1, 2, 3 модели
Figure 3 – Scheme of transitions between states 1, 2, 3 of the model

При составлении системы уравнений для вероятностей $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$ нахождения среды в состояниях 1 (равновесное устойчивое состояние), 2 (неравновесное неустойчивое состояние), 3 (квазиравновесное состояние) особую важность имеет определение численных значений интенсивностей процессов α_{ij} , физически представляющих собой сумму энергетических параметров процессов, протекающих в системе, окончание которых приводит к непосредственному переходу системы из состояния i в состояние j . Интенсивности процессов α_{ij} оцениваются на основе информации о величинах деформации, вертикальных, горизонтальных смещений в геосреде и их градиентах, полученных по данным математического моделирования.

Экспериментальные исследования

Вероятностная модель впервые реализована при оценке сейсмического риска для территории Байкальского региона [17, 18]. Построенная на основе расчётов карта эквипотенциального распределения показателя комплексного геодинамического риска (в данном случае – вероятности наступления сейсмического события) с нанесёнными на неё эпицентрами землетрясений (рис. 4), произошедших спустя год после выполнения расчётов, наглядно продемонстрировала эффективность и работоспособность модели: эпицентры произошедших землетрясений «легли» на те участки территории, которые определены по модели как наиболее опасные в геодинамическом отношении.

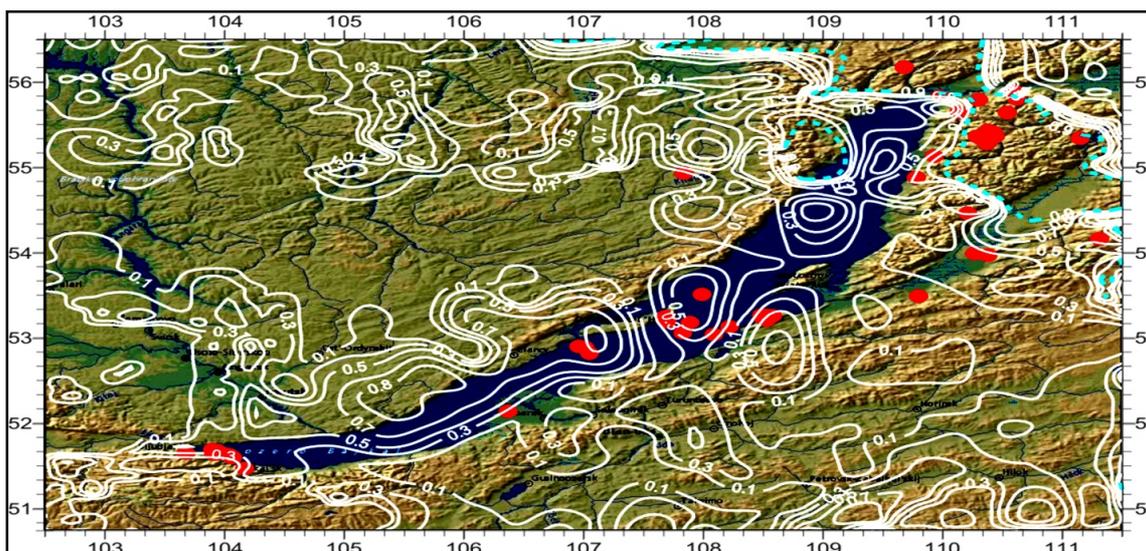


Рисунок 4 – Карта эквипотенциального распределения комплексного риска для территории Байкальского региона (пунктирной линией показаны участки наступления сейсмических событий с вероятностью более 0,9)

Figure 4 – Map of equipotential distribution of complex risk for the territory of the Baikal region (dotted line shows the areas of seismic events occurrence with a probability of more than 0.9)

Важно отметить, что такие карты отражают не интегральную вероятность сейсмического риска для всего региона в целом, а именно «точечно-площадную» вероятность проявления сейсмических событий. Размеры таких «точечных» площадок зависят от линейной протяжённости исследуемой территории, сводясь к территориям порядка нескольких квадратных километров или даже сотен метров.

Детерминированные модели использованы при оценке геодинамического риска для севера Японии и более обширной территории российского Дальнего Востока (рисунок 5).

На рисунке 5 представлено эквипотенциальное распределение показателя геодинамического риска, полученное на основании результатов математического моделирования. Для этого региона, являющегося сейсмически высокоактивным, в качестве такого показателя целесообразно использовать величины относительной плотности потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды (в Дж/м³·год), поскольку численные оценки значений этих величин могут позволить, учитывая произошедшие сейсмические события и релаксацию сдвиговых напряжений за определённый промежуток времени, выполнить уточнённую оценку накопленной сейсмической энергии, её миграции и, следовательно, оценку риска возникновения землетрясений, в том числе катастрофических.

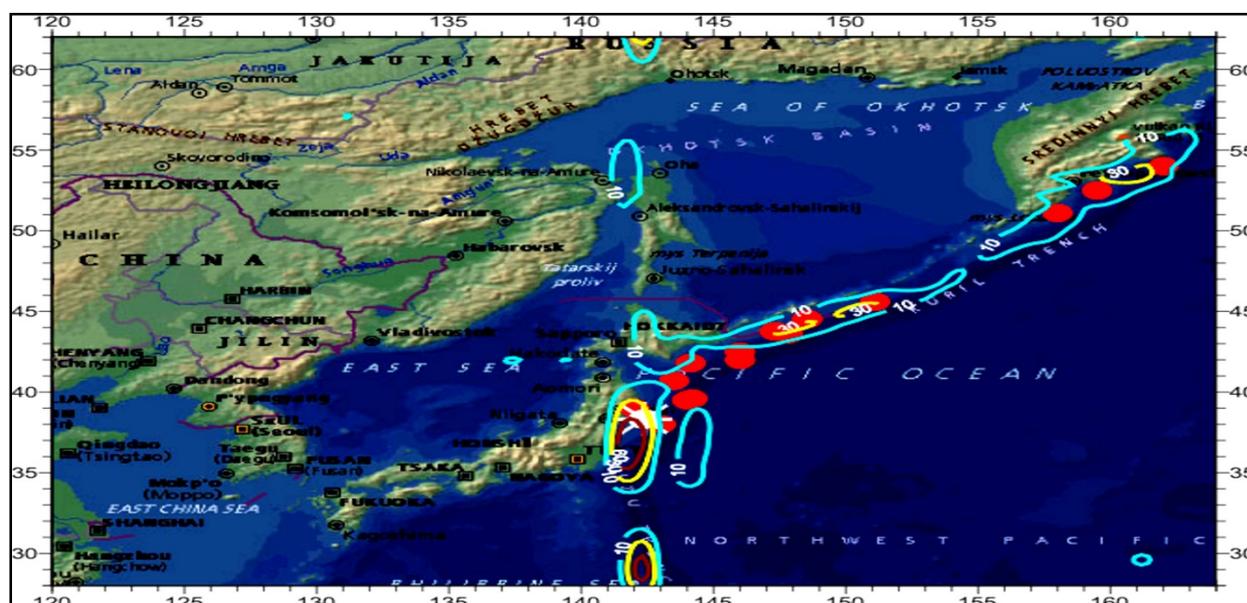


Рисунок 5 – Карта эквипотенциального распределения геодинамического риска на территории Дальнего Востока с эпицентрами высокоэнергетических землетрясений с магнитудами от 8,0 и выше (белой звездочкой отмечено землетрясение, произошедшее 11.03.2011)

Figure 5 – Map of equipotential distribution of geodynamic risk in the Far East with epicenters of high-energy earthquakes with magnitudes from 8.0 and higher (a white asterisk marks the earthquake that occurred on 11.03.2011)

Изолиниями с шагом значений 20 Дж/м³·год оконтурены участки, являющиеся по данным математического моделирования высокорисковыми в сейсмическом отношении. На карте чётко просматриваются зоны такого риска: двойная зона возле восточного побережья Японии (из них ближайшая к побережью наиболее опасная), территория между Японией и Филиппинами, остров Хоккайдо и гряда Курильских островов и участок севернее острова Сахалин.

Расположение выявленных зон и их количественная оценка по геодинамическому риску подтверждают перспективность разработанной математической технологии [19]. Об этом наглядно свидетельствуют изображённые на этой же карте эпицентры уже произошедших высокоэнергетических землетрясений (с магнитудой от 8,0 и выше), произошедших в период времени 1737 г. – март 2011 г. (эпицентр землетрясения 11.03.2011 г. отмечен «звездочкой» белого цвета), которые «легли» в обозначенные зоны повышенного геодинамического риска.

Подчеркнем, что АЭС «Фукусима-1» была построена в месте, исключительно рисковом в геодинамическом отношении.

Заключение

Проблема оценки сейсмических рисков – это проблема не одного государства. При выполнении оценок для какой-либо страны неизбежно оцениваются сейсмические риски и для территорий других государств. Таким образом, необходимы интеграция научных исследований, международное сотрудничество специалистов разнообразных научных направлений. В том числе – организация совместной космической разведки сейсмической активности Земли.

В настоящее время нами ведутся разработки новых математических моделей, ориентированных не только на оценку рисков для объектов критической инфраструктуры [20, 21], но и на выявление структуры полей смещений в геологической среде, информация о которых, совместно с данными космической геодезии и мониторинговых сейсмических сетей, позволяет приблизиться к разрешению проблемы предупреждения землетрясений значительных энергетических классов и их катастрофических последствий [22-24].

К сожалению, точный прогноз времени землетрясений и в особенности катастрофических землетрясений, на сегодняшний день не укладывается в «прокрустово ложе» математики. Тем не менее, у авторов есть основания надеяться, что дальнейшие их разработки в области изучения опасных геодинамических явлений позволят приблизиться к решению этой очень важной для человечества проблемы. По нашему мнению, только сочетание геологических, геофизических, геоморфологических, математических методов исследования и методов космической геодезии в их интегральном варианте должно обеспечить высокую достоверность идентификации зон сейсмического риска.

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счёт бюджетных средств по государственному заданию Финансового университета.

Библиографический список

1. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / под ред. А.Л. Рагозина. М.: Издательская фирма «КРУК», 2002. 248 с.
2. Природные опасности России. Природные опасности и общество. Тематический том / Под ред. В.А. Владимирова, В.Л. Воробьева, В.И. Осипова. М.: Издательская фирма «КРУК», 2002 а. 248 с.
3. Природные опасности России. Сейсмические опасности. Тематический том / под ред. Г.А. Соболева. М.: Изд-во «КРУК», 2000 б. 296 с.
4. Экзогенные геологические опасности. Тематический том / Под ред. В. М. Кутепова, А. И. Шеко. М.: Издательская фирма «КРУК», 2002. 348 с.
5. **Ананьин И. В., Фаддеев А. О., Сим Л. А.** Тектонические напряжения в земной коре центральной части Восточно-Европейской платформы (по результатам математического моделирования и структурно-геоморфологическим данным) // в сб.: Проблемы сейсмичности Восточно-Европейской платформы. М.: Изд. ОИФЗ РАН, 2000. С. 3-18.
6. **Ананьин И. В., Фаддеев А. О.** Численное моделирование напряженного состояния тектонических нарушений в земной коре Центральной части Восточно-Европейской платформы (на примере Московско-Рязано-Саратовского авлакогена) // Мат. междунар. конф. «Геодинамика и геоэкология». Архангельск: Ин-т экологических проблем Севера УрО РАН, 1999. С. 11-14.
7. **Гласко М. П., Ранцман Е. Я.** Морфоструктурные узлы – места активизации природных процессов // Доклады Академии наук, 1996. Т. 350, № 3. С. 397-400.
8. **Юдахин Ф. Н.** Проблемы сейсмической опасности слабоактивных территорий (Европейский Север России) // Материалы международной конференции «Геодинамика и геоэкология». Архангельск: Институт экологических проблем Севера УрО РАН, 1999. С. 441-445.
9. Оперативный сейсмологический каталог Геофизической службы РАН, Обнинск. Источник: Мировой Центр Данных по физике твердой Земли, Москва (www.wdcb.ru).
10. Данные Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра. Источник: Мировой Центр Данных по физике твердой Земли, Москва (www.wdcb.ru).
11. **Кейлис-Борок В. И., Кронрод Т. Л., Молчан Г. М.** Расчет сейсмического риска / Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1980. С. 69-82.

12. Кейлис-Борок В. И., Кронрод Т. Л., Молчан Г. М. Сейсмический риск для крупнейших городов мира: предварительная оценка / Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений. М.: Наука, 1982. С. 82-98.
13. Минаев В. А., Фаддеев А. О. Моделирование геоэкологических рисков и оценка геоэкологической безопасности на рекреационных территориях // Проблемы управления рисками в техносфере. 2008. № 4. С. 55-62.
14. Минаев В. А., Фаддеев А. О. Моделирование геоэкологического риска // Спецтехника и связь. 2009. № 2. С. 24-30.
15. Минаев В. А., Фаддеев А. О. Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. – М.: Финансы и статистика, Издательский дом ИНФРА-М, 2009. 370 с.
16. Минаев В. А., Фаддеев А. О., Данилов Р. М. Математическое моделирование рисков геодинамического происхождения // Спецтехника и связь. 2011. № 1. С. 48-52.
17. Минаев В. А., Фаддеев А. О. Геоэкологические риски рекреационных зон в Байкальском регионе // Мир и безопасность. 2007. № 3. С. 35-42.
18. Минаев В. А., Фаддеев А. О. Вероятностная модель оценки сейсмического риска: сборник научных трудов «Управление, вычислительная техника и информатика». 2009. Вып. 2: М.: РосНОУ, С. 15-24.
19. Фаддеев А. О., Данилов Р. М. Геодинамическая безопасность ландшафтно-территориальных комплексов / под ред. д.т.н., профессора В.А. Минаева. Монография. Хабаровск, 2010. 169 с.
20. Минаев В. А., Фаддеев А. О., Кузьменко Н. А. 3-D моделирование миграции опасных эндогенных геологических процессов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 58. С. 64-74.
21. Корячко В. П., Минаев В. А., Степанов Р. О., Фаддеев А. О. Моделирование ветрового переноса опасных веществ при оценках техногенного риска в Арктической зоне // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 112-117.
22. Фаддеев А. О., Павлова С. А., Невдах Т. М. Построение глобальной математической модели при оценках напряжённо-деформированного состояния литосферы Земли // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 68. С. 61-67.
23. Минаев В. А., Степанов Р. О., Фаддеев А. О. Арктические риски: моделирование, комплексная оценка, управление. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. 420 с.
24. Корячко В. П., Минаев В. А., Степанов Р. О., Фаддеев А. О. Моделирование термоупругих деформаций как источника геодинамических опасностей в Арктической зоне // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 83. С. 72-83.

UDC 539.37; 551.24

MODELING OF SEISMIC RISKS ON CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS LOCATION TERRITORIES

V. P. Koryachko, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of CAD Department, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

V. A. Minaev, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after V. Ya. Kikot, Moscow, Russia; orcid.org/0000-0002-5342-0864, e-mail: m1va@yandex.ru

R. O. Stepanov, Ph.D. (Tech.), associate professor, Director of the Directorate for Arctic Programs, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; orcid.org/0000-0001-9124-5924, e-mail: stepanovr@bmstu.ru

A. O. Faddeev, Dr. Sc. (Tech.), associate professor, Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after V. Ya. Kikot, Moscow, Russia; orcid.org/0000-0002-7259-1693, e-mail: fao1@mail.ru

The article presents a mathematical technology for assessing the places of possible geodynamic disasters occurrence, in particular, earthquakes, based on the analysis of geodynamic instability, namely, hori-

zontal gradients of gravitational field anomalies in isostatic reduction. **The aim of the article** is to create a system of mathematical models that form the basis of seismic risk assessment technology. Special attention is paid to probabilistic mathematical model of seismic risk assessment based on the representation of possible geodynamic states of geological environment as the simplest event flow. The main results in practical implementation of mathematical models of seismic risk assessment developed by the authors on the examples of the Baikal region, the territories of the north of Japan and the Russian Far East are presented and considered.

Key words: mathematical modeling, seismic risk, gravity field anomalies, geodynamic hazards, stresses and displacements, geological environment, earthquakes.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-133-142

References

1. *Ocenka i upravlenie prirodnyimi riskami. Tematicheskij tom* (Assessment and management of natural risks. Thematic volume) / pod red. A.L. Ragozina. Moscow: Publishing company «KRUK», 2002. 248 p. (in Russian).
2. *Prirodnye opasnosti Rossii. Prirodnye opasnosti i obshchestvo. Tematicheskij tom* (Natural hazards of Russia. Natural hazards and society. Thematic volume) / pod red. V. A. Vladimirova, V. L. Vorobyov, V. I. Osipov. Moscow: Publishing company «KRUK», 2002 a. 248 p. (in Russian).
3. *Prirodnye opasnosti Rossii. Sejsmicheskie opasnosti. Tematicheskij tom* (Natural hazards of Russia. Seismic hazards. Thematic volume) / pod red. G.A. Sobolev. Moscow: Publishing house «KRUK», 2000 b. 296 p. (in Russian).
4. *Ekzogennye geologicheskie opasnosti. Tematicheskij tom* (Exogenous geological hazards. Thematic volume) / pod red. V.M. Kutepov, A.I. Sheko. Moscow: Publishing company «KRUK», 2002. 348 p. (in Russian).
5. **Ananyin I. V., Faddeev A. O., Sim L. A.** Tektonicheskie napryazheniya v zemnoj kore central'noj chasti Vostochno-Evropejskoj platformy (po rezul'tatam matematicheskogo modelirovaniya i strukturno-geomorfologicheskim dannym) /v sb.: *Problemy sejsmichnosti Vostochno-Evropejskoj platformy*. Moscow: Izd. OIFZ RAN. 2000, pp. 3-18. (in Russian).
6. **Ananyin I. V., Faddeev A. O.** Chislennoe modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya tektonicheskikh narushenij v zemnoj kore Central'noj chasti Vostochno-Evropejskoj platformy (na primere Moskovsko-Ryazano-Saratovskogo avlakogena). *Mat. mezhdunar. konf. «Geodinamika i geoekologiya»*. Arhangel'sk: In-t ekologicheskikh problem Severa UrO RAN. 1999, pp. 11-14. (in Russian).
7. **Glasko M. P., Rantsman E. Ya.** Morfostrukturnye uzly – mesta aktivizacii prirodnyh processov. *Doklady Akademii nauk*. 1996, vol. 350, no. 3, pp. 397-400. (in Russian).
8. **Yudakhin F. N.** Problemy sejsmicheskoy opasnosti slaboaktivnyh territorij (Evropejskij Sever Rossii). *Materialy mezhdunarodnoj konferencii «Geodinamika i geoekologiya»*. Arhangel'sk: Institut ekologicheskikh problem Severa UrO RAN. 1999, pp. 441-445. (in Russian).
9. *Operativnyj sejsmologicheskij katalog Geofizicheskoy sluzhby RAN*. Obninsk. Istoch-nik: Mirovoj Centr Danyh po fizike tverdoj Zemli, Moscow (www.wdcb.ru). (in Russian).
10. *Dannye Evropejsko-Sredizemnomorskogo sejsmologicheskogo centra. Istochnik: Mirovoj Centr Danyh po fizike tverdoj Zemli*. Moscow (www.wdcb.ru). (in Russian).
11. **Keilis-Borok V. I., Kronrod T. L., Molchan G. M.** *Raschet sejsmicheskogo riska / Sejsmicheskoe rajonirovanie territorii SSSR* (Calculation of seismic risk. Seismic zoning of the territory of the USSR). Moscow: Nauka, 1980, pp. 69-82. (in Russian).
12. **Keilis-Borok V. I., Kronrod T. L., Molchan G. M.** *Sejsmicheskij risk dlya krupnejshih gorodov mira: predvaritel'naya ocenka / Matematicheskie modeli stroeniya Zemli i prognoza zemletryasenij* (Seismic risk for the largest cities of the world: preliminary assessment. Mathematical models of the structure of the Earth and earthquake prediction). Moscow: Nauka, 1982, pp. 82-98. (in Russian).
13. **Minaev V. A., Faddeev A. O.** Modelirovanie geoekologicheskikh riskov i ocenka geoekologicheskoy bezopasnosti na rekreacionnyh territoriyah. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2008, no. 4, pp. 55-62. (in Russian).
14. **Minaev V. A., Faddeev A. O.** Modelirovanie geoekologicheskogo riska. *Spectekhnika i svyaz'*. 2009, no. 2, pp. 24-30. (in Russian).

15. **Minaev V. A., Faddeev A. O.** *Ocenki geoeologicheskikh riskov. Modelirovanie bezopasnosti turistsko-rekreacionnykh territorij* (Assessment of geoeological risks. Modeling the safety of tourist and recreational territories). Moscow: Finansy i statistika, Izdatel'skij dom INFRA-M. 2009. 370 p. (in Russian).
16. **Minaev V. A., Faddeev A. O., Danilov R. M.** Matematicheskoe modelirovanie riskov geodinamicheskogo proiskhozhdeniya. *Spectekhnika i svyaz'*. 2011, no. 1, pp. 48-52. (in Russian).
17. **Minaev V. A., Faddeev A. O.** Geoeologicheskie riski rekreacionnykh zon v Bajkal'skom regione. *Mir i bezopasnost'*. 2007, no. 3., pp. 35-42. (in Russian).
18. **Minaev V. A., Faddeev A. O.** Veroyatnostnaya model' ocenki sejsmicheskogo riska: *sbornik nauchnykh trudov «Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika»*. 2009. Issue 2, pp. 15-24. (in Russian).
19. **Faddeev A. O., Danilov R. M.** *Geodinamicheskaya bezopasnost' landshaftno-territorial'nykh kompleksov* (Geodynamic safety of landscape-territorial complexes) / pod red. V. A. Minaev. Monograph. Khabarovsk, 2010. 169 p. (in Russian).
20. **Minaev V. A., Faddeev A. O., Kuzmenko N. A.** 3-D modelirovanie migracii opasnykh endogennykh geologicheskikh processov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2016, no. 58, pp. 64-74. (in Russian).
21. **Koryachko V. P., Minaev V. A., Stepanov R. O., Faddeev A. O.** Modelirovanie vetrovogo perenosa opasnykh veshchestv pri ocenках tekhnogennogo riska v Arkticheskoy zone. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 82, pp. 112-117. (in Russian).
22. **Faddeev A. O., Pavlova S. A., Nevдах T. M.** Postroenie global'noj matematicheskoy modeli pri ocenках napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya litosfery Zemli. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2019, no. 68, pp. 61-67. (in Russian).
23. **Minaev V. A., Stepanov R. O., Faddeev A. O.** *Arkticheskie riski: modelirovanie, kompleksnaya oценка, upravlenie* (Arctic risks: modeling, integrated assessment, management). Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana. 2022. 420 p. (in Russian).
24. **Koryachko V. P., Minaev V. A., Stepanov R. O., Faddeev A. O.** Modelirovanie termo-uprugih deformatsij kak istochnika geodinamicheskikh opasnostej v Arkticheskoy zone. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2023, no. 83, pp. 72-83. (in Russian).