

*А.В. Абрамова*

(ДВЮИ МВД России, Хабаровск; e-mail: bastxxx@mail.ru)

## **КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСК-СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ**

*Разработана комплексная математическая модель оценки риск-состояния геологической среды населённых пунктов. Производится анализ граничных условий моделей. Исследуется влияние планируемых к строительству зданий и сооружений на риск-состояние территорий.*

*Ключевые слова: модель, риск-состояние, геологическая среда, населённые территории.*

*A.V. Abramova*

## **INTEGRATED MODEL OF RISK-STATUS ASSESSMENT FOR GEOLOGICAL ENVIRONMENT OF HUMAN SETTLEMENTS**

*The integrated mathematical model of risk assessment for geological environment of human settlements was developed. The analysis of the boundary conditions of the models is given. Examines the impact of planned for construction of buildings and structures on the risk status of the territories.*

*Key words: model, risk-status, geological environment, populated areas.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 13 сентября 2014 г.

Как показало изучение литературных источников, недостатком существующих математических моделей оценки риск-состояния геологической среды населённых пунктов зачастую выступает некорректность задания краевых (или граничных) условий. В то же время эти условия настолько важны, что их незначительное изменение кардинальным образом меняет сами принципы моделирования [1-8].

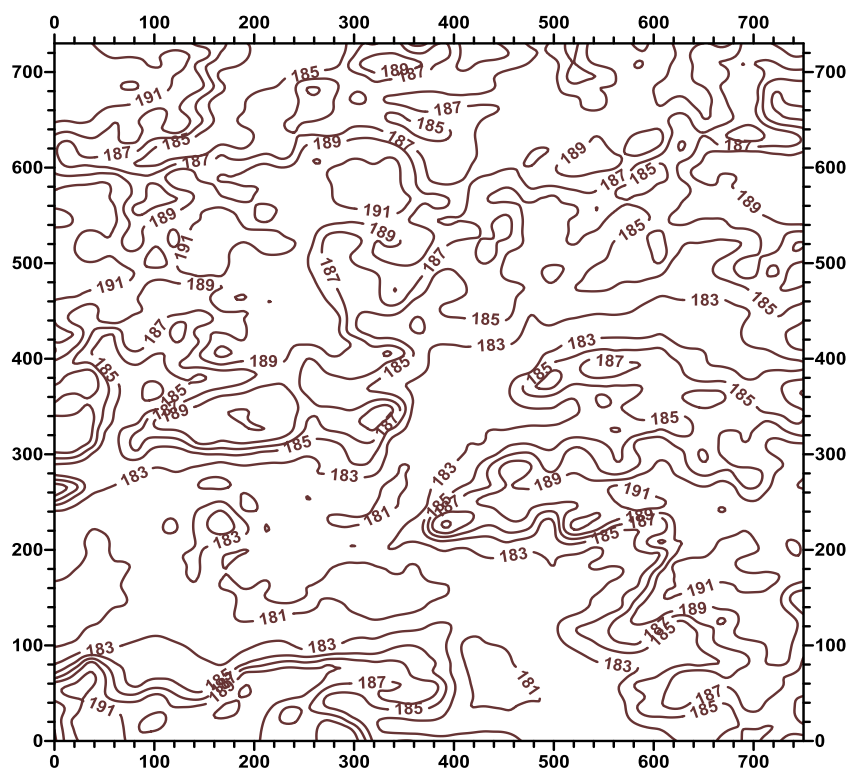
Из научных источников следует, что выбор условий, как правило, ограничен заданием четырех уравнений. Обусловлено это тем, что в основе аналитического представления компонент тензора геодинамических напряжений и составляющих вектора смещений в геологической среде лежит бигармоническая функция [1, 2, 4, 7, 8], которая содержит четыре независимых друг от друга коэффициента, что и определяет четверку уравнений при задании граничных условий разрабатываемой модели [4-7]. Вместе с тем, для более адекватного описания геологической среды населённых пунктов необходимо задание большего числа условий (например, 5-8 условий), в зависимости от конкретики решаемой задачи.

Для разрешения этой проблемы предлагается следующий подход. Используя всё ту же бигармоническую функцию, потребуем одновременного выполнения не одного набора граничных условий, а сразу нескольких, с последующим согласованием решений для получения выражений компонент тензора геодинамических напряжений и составляющих вектора смещений.

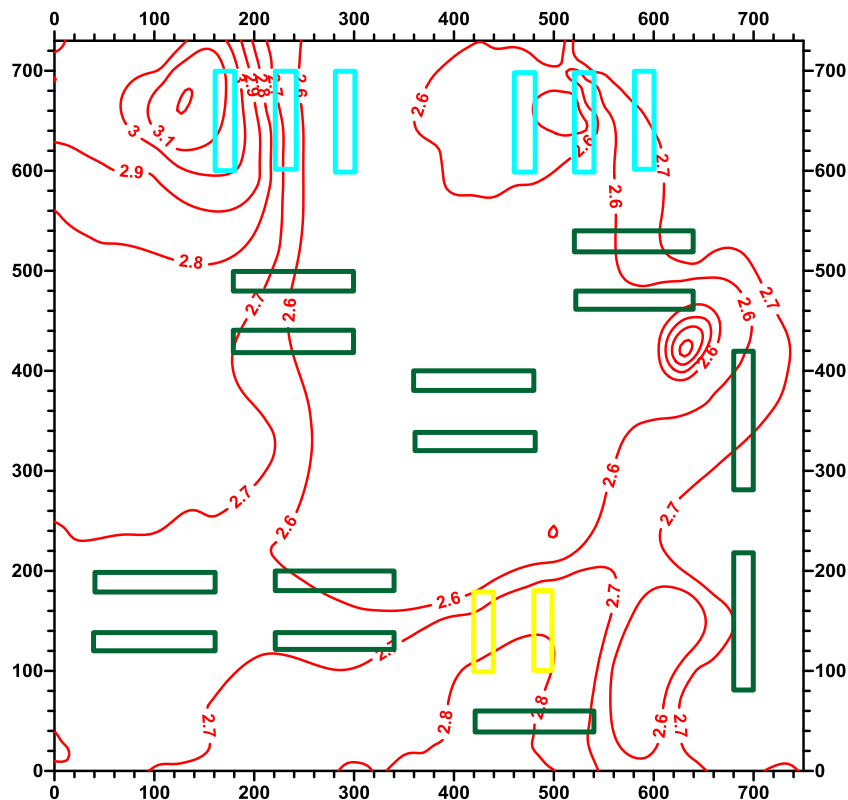
Предположим, что нам известен топографический рельеф местности (рис. 1), распределение плотностных неоднородностей (рис. 2), характер знакопеременных вертикальных и горизонтальных движений на дневной поверхности территории (то есть известен характер деформационных процессов) и перспективный план генеральной застройки этой территории. То есть фактически в этом случае известно распределение предполагаемой статической нагрузки на геологическую среду рассматриваемой территории от расположенных на ней зданий и сооружений. Карты с информацией по вертикальным и горизонтальным движениям на поверхности не будем приводить из-за ограниченного объема статьи.

С учётом сказанного, перейдем к построению комплексной математической модели.

Согласно многочисленным работам в данной области исследований, два обязательных условия должны отражать факт отсутствия на дневной поверхности (равенство нулю) сдвиговых напряжений, ориентированных в вертикальных плоскостях, то есть в плоскостях  $XZ$  и  $YZ$  трехмерного объема геологической среды [1-4, 7, 8]. Эти два условия необходимо обязательно учитывать во всех четверках модельных граничных условий, описывающих динамическое поведение объема геологической среды градостроительной системы. Построим соответствующие четверки модельных граничных условий.



**Рис. 1.** Топография местности, отведенной под строительную площадку (по осям координат расстояние на этом и последующих рисунках отложено в метрах)



**Рис. 2.** Распределение плотностных неоднородностей (глубина 15 м) и перспективный план генеральной застройки для территории модельной строительной площадки (здания зеленого цвета – 9 этажей; светло-голубого – 7 этажей; желтого – 5 этажей)

В первой четверке (модель 1) учтём влияние топографических масс рельефа и глубинных плотностных неоднородностей (для плоскости  $XZ$ ):

$$\begin{cases} \sigma_z(x, y, \chi) = P(x, y), & \tau_{xz}(x, y, h) = 0, \\ \sigma_z(x, y, 0) = T(x, y) & \tau_{xz}(x, y, 0) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

В системе (1) функцией  $P(x, y)$  описывается распределение плотностных глубинных неоднородностей, функцией  $T(x, y)$  – влияние топографических масс рельефа местности,  $\sigma_z, \tau_{xz}$  – соответственно вертикальные нормальные и сдвиговые напряжения,  $\chi$  – глубинный уровень, для которого известно распределение плотностных неоднородностей.

Во второй четверке (модель 2) учтем знакопеременные вертикальные движения на дневной поверхности  $V(x, y)$  (также приводятся для плоскости  $XZ$ ):

$$\begin{cases} u_z(x, y, h) = V(x, y), & \tau_{xz}(x, y, h) = 0, \\ \sigma_z(x, y, h) = 0, & \tau_{xz}(x, y, 0) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В системе (2) дополнительно потребуем равенство нулю на дневной поверхности напряжений сжатия-растяжения, то есть вертикальных нормальных напряжений  $\sigma_z$ . Величина  $u_z$  представляет собой вертикальную составляющую вектора смещений в геологической среде градостроительных систем.

В третьей четверке условий (модель 3) объединим распределение горизонтальных сдвиговых напряжений на дневной поверхности  $H(x, y)$ , определенные через горизонтальные смещения на этой поверхности, и распределение ста-

тической нагрузки  $N(x, y)$  от будущих зданий и сооружений (приведено также для плоскости  $XZ$ ):

$$\begin{cases} \sigma_z(x, y, h) = N(x, y), & \tau_{xz}(x, y, h) = 0, \\ \tau_{xy}(x, y, h) = H(x, y), & \tau_{xz}(x, y, 0) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

В системах (1)-(3) "0" соответствует нижней границе (подошве) модели,  $h$  – верхней границе (дневной поверхности) модели.

Выполним аналитическое построение предложенной автором комплексной математической модели оценки риск-состояния геологической среды градостроительной системы населённого пункта. Для этой цели воспользуемся соотношениями для соответствующих компонент тензора напряжений и составляющих вектора смещений в геологической среде, приведенные, например, в работах [4, 7, 8]:

$$\begin{cases} \sigma_z(x, y, z) = k^2 \left\{ \left[ \frac{\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dz) \right] shkz + \left[ \frac{\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Cz) \right] chkz \right\} \cos k_x x \cos k_y y, \\ \tau_{xz}(x, y, z) = k k_x \left\{ \left[ k(A + Cz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} D \right] shkz + \left[ k(B + Dz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} C \right] chkz \right\} \sin k_x x \cos k_y y, \\ \tau_{xy}(x, y, z) = -k_x k_y \left\{ [k(B + Dz) + C] shkz + [k(A + Cz) + D] chkz \right\} \sin k_x x \sin k_y y, \\ u_z(x, y, z) = \frac{k}{2\mu} \left\{ \left[ \frac{2\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Cz) \right] shkz + \left[ \frac{2\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dz) \right] chkz \right\} \cos k_x x \cos k_y y. \end{cases} \quad (4)$$

При подобном подходе расчётные соотношения для компонент тензора геодинамических напряжений и составляющих вектора смещений в геологической среде градостроительных систем будут представляться комплексными выражениями. Приведем образцы записи таких выражений для моделей (1)-(3) на примере компоненты сдвиговых напряжений  $\tau_{xz}$ :

$$\begin{cases} \tau_{xz}^{(1)} = \frac{k_x}{k} \left\{ \left[ k(\alpha_1 + \gamma_1 z) + \frac{\lambda \delta_1}{\lambda + \mu} \right] shkz + \left[ k(\beta_1 + \delta_1 z) + \frac{\lambda \gamma_1}{\lambda + \mu} \right] chkz \right\} \sin k_x x \cos k_y y, \\ \tau_{xz}^{(2)} = k k_x \tilde{V}_k \left\{ \left[ k(\alpha_2 + \gamma_2 z) + \frac{\lambda \delta_2}{\lambda + \mu} \right] shkz + \left[ k(\beta_2 + \delta_2 z) + \frac{\lambda \gamma_2}{\lambda + \mu} \right] chkz \right\} \sin k_x x \cos k_y y, \\ \tau_{xz}^{(3)} = k k_x \left\{ \left[ k(\alpha_3 + \gamma_3 z) + \frac{\lambda \delta_3}{\lambda + \mu} \right] shkz + \left[ k(\beta_3 + \delta_3 z) + \frac{\lambda \gamma_3}{\lambda + \mu} \right] chkz \right\} \sin k_x x \cos k_y y, \end{cases} \quad (5)$$

где верхний индекс в обозначении компоненты  $\tau_{xz}$  указывает на номер модели (четверки условий).

В таком случае, при наличии всех трех четверок условий, комплексное выражение, например, для компоненты сдвиговых напряжений  $\tau_{xz}$ , будет выглядеть следующим образом:

$$\tau_{xz} = w_1 \tau_{xz}^{(1)} \prod_{j=1}^2 \varepsilon_{1j} + w_2 \tau_{xz}^{(2)} \varepsilon_{21} + w_3 \tau_{xz}^{(3)} \prod_{j=1}^2 \varepsilon_{3j}, \quad (6)$$

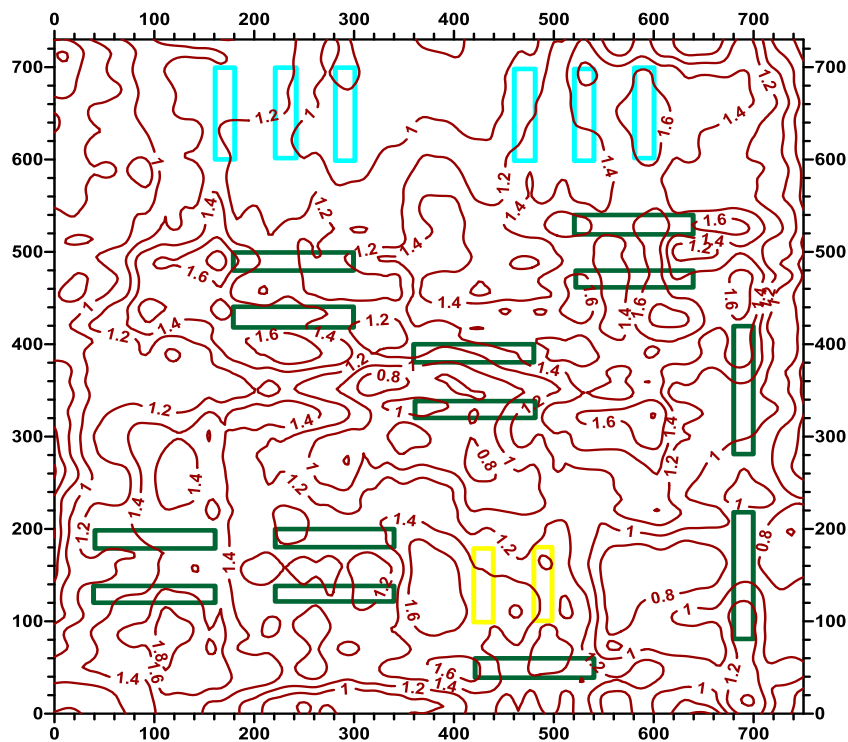
где  $w_i$  – весовой вклад каждой из моделей 1-3 при оценке состояния геологической среды;

$\varepsilon_{ij}$  – степень точности информации о состоянии геологической среды ( $i$  – номер четверки условий;  $j$  – номер характеристики геологической среды или воздействия на нее из этого условия);  $\varepsilon_{ij} \in [0; 1]$ .

Расчётные соотношения для остальных компонент тензора геодинамических напряжений и составляющих вектора смещений в геологической среде представляются аналогичным образом.

Рассмотрим кратко результаты, полученные в ходе реализации предложенной комплексной математической модели к оценке состояния геологической среды градостроительных систем населённых пунктов.

На рис. 3 представлено распределение полей сдвиговых геодинамических напряжений на территории модельной строительной площадки. Если условно полагать верхнюю границу строительной площадки за северную, нижнюю – за южную, левую и правую соответственно за западную и восточную, то из рис. 3 видно, что наибольшие по своей величине сдвиговые напряжения, возникающие вследствие воздействия на геологическую среду данной градостроительной системы, присутствуют в северо-восточном, центрально-восточном, южном, южно-центральном, западно-центральном и юго-западном участках рассматриваемой территории.

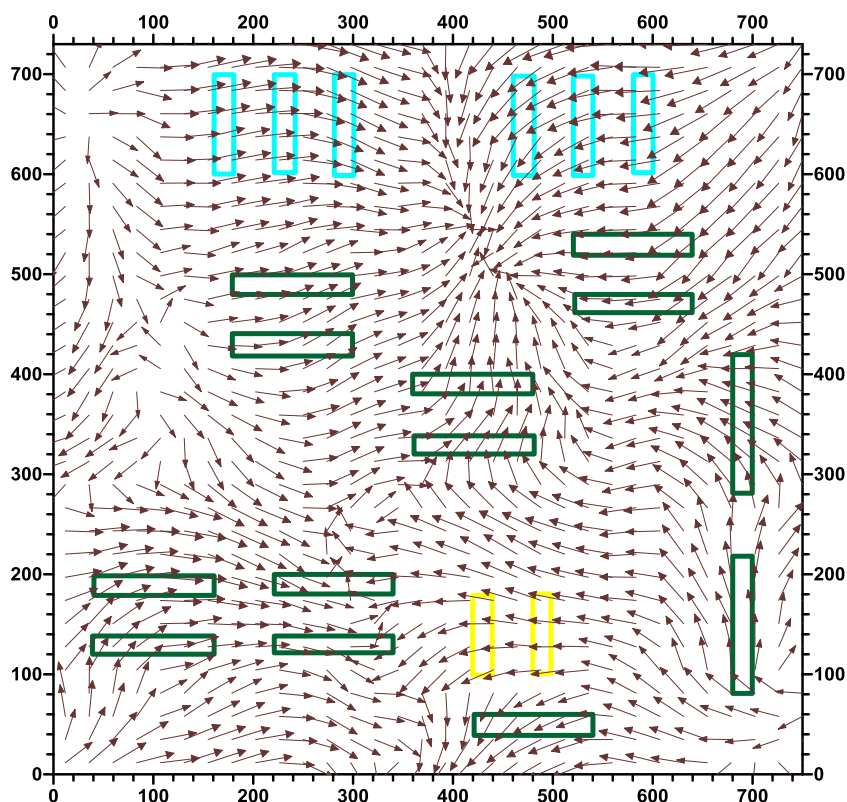


**Рис. 3.** Распределение сдвиговых напряжений (в КПа) на территории модельной строительной площадки с учётом статической нагрузки от планируемых к строительству зданий и сооружений

При учёте дополнительного воздействия статической нагрузки от будущих зданий и сооружений очевидно, что на указанных участках сдвиговые напряжения значительно возрастают, что ставит под сомнение целесообразность размещения девятиэтажных зданий на северо-восточном, центрально-западном, южном и юго-западном участках.

Подчеркнем, что очень значимую для проведения строительных работ информацию предоставляют данные о современных горизонтальных движениях на территории рассматриваемой градостроительной системы (рис. 4; 5).

Так, в частности, на рис. 4, на глубинах порядка 15 м четко фиксируются центр "сжатия" (на северо-западном участке) и центры "растяжения" (на северо-западном и западном участках).

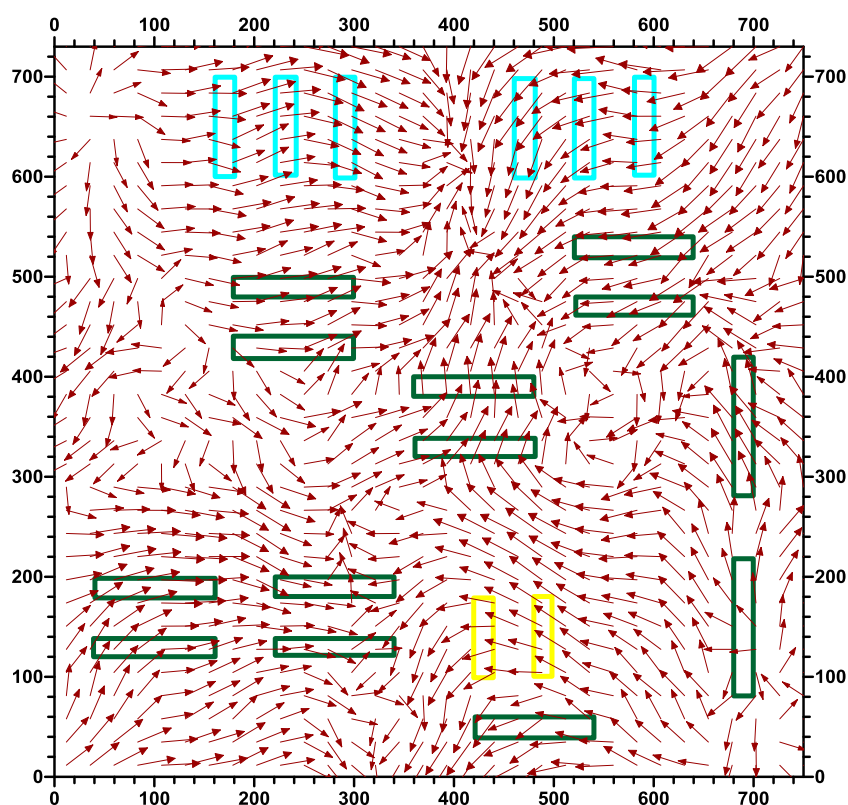


**Рис. 4.** Распределение векторов дополнительных горизонтальных смещений, возникающих в геологической среде под воздействием внешних возмущающих факторов (без учёта статической нагрузки)

И если центры "растяжения" в общем-то, никакой опасности для будущих зданий не представляют, то вот центр "сжатия" достаточно опасен, поскольку мы видим на рис. 4, как горизонтальные смещения, представленные направленными к центру сжатия векторами, "сдвигают" здания к нему, что может негативно отразиться на безопасности проживания в них.

Также достаточно опасными являются те участки, на которых векторы горизонтальных движений направлены противоположно друг другу. На этих участках создаются условия, благоприятные для развития оползневых процессов.

Учёт воздействия статической нагрузки (рис. 5) создает еще более неблагоприятные условия для будущих зданий вследствие увеличения на рассматриваемой территории участков с контрастными горизонтальными движениями. Центры "растяжения" и центр "сжатия" при этом остаются неизменными по своему расположению, и чреваты развитием на указанных участках просадочно-обвальных явлений.



**Рис. 5.** Распределение векторов дополнительных горизонтальных смещений, возникающих в геологической среде под воздействием внешних возмущающих факторов (с учётом статической нагрузки)

В заключение отметим следующее. Предложенная комплексная математическая модель оценки риск-состояния геологической среды градостроительных систем населённых пунктов позволяет на основании имеющейся входной информации о физических характеристиках геологической среды превентивно количественно оценивать возможность застройки исследуемой территории. Учёт же статической нагрузки от планируемых к строительству зданий и сооружений дает возможность не только оценивать динамику естественных геологических процессов, происходящих в объёме геосреды градостроительной системы, но и позволяет усовершенствовать управленческие решения при реализации генерального плана застройки территории.

## Литература

1. **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-во ОИФЗ РАН, 2000. С. 3-18.
2. **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) // Матер. междунар. конф. "Геодинамика и геоэкология". Архангельск: Институт экологических проблем Севера УрО РАН, 1999. С. 11-14.
3. **Артемьев М.Е., Дубровский В.А.** О связи упругих напряжений в литосфере с нарушениями изостазии // Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, 1976. № 10. С. 93-98.
4. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М.: Финансы и статистика, изд. дом ИНФРА-М, 2009. 370 с.
5. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** Моделирование геоэкологического риска // Спецтехника и связь. 2009. № 2. С. 24-30.
6. **Минаев В.А., Фаддеев А.О., Данилов Р.М., Абрамова А.В., Павлова С.А.** Математическое моделирование сейсмических рисков // Спецтехника и связь. 2013. № 5. С. 58-63.
7. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** Безопасность и отдых: системный взгляд на проблему рисков // В сб. Туризм и рекреация: Труды II Международной научно-практической конференции. 2007. С. 329-334.
8. **Фаддеев А.О., Данилов Р.М.** Геодинамическая безопасность ландшафтно-территориальных комплексов. Хабаровск: Дальневосточный юридический институт МВД России МВД России. 2010. 132 с.