

*Минаев В.А.,*

доктор технических наук, профессор  
Московский университет МВД России имени В.Я. Кикотя

*Фаддеев А.О.,*

доктор технических наук, доцент  
Рязанский филиал Московского университета МВД России имени В.Я. Кикотя

*Мокшанцев А.В.,*

кандидат технических наук, доцент  
Академия государственной противопожарной службы МЧС России

### **Сейсмические факторы оперативной обстановки по линии служб чрезвычайного реагирования**

При описании оперативной обстановки по линии служб чрезвычайного реагирования, как показывает практика, необходимо рассматривать сейсмические явления<sup>1</sup> в качестве источников возникновения опасных последствий – обрушение зданий и сооружений, подтопления, пожары, повышение радиации, приводящих в целом ряде случаев к ранениям и гибели людей. Становятся все более ощутимыми социально-экономические потери.

В связи с этим технология обеспечения безопасности должна обладать возможностью гибкой настройки; учитывать вероятностный характер; быть эффективной, экономичной и окупаемой.

В технологии оценки рисков важным инструментом выступает компьютерное геодинамическое моделирование (КГДМ), разработанное в работах<sup>2</sup>, и которое позволяет:

- выявлять потенциально сейсмоактивные участки, зоны криповых подвижек, обвалов, оползней, проседаний, цунами и оценивать их последствия;
- оценивать пространственно-динамические характеристики опасных геологических процессов и строить траектории миграции их энергии;
- выполнять количественные оценки последствий воздействия вторичных геодинамических факторов на здоровье населения;

---

<sup>1</sup> Мокшанцев А.В. Сейсмическая безопасность как ключевой фактор устойчивого развития территориально-распределенных систем // Проблемы техносферной безопасности : материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. М.: АГПС МЧС РФ, 2024. С. 133-140.

<sup>2</sup> Подр.: Математическое моделирование управления природно-техногенно-антропогенным риском в Арктической зоне / В.А. Минаев, А.В. Мокшанцев, А.И. Овсяник, А.О. Фаддеев // Технологии техносферной безопасности. 2023. № 3(101). С. 172-188; Минаев В.А., Степанов Р.О., Фаддеев А.О. Имитационное моделирование техногенной катастрофы в Арктической зоне // Теория и практика экономики гражданской защиты на страже безопасности жизнедеятельности современного общества. М.: Объединенная редакция, 2023. С. 141-147.

– учитывать фактор сейсмических рисков в системе информационного описания оперативной обстановки по линии служб чрезвычайного реагирования и количественно обосновывать управленческие решения в сфере оперативной обстановки и обеспечения безопасности.

КГДМ сочетает не только детерминированные и вероятностные модели, но и модели, основанные на теории нечетких множеств<sup>1</sup>.

Математические модели оценки сейсмических рисков.

В результате многолетних исследований разработана математическая технология оценки риска в местах возможного возникновения геодинамических катастроф, в частности землетрясений, на основе анализа пространственного распределения геодинамических аномалий<sup>2</sup>. Ее суть состоит в том, что на основе анализа характеристик геодинамической неустойчивости, а именно горизонтальных градиентов аномалий гравитационного поля в изостатической редукции, строится математическая модель геологической среды исследуемой территории. Назовем ее моделью первого типа.

В ней распределенное внешнее воздействие  $P(x, y)$ , дискретные значения которого заданы с некоторым фиксированным шагом по осям  $X$  и  $Y$ , представляются в виде ряда (1), т.е. выполняется разложение аномального гравитационного поля в изостатической редукции на составляющие его зональные гармоники:

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

где,

$$p_{mn} = a_{mn} \cos k_x x \cos k_y y + b_{mn} \sin k_x x \cos k_y y + c_{mn} \cos k_x x \sin k_y y + d_{mn} \sin k_x x \sin k_y y,$$

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

---

<sup>1</sup> Минаев В.А., Фаддеев А.О., Мокшанцев А.В., Горбунов М.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616991 Российская Федерация. Программный комплекс разработки электронных паспортов территориальных рисков чрезвычайных ситуаций: № 2023615799: заявление 21.03.2023: опубликовано 04.04.2023; Минаев В.А., Фаддеев А.О., Мокшанцев А.В. Геофизические угрозы кибербезопасности // Информация и безопасность. 2024. Т. 27, № 1. С. 117-124.

<sup>2</sup> Подр.: 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; Минаев В.А., Фаддеев А.О. Моделирование геоэкологического риска // Спецтехника и связь. 2009. № 2. С. 24-30; Минаев В.А., Фаддеев А.О. Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М.: Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2009. 370 с.; Минаев В.А., Фаддеев А.О., Данилов Р.М. Математическое моделирование рисков геодинамического происхождения // Спецтехника и связь. 2011. № 1. С. 48-52.

В отличие от рассмотренной, модель второго типа предполагает, наряду с данными по аномальному гравитационному полю в изостатической редукции, наличие информации о современных вертикальных либо горизонтальных движениях земной коры на поверхности. Эта модель более точна, но, к сожалению, подобная информация имеется не для всех регионов.

Математическая модель будет еще точнее, если по объему геосреды известны пространственные распределения величины плотности и значений постоянных Ламе (модель третьего типа).

Наконец, самой точной является модель четвертого типа, в которой рассматривается максвелловская реология среды. Эта модель имеет особое значение в прогностическом плане, поскольку позволяет учитывать диссипацию сейсмодформационной 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.

Информация о территориальном распределении указанных характеристик позволяет перейти к построению вероятностной математической модели оценки сейсмического риска, названной моделью пятого типа<sup>1</sup>.

Модель основана на представлении возможных геодинамических состояний геологической среды в виде простейшего потока событий с последующим построением системы дифференциальных уравнений Колмогорова относительно вероятности нахождения геосреды в этих состояниях (рис. 1):

$$\begin{cases} p_1'(t) = -\alpha_{13}p_1(t) + \alpha_{31}p_3(t), \\ p_2'(t) = -\alpha_{23}p_2(t) + \alpha_{32}p_3(t), \\ p_3'(t) = \alpha_{13}p_1(t) + \alpha_{23}p_2(t) - (\alpha_{31} + \alpha_{32})p_3(t), \\ p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) = 1. \end{cases} \quad (2)$$

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  $\alpha_{ij}$ , 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  $\alpha_{ij}$  оцениваются на основе информации о величинах деформации, вертикальных, горизонтальных смещений в геосреде и их градиентах, полученных по данным математического моделирования.

---

<sup>1</sup> Подр.: Минаев В.А., Фаддеев А.О. Геоэкологические риски рекреационных зон в Байкальском регионе // Мир и безопасность. 2007. № 3. С. 35-42.

Результаты математического моделирования.

Детерминированные модели использованы при оценке геодинамического риска для севера Японии и обширной территории российского Дальнего Востока (рис. 1).

На рисунке 1 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  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{год})$ ).

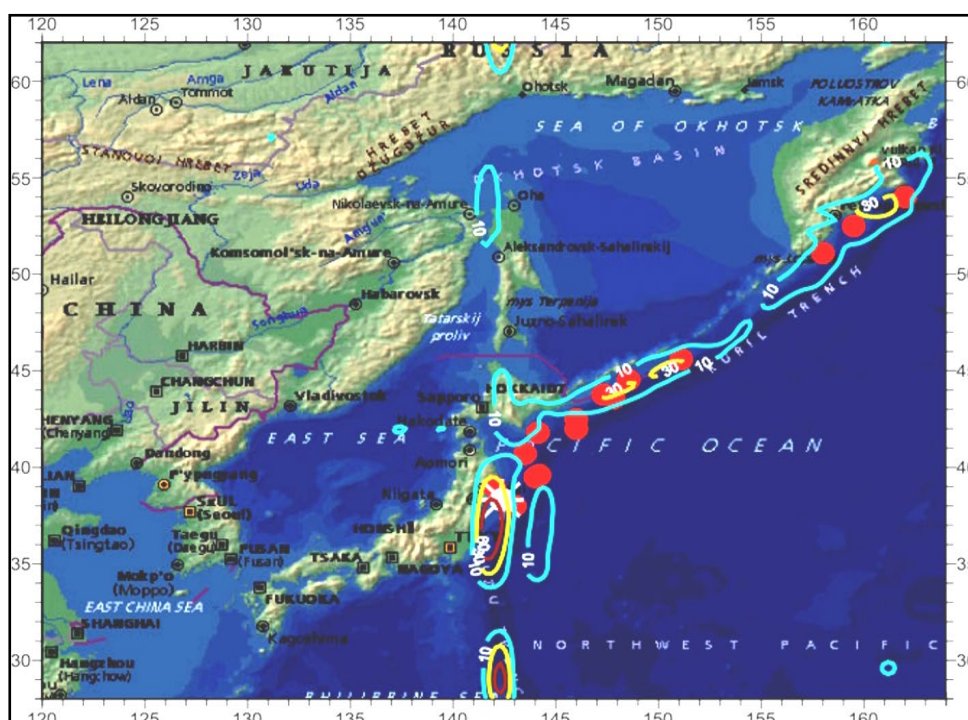


Рис. 1. Карта эквипотенциального распределения геодинамического риска на территории Дальнего Востока с эпицентрами высокоэнергетических землетрясений с магнитудами от 8,0 и выше (белой звездочкой отмечено землетрясение, произошедшее в Японии 11.03.2011)

Изолиниями с шагом значений  $20 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{год})$  оконтурены участки, являющиеся по данным математического моделирования высокорисковыми в сейсмическом отношении. На карте четко 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. Подчеркнем, что АЭС «Фукусима-1» построена в месте, исключительно рисковом в геодинамическом отношении.

Вероятностная модель впервые реализована при оценке сейсмического риска для территории Байкальского региона<sup>1</sup>. Построенная на основе расчетов карта эквипотенциального распределения показателя комплексного геодинамического риска (в данном случае – вероятности наступления сейсмического события) с нанесенными на нее эпицентрами землетрясений (рис. 2), произошедших спустя год после выполнения расчетов, наглядно продемонстрировала эффективность и работоспособность модели: эпицентры произошедших землетрясений легли на те участки территории, которые определены по модели как наиболее опасные в геодинамическом отношении.

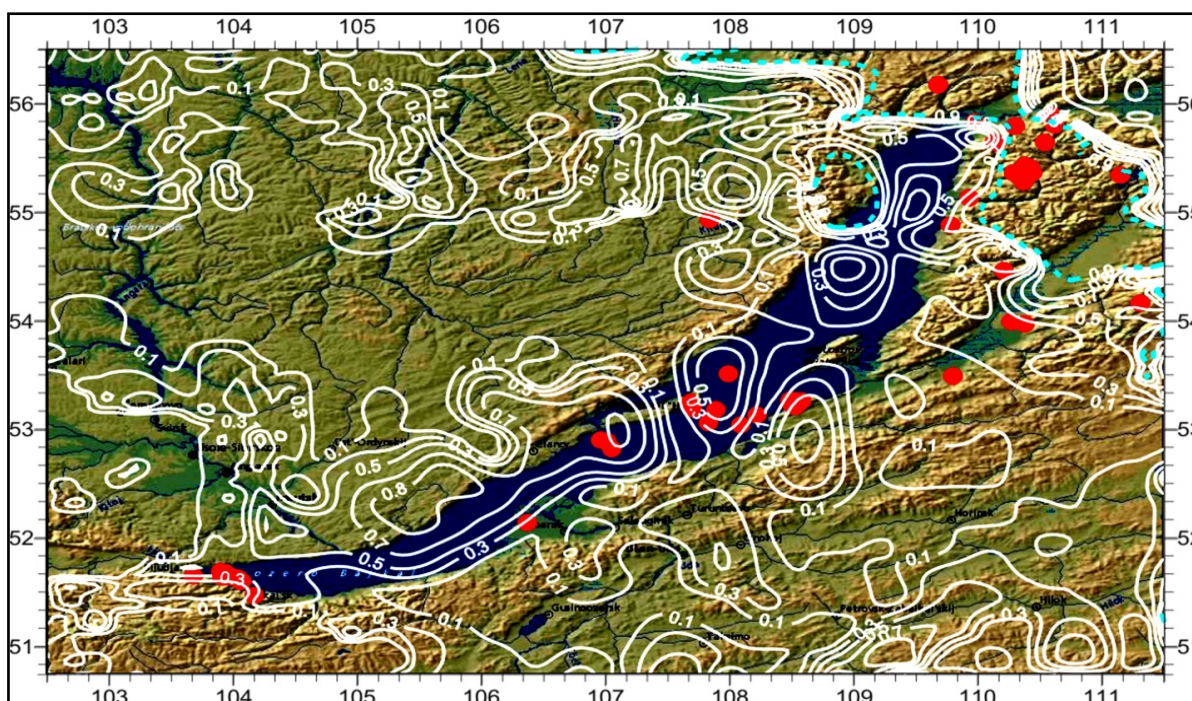


Рис. 2. Карта эквипотенциального распределения комплексного риска для территории Байкальского региона (голубой пунктирной линией показаны участки наступления сейсмических событий с вероятностью более 0,9)

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 протяженности исследуемой территории, сводясь к территориям порядка нескольких квадратных километров или даже сотен метров.

Расположение выявленных зон и их количественная оценка по геодинамическому риску подтверждают перспективность разработанной

<sup>1</sup> Подр.: Минаев В. А., Фаддеев А.О. Вероятностная модель оценки сейсмического риска // Вестник Российского нового университета. Управление, вычислительная техника и информатика : сборник научных трудов. М.: РосНОУ, 2009. Вып. 2. С. 15-24.

математической технологии<sup>1</sup>. Об этом наглядно свидетельствуют изображенные на этой же карте эпицентры уже произошедших высокоэнергетических землетрясений (с магнитудой от 8,0 и выше), произошедших в период 1737 г. – март 2011 г., которые легли в обозначенные зоны повышенного геодинамического риска.

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

В настоящее время ведутся разработки новых математических моделей, ориентированных 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<sup>2</sup>.

К сожалению, точный прогноз времени землетрясений, в особенности катастрофических землетрясений, на сегодняшний день не укладывается в «прокрустово ложе» математики. Тем не менее есть основания надеяться, что дальнейшие их разработки в области изучения опасных геодинамических явлений позволят приблизиться к решению этой очень важной для человечества проблемы. Только сочетание геологических, геофизических, геоморфологических, математических методов исследования и методов космической геодезии в их интегральном варианте должно обеспечить высокую достоверность идентификации зон сейсмического риска, в том числе для решения задач оценки оперативной обстановки по линии служб чрезвычайного реагирования<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Подр.: Ахметшин Т.Р., Минаев В.А., Степанов Р.О. Геодинамические риски: моделирование, оценки, управление : монография / под ред. В.А. Минаева. Уфа: УНЦП Изд-во УГНТУ, 2023. 338 с.

<sup>2</sup> Подр.: 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.

<sup>3</sup> Мокшанцев А.В., Лепешин М.Б. Поддержка принятия решений в системе антикризисного управления на основе информационных технологий // Социально-экономические аспекты принятия управленческих решений : материалы шестого научного семинара (Москва, 28 февраля 2022 г.). М.: Академия государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. С. 178-184.