

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

В. А. Минаев\*, А. О. Фаддеев\*\*

\*Российский новый университет, г. Москва,

\*\*Академия ФСИН России, г. Рязань

Поступила в редакцию 1.03.2009 г.

**Аннотация.** В статье рассматривается модель оценки регионального геоэкологического риска, основанная на представлении геоэкологических состояний ландшафтно-территориального комплекса как простейшего потока событий с последующим построением системы дифференциальных уравнений относительно вероятности нахождения территории в этих состояниях.

**Ключевые слова:** геоэкологический риск, дифференциальные уравнения.

**Abstract.** In article the model of regional geoeological risk estimation is considered. The model is based on representation of geoeological conditions of territory as elementary stream of the events described by system of the differential equations concerning probability of a presence of territory in these conditions.

**Keywords:** geoeological risk, differential equations.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы оценки геоэкологического риска и уровня геоэкологической безопасности на различных территориях приобрели в настоящее время статус актуальнейшей проблемы, так как инженерная геология вплотную занялась изучением динамических геологических систем в их взаимодействии со строительными системами [1–2]. Устойчивость таких систем, их надежность и, в конечном итоге, безопасность для человека определяется механизмами взаимодействия системы с геологической средой [2–7].

Исследования последних лет показали, что на человека и техническое состояние разного рода сооружений в подавляющем большинстве случаев оказывают влияние аномальные деформации земной поверхности, выражающиеся в таких явлениях как карстово-деформационные процессы, просадочно-обвальные явления, оползни, нарушенность геологической среды [4–6, 8–10].

В ряде работ авторами предложен и рассмотрен аналитический метод восстановления полей тектонических напряжений на основе анализа аномального гравитационного поля в изостатической редукции, позволяющий строить прогнозные карты потенциального геодинамического и, соответственно, геоэкологического

риска с вероятностью до 0,75 для весьма протяженных территорий [12].

Имея подобные прогнозные карты, можно достаточно эффективно проводить выявление зон геоэкологического риска и выполнять оценку уровня геоэкологической безопасности на интересующей территории по отношению к такому виду «медленных» катастроф как карстово-деформационные процессы, криповые подвижки, оседания земной поверхности в региональном масштабе [9, 11–12].

В настоящей работе авторами основной акцент сделан на оценке комплексного геоэкологического риска ландшафтно-территориального комплекса Байкальского региона, рекреационная и хозяйственная инфраструктура которого активно развивается в последние годы.

### 1. МЕТОДИКА ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

На основании методики [12] выполнены оценки степени геоэкологического риска для территорий различного масштабного уровня, таких как Рязанская область, Республика Беларусь, отдельные участки центральной части Восточно-Европейской платформы [12], а также для локальных строительных объектов [13]. Все указанные территории относятся к областям платформенного типа, на которых диапазон величин плотности потенциальной энергии

деформируемых пород геосреды  $E_r$  не столь значителен (порядка 0 — 20 (Дж/(м<sup>3</sup> × год))).

Вместе с тем, достаточно хорошо известно, что территория, непосредственно прилегающая к озеру Байкал, да и сама акватория озера являются в высокой степени сейсмически активными зонами [6, 14—15]. Поэтому, если при оценке степени геоэкологического риска Байкальского региона следовать методике, используемой нами для платформенных территорий, то мы можем получить неоднозначные, а, скорее всего, и недостоверные результаты.

Необходим новый подход, который позволит нам оценить степень геоэкологического риска не только на платформенных территориях, но и в орогенных областях, и, в частности, в Байкальском регионе в целом.

Для оценки степени геоэкологического риска ландшафтно-территориального комплекса (ЛТК) Байкальского региона нами предлагается использовать следующую математическую модель.

Предположим, что последовательность геоэкологических состояний исследуемой системы ЛТК представляет собой поток однородных событий, который удовлетворяет условиям независимости, однородности и ординарности, т. е. представляет собой так называемый *простейший поток*.

Действительно, учитывая геологический генезис геоэкологических рисков, возникающих на какой-либо территории, мы вполне, в первом приближении, можем допустить, что число событий (проявлений опасных геодинамических процессов незначительных энергетических классов, а именно такие и рассматриваются) в каждом из двух произвольно взятых, одинаковых по длительности и следующих друг за другом временных интервалов **[a, b]** и **[c, d]** не зависят друг от друга.

Из той же геологической природы рассматриваемых нами геоэкологических рисков следует, что вероятность реализации подобных опасностей в течение временного интервала **[a, b]** совпадает с вероятностью реализации этих опасностей в течение временного интервала **[c, d]**, что, фактически означает соблюдение *условия однородности*.

Далее, если за один и тот же бесконечно малый промежуток времени, т.е. практически одновременно, реализуются две геоэкологические опасности геологической обусловленности,

то в геофизическом смысле энергетически они рассматриваются как одно событие, т.е. выполняется и *условие ординарности*.

Обозначим через  $P_k(t)$  вероятность того, что в течение некоторого промежутка времени длительности  $t$  к процессу реализации различных геоэкологических состояний рассматриваемой территории будут предъявлены  $k$  требований (различных геодинамических процессов). В силу указанных нами выше условий, эта вероятность не зависит ни от выбора системы отсчета, ни от предыстории самой системы. Поэтому условия, определяющие простейший поток в приложении к нашей задаче, позволяют однозначно построить формулы для определения вероятностей  $P_k(t)$ .

Из теории вероятностей известно, что вероятность  $P_k(t)$  при любом  $k \geq 0$  может быть найдена из соотношения вида:

$$P_k(t) = \frac{(\alpha t)^k}{k!} \exp(-\alpha t), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — **некоторый параметр**.

Выражение (1) является решением системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} P_0'(t) = -\alpha P_0(t), \\ P_k'(t) = -\alpha P_k(t) + \alpha P_{k-1}(t), \end{cases} \quad (2)$$

где  $\alpha = P_0'(0)$ ,  $k = 1, 2, \dots$

Определим теперь набор геоэкологических состояний для исследуемой территории Байкальского региона.

Состоянием 1 назовем такое состояние системы ЛТК, при котором процессы, генерируемые комплексом геоэкологических опасностей различного происхождения, не переводят систему ЛТК в другое состояние, отличное от состояния 1, т.е. состояние системы флуктуирует около текущего на данный момент времени состояния (система находится в квазиравновесном состоянии).

Состоянием 2 будем называть состояние системы ЛТК, при котором те же самые процессы переводят систему в состояние, после которого возможно либо возвращение к состоянию, имевшемуся до реализации указанных процессов, либо система остается в новом квазиравновесном состоянии, либо переходит в новое состояние, отличное по своим энергетическим характеристикам от квазиравновесного.

Состоянием 3 назовем состояние системы ЛТК, при котором процессы либо переводят

систему в состояние, имевшееся до протекания в ней этих процессов, либо «удерживают» ее в квазиравновесном состоянии.

Чтобы составить систему уравнений для искомых вероятностей  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ ,  $P_3(t)$ , соответствующих состояниям 1, 2, 3, необходимо определить интенсивности процессов  $a_{ij}$  и  $a_{ji}$  (где  $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$ ), которые физически представляют собой следующие величины.

Величина  $a_{ij}$  — это сумма энергетических параметров процессов, протекающих в системе, окончание которых приводит к непосредственному переходу системы из состояния  $i$  в состояние  $j$ , т.е.  $i \rightarrow j$ .

Величина  $a_{ji}$  — это сумма энергетических параметров, окончание которых приводит систему к непосредственному переходу  $j \rightarrow i$ .

## 2. ПОСТРОЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ

Итак, мы предположили, что  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ ,  $P_3(t)$  — вероятности нахождения системы ЛТК в геоэкологических состояниях 1, 2, 3. В таком случае интенсивности  $a_{ij}$  и  $a_{ji}$  будут определяться в соответствии со следующей схемой (рис. 1).

Тогда изменения указанных вероятностей с учетом всего вышеизложенного будут описываться следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} P_1'(t) = -\alpha_{12}P_1(t) + \alpha_{21}P_2(t), \\ P_2'(t) = \alpha_{12}P_1(t) - (\alpha_{21} + \alpha_{23})P_2(t) + \alpha_{32}P_3(t), \\ P_3'(t) = \alpha_{23}P_2(t) - \alpha_{32}P_3(t). \end{cases} \quad (3)$$

Знак «—» в уравнениях системы (3) указывает на то, что интенсивность, перед которой стоит этот знак, уменьшает вероятность нахождения ЛТК в состоянии  $i$ , знак «+» — наоборот, увеличивает вероятность нахождения системы

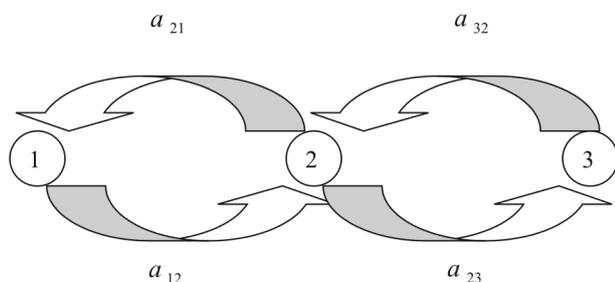


Рис. 1. Схема взаимопереходов системы ландшафтно-территориального комплекса по геоэкологическим состояниям 1, 2, 3.

в состоянии  $i$ .

Представим систему (3) в виде характеристического уравнения:

$$-\lambda^3 + B\lambda^2 + C\lambda = 0, \quad (4)$$

где  $B = -(\alpha_{12} + \alpha_{21} + \alpha_{32} + \alpha_{23})$ ,  $C = \alpha_{12}\alpha_{21} - \alpha_{12}(\alpha_{32} + \alpha_{21} + \alpha_{23}) - \alpha_{21}\alpha_{32}$ .

Корнями характеристического уравнения (4) являются следующие значения параметра  $\lambda$ :

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0, \\ \lambda_2 &= \frac{B + \sqrt{B^2 + 4C}}{2}, \\ \lambda_3 &= \frac{B - \sqrt{B^2 + 4C}}{2}. \end{aligned}$$

Найдем компоненты собственных векторов  $V_1, V_2, V_3$ , соответствующих значениям параметров  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ .

1. Для  $\lambda = \lambda_1$  собственный вектор  $V_1$ :

$$V_1 \{ \alpha_{21}\alpha_{32}; \alpha_{12}\alpha_{32}; \alpha_{12}\alpha_{23} \}. \quad (5)$$

2. Для  $\lambda = \lambda_2$  собственный вектор  $V_2$ :

$$V_2 \{ \alpha_{21}\alpha_{32}; (\alpha_{12} + \lambda_2)\alpha_{32}; (\alpha_{12} + \alpha_{21} + \alpha_{23} + \lambda_2)\lambda_2 + \alpha_{12}\alpha_{23} \}. \quad (6)$$

3. Для  $\lambda = \lambda_3$  собственный вектор  $V_3$ :

$$V_3 \{ \alpha_{21}\alpha_{32}; (\alpha_{12} + \lambda_3)\alpha_{32}; (\alpha_{12} + \alpha_{21} + \alpha_{23} + \lambda_3)\lambda_3 + \alpha_{12}\alpha_{23} \}. \quad (7)$$

Как показано в работе [12], общее решение исходной системы дифференциальных уравнений представляется в следующем виде:

$$\begin{cases} P_1(t) = \alpha_{21}\alpha_{32}C_1 + \alpha_{21}\alpha_{32}C_2 \times \\ \times \exp(\lambda_2 t) + \alpha_{21}\alpha_{32}C_3 \exp(\lambda_3 t); \\ P_2(t) = \alpha_{12}\alpha_{32}C_1 + (\alpha_{12} + \lambda_2)\alpha_{32}C_2 \times \\ \times \exp(\lambda_2 t) + (\alpha_{12} + \lambda_3)\alpha_{32}C_3 \exp(\lambda_3 t); \\ P_3(t) = \alpha_{12}\alpha_{23}C_1 + [(\alpha_{12} + \alpha_{21} + \alpha_{23} + \\ + \lambda_2)\lambda_2 + \alpha_{12}\alpha_{23}]C_2 \exp(\lambda_2 t) + \\ + [(\alpha_{12} + \alpha_{21} + \alpha_{23} + \lambda_3)\lambda_3 + \\ + \alpha_{12}\alpha_{23}]C_3 \exp(\lambda_3 t). \end{cases} \quad (8)$$

Далее, предположим, что в некоторый условный начальный (нейтральный) момент времени  $t = 0$  система (ЛТК) находится в состоянии №2, т.е. это событие является достоверным, а события, соответствующие состояниям №1; 3, являются невозможными, т.е.  $P_1(t) = P_3(t) = 0; P_2(t) = 1$ .

Тогда, следуя работе [12], получим соотношения для определения коэффициентов  $C_1, C_2$  и  $C_3$ :

$$\begin{cases} C_1 = \frac{a_{33}(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32})}{(a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31})(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) + (a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})(a_{13}a_{31} - a_{11}a_{33})}; \\ C_2 = \frac{a_{13}a_{31} - a_{11}a_{33}}{a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}} C_1; \\ C_3 = -\frac{1}{a_{33}}(a_{31}C_1 + a_{32}C_2). \end{cases} \quad (9)$$

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По рассчитанным таким образом полям данных для всей территории Байкальского региона были построены результативные карты пространственного распределения вероятностей проявления геодинамических подвижек, оползневых и просадочных явлений, а также комплексного геоэкологического риска. Так, например, на рис. 2 представлена карта-схема пространственно-вероятностного распределения комплексного геоэкологического риска для территории Байкальского региона.

На представленной карте-схеме изолинии вероятностей построены с неравномерным шагом значений. Это обусловлено необходимостью сделать карту-схему одновременно и информативной, и наглядной, и удобно читаемой. Что же касается диапазонов значений вероятностей и сопоставляемой с ними степенью риска, то здесь мы отметим следующее.

Области, околнуренные изолиниями со значением вероятности 0,3, мы полагаем считать

зонами латентно-потенциального риска; изолиниями со значением 0,5 — зонами умеренного риска; 0,7 — зонами повышенного риска; 0,8 — зонами чрезвычайной опасности (рис. 2). Такая градация диапазонов значений вероятности и сопоставимой с ними степенью риска является условно-общей, и при оценке опасности для различных объектов, скажем, для атомных станций, туристско-рекреационных комплексов или лесных массивов, она должна существенно варьировать по степени тяжести.

Также нами была выполнена оценка количественного распределения землетрясений, произошедших в Байкальском регионе в 2008 г. (по состоянию на 01.09.2008) по зонам геоэкологического риска (табл. 1, рис. 3 — 6).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, рассмотренный нами подход, основанный на представлении возможных геоэкологических состояний ландшафтно-территориального комплекса как простейшего потока собы-

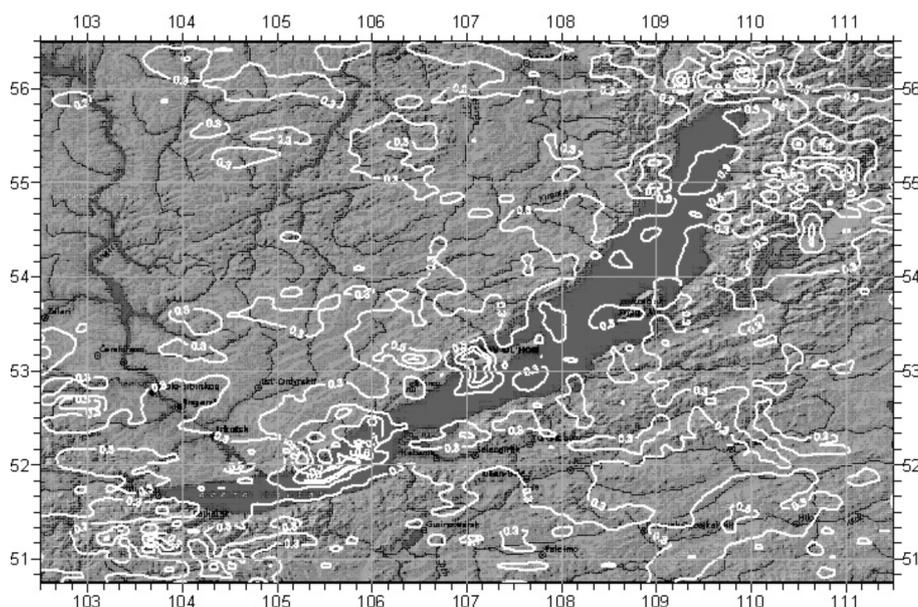


Рис. 2. Карта-схема пространственно-вероятностного распределения комплексного геоэкологического риска для территории Байкальского региона. По горизонтальным осям указана долгота (в градусах), по вертикальным осям — широта (в градусах).

Характеристика землетрясений, произошедших в Байкальском регионе в 2008 г., по зонам геологического риска (по состоянию на 01.09.2008 г.)

№ п/п	Энергетические классы землетрясений	Зоны вероятностного проявления геодинамических подвижек				Зоны повышенного комплексного геодинамического риска		Всего землетрясений, подвергнутых статистическому анализу
		Относительная количественная энергетическая характеристика зоны				Относительная количественная энергетическая характеристика зоны		
		0–0,1		0,1–0,4		0,4–0,7		
		Кол-во	% от общего кол-ва	Кол-во	% от общего кол-ва	Кол-во	% от общего кол-ва	
1.	9,5 – 10,0	25	54%	16	35%	5	41%	46
2.	10,0 – 10,5	5	50%	3	30%	2	20%	10
3.	10,5 – 11,0	3	75%	1	25%	—	—	4
4.	11,0 – 11,5	1	50%	1	50%	—	—	2
5.	12,0 – 12,5	—	—	—	—	1	100%	1
6.	13,0 – 13,5	—	—	—	—	1	100%	1
7.	14,0 – 14,5	—	—	—	—	1	100%	1
8.	15,0 – 15,5	—	—	—	—	1	100%	1

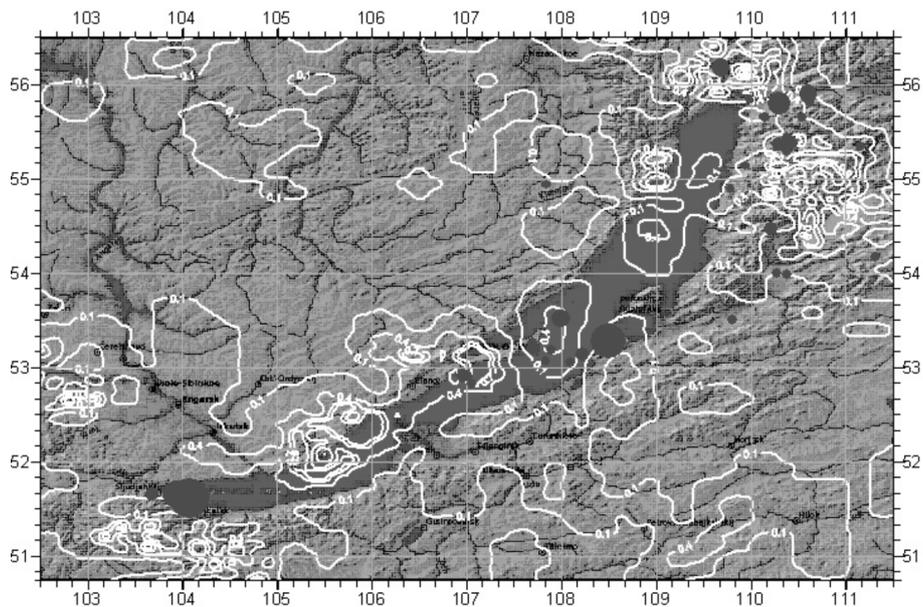


Рис. 3. Карта-схема пространственно-вероятностного распределения геодинамических криповых подвижек для территории Байкальского региона с эпицентрами произошедших в 2008 г. землетрясений (по состоянию на 01.09.2008). По горизонтальным осям указана долгота (в градусах), по вертикальным осям — широта (в градусах).

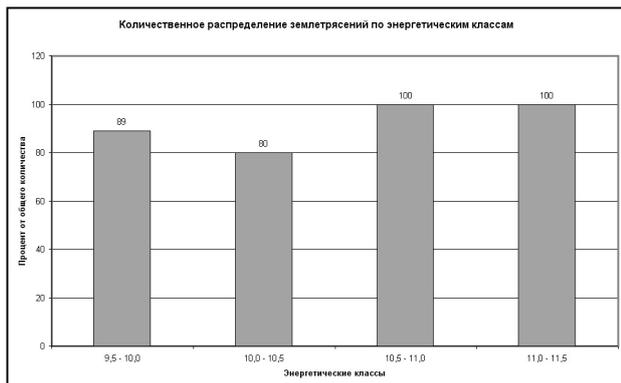


Рис. 4. Количественное распределение землетрясений энергетических классов  $K = 9,0 \div 11,5$ , попавших в зоны вероятностного проявления геодинамических подвижек относительной количественной энергетической величины  $0,1 - 0,4$ .

тий с последующим построением математической модели позволяет оценивать пространственно-вероятностные распределения опасностей, исходящих от геологической составляющей окружающей среды.

Анализ результатов исследований, представленных в табл. 1 и на рис. 3 — 6, позволяет сделать следующие важные выводы.

1. Для прогнозирования пространственного распределения возможных землетрясений энер-

гетических классов  $9,0 - 11,5$ , т.е. с магнитудой от  $2,5$  до  $4,0$  в орогенных областях наиболее оптимальным является выполнение таких оценок на основе выявления зон возможных геодинамических криповых подвижек; величина относительной количественной энергетической характеристики таких зон при этом должна принадлежать диапазону от  $0,1$  до  $0,4$ .

2. Прогнозирование пространственного распределения возможных крупных сейсмических событий, таких, как тектонические землетрясения энергетических классов  $12,0 - 15,0$  и выше (т.е. с магнитудой от  $5,0$  и выше), на наш взгляд, необходимо производить на основе выявления зон повышенного комплексного геоэкологического риска, т.е. такого геоэкологического риска, в котором структурно учитывается не только вероятности возникновения геодинамических криповых подвижек, но и проявления таких опасных экзогенных процессов, как карст, проседания, оползни, обвалы.

3. При этом наибольшее внимание следует обращать на те участки оцениваемой территории, где наиболее высока градиентность вертикальных и горизонтальных смещений, возникающих в геологической среде верхних частей земной коры. Количественно такие зоны повышенного комплексного геоэкологического рис-

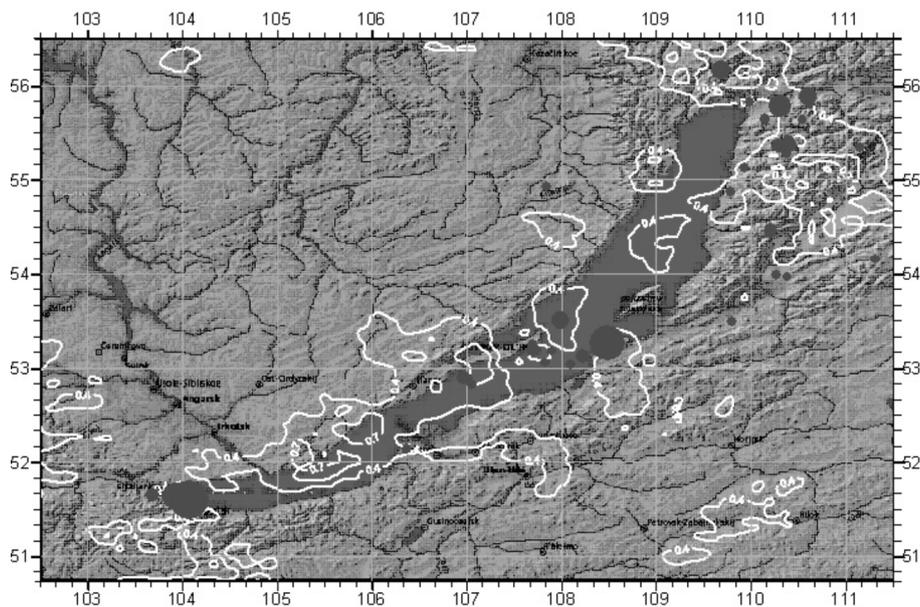


Рис. 5. Карта-схема пространственно-вероятностного распределения комплексного геоэкологического риска для территории Байкальского региона с эпицентрами произошедших в 2008 г. землетрясений (по состоянию на 01.09.2008). По горизонтальным осям указана долгота (в градусах), по вертикальным осям — широта (в градусах).



Рис. 6. Количественное распределение землетрясений энергетических классов  $K = 9,5 \div 15,5$ , попавших в зоны повышенного комплексного геоэкологического риска относительной количественной энергетической величины  $0,4 - 0,7$ .

ка, по результатам выполненных исследований, следует оценивать в относительных количественных энергетических единицах как величину, принадлежащую интервалу от 0,4 до 0,7.

Авторы также полагают, что в подобный подход в методическом плане для орогенных областей является достаточно действенным, и при его дальнейшем применении к ряду других подобных областей позволит выработать единую эффективную методику вероятностного прогнозирования пространственно-временного распределения сейсмических событий различных энергетических классов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский В.А., Жигалин А.Д., Хмелевской В.К. Экологическая геофизика. — М.: МГУ, 2000. — 256 с.
2. Инженерно-геологический и геофизический мониторинг природных объектов и инженерных сооружений / Под ред. А. В. Николаева. — М.: ГНТП «Безопасность», 1998. — 102 с.
3. Акимов В.А., Новиков В.Д., Радаев Н.Н. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски. — М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2001. — 344 с.
4. Москва: геология и город / Под ред. В. И. Осипова. — М.: Московские учебники и картолитография, 1997. — 400 с.

5. Опасные экзогенные процессы / Под ред. В. И. Осипова, Медведева О.П. — М.: ГЕОС, 1999. — 290 с.

6. Природные опасности России. Сейсмические опасности. Тематический том / Под ред. Г. А. Соболева. — М.: КРУК, 2000. — 296 с.

7. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. — М.: ПНИИИС, 1995. — 167 с.

8. Куликова В.В. Некоторые вопросы жизнедеятельности человека в геоактивных зонах // Мат. междунар. конф. «Геодинамика и геоэкология» / Ин-т экологических проблем Севера УрО РАН. — Архангельск, 1999. — С. 196—198.

9. Минаев В.А., Фаддеев А.О. «Медленные» катастрофы, здоровье и безопасность населения // «Системы безопасности»—СБ — 2006: материалы XXV междунар. конф. — М.: Академия ГПС МЧС РФ, 2006. — С. 315—322.

10. Туголуков А.М. Анализ причин аварий зданий и сооружений и рекомендации по их устранению // Специальное и подземное строительство. — М.: ЦНИИПромзданий, 1994. — С. 36—46.

11. Минаев В.А., Фаддеев А.О. Математические методы и модели в геоэкологическом районировании рекреационных территорий // Математические методы и информационные технологии в современном обществе: материалы межрег. конф. / Рязань, Академия ФСИН России. — Тверь, НИИИиПТ, 2007. С. 111 — 117.

12. Минаев В.А., Фаддеев А.О. Методика оценки устойчивости территорий туристско-рекреационного, жилищного и промышленного назначения к факторам геоэкологического риска // «Системы безопасности» — СБ — 2007: материалы XXVI междунар. конф. — М.: Академия ГПС МЧС РФ, 2007. — С. 84—90.

13. Фаддеев А.О. Проблема оценки геоэкологического риска заселенных территорий // Безопасность жизнедеятельности. — М.: Новые технологии. — 2006. — № 8. — С. 32—37.

14. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т.2. Циклическая динамика в природе и обществе / Под ред. А. Г. Гамбурцева. — М.: Научный мир, 1998. — 432 с.

15. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий / Под ред. А. Г. Гамбурцева. — М.: Янус-К, 2002. — 672 с.

**Минаев Владимир Александрович** — доктор технических наук, профессор, Российский новый университет, г. Москва. E-mail: [m1va@yandex.ru](mailto:m1va@yandex.ru)

**Фаддеев Александр Олегович** — к. физ.-мат. наук, доцент, Академия ФСИН России, г. Рязань. E-mail: [aleksandr.faddeev@pochta.ru](mailto:aleksandr.faddeev@pochta.ru)

**Minaev Vladimir .A.** — Dr.Sci.Tech., Professor, The Vice-rector of the Russian New University, Moscow. E-mail: [m1va@yandex.ru](mailto:m1va@yandex.ru)

**Faddeev Alexandr .O.** — Candidate of physical and mathematical sciences, Senior lecturer Academy FSIN of Russia, Ryazan. E-mail: [aleksandr.faddeev@pochta.ru](mailto:aleksandr.faddeev@pochta.ru)