

**В.А. Минаев¹, А.О. Фаддеев², М.П. Сычев³, К.М. Бондарь⁴,
Н.А. Кузьменко⁵, Т.М. Невдах²,**

**(¹Академия ГПС МЧС России, ²Академия ФСИН России, ³МГТУ им. Баумана,
⁴ДВЮИ МВД России, ⁵ЗАО "РТИ-Инвест"; e-mail: m1va@yandex.ru)**

ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РИСКА

Анализируется классификация моделей для оценки геодинамического риска. Учеными масштабные характеристики территорий. Для каждого классификационного уровня описаны модели и программные средства для оценки геодинамического риска и приведены практические результаты. Материал может быть полезен при решении проблем техносферной безопасности.

Ключевые слова: геодинамический риск, классификация, программные средства, оценка.

**V.A. Minaev, A.O. Faddeev, M.P. Sychev, K.M. Bondar,
N.A. Kuzmenko, T.M. Nevдах**

SOFTWARE AND MATHEMATICAL SUPPORT OF THE GEODYNAMIC RISK ASSESSMENT

Analysis of classification of geodynamic risk models was carried out. Large-scale characteristics of territories taken into account. Models and software geodynamic risk assessments are described for each classification level. Practical results are presented. The material can be helpful in solving the problems of technosphere safety.

Key words: geodynamic risk, classification, software tools evaluation.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 10 декабря 2015 г.

Введение

Проблемы защиты населения и территорий от воздействия опасных геодинамических процессов невозможно решать, не владея информацией об их пространственном распределении, интенсивности воздействия и периодичности проявления. Именно поэтому исследования в области математического моделирования геодинамических рисков в последнее время стремительно набирают обороты [1, 2]. Традиционно они проводятся либо в рамках качественного описания, либо на основании исключительно приборных исследований, которые позволяют отслеживать развитие опасных геодинамических событий в режиме реального времени, однако не оставляя возможности проведения не только среднесрочных, но и краткосрочных превентивных мероприятий.

Очевидно, что приборные исследования в этой сфере весьма дорогостоящи и не могут быть применены повсеместно, так как дорогостоящее оборудование размещается, как правило, только там, где его установка считается крайне необходимой. По этой причине нами стала разрабатываться математическая технология оценки геодинамических рисков.

Классификация математических моделей для оценки геодинамического риска

В своих работах мы выделили три типа моделей для оценки геодинамического риска (рис. 1) по их видовому признаку и три типа – по масштабному признаку.

Тип 1 – детерминированные модели. Первоначально была разработана математическая технология оценки мест возможного возникновения геодинамических катастроф, в частности – землетрясений, на основе анализа пространственного распределения геодинамических аномалий [1-4].

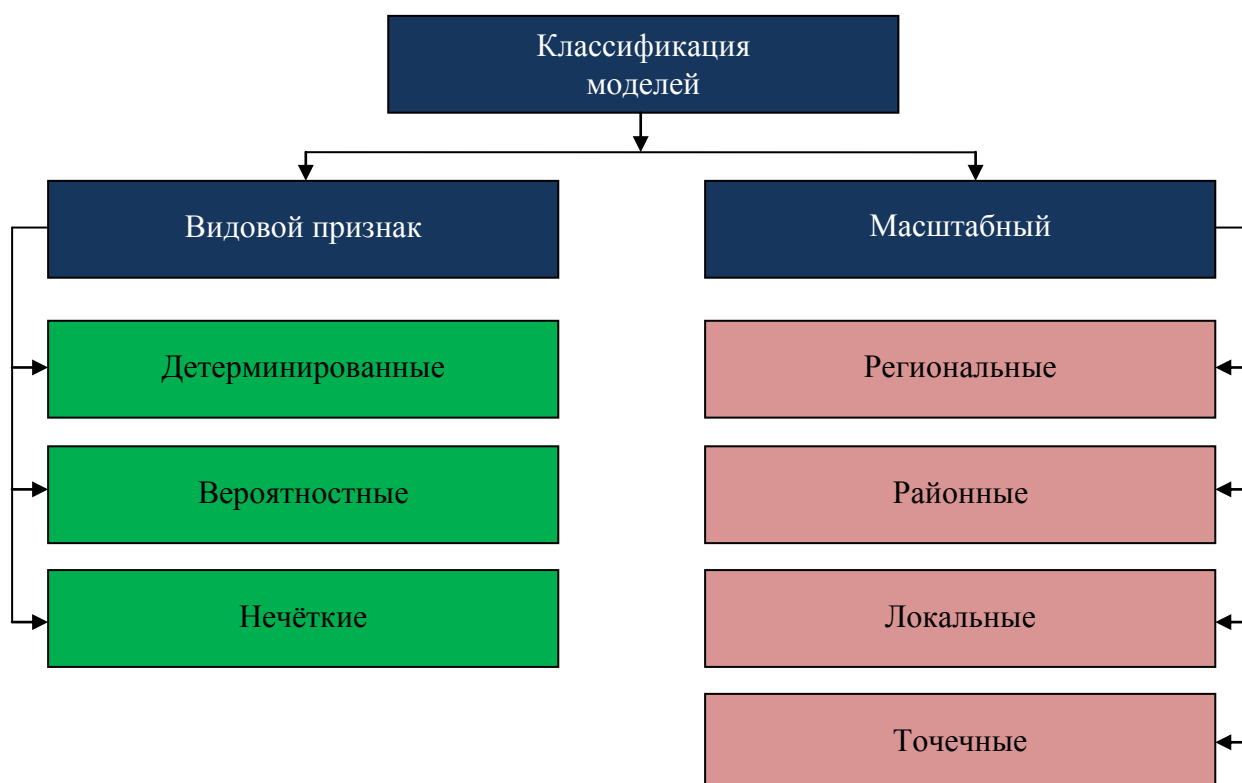


Рис. 1. Классификация математических моделей
для оценки геодинамического риска

Иными словами, базируясь на результатах анализа косвенных признаков геодинамической нестабильности, а именно – на горизонтальных градиентах аномалий гравитационного поля в изостатической редукции, была построена математическая модель геологической среды исследуемой территории. Затем по результатам математического моделирования выполнено восстановление полей тектонических напряжений и смещений в этой среде.

Детерминированные модели базируются на граничных условиях:

$$\begin{cases} \rho g u_z(x, y, h) - \sigma_z(x, y, h) = 0; \\ \sigma_z(x, y, 0) + (\rho_0 - \rho) g u_z(x, y, 0) = \rho h_{\max} P(x, y); \\ \tau_{xz}(x, y, h) = 0; \\ \tau_{xz}(x, y, 0) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где τ_{xz} – касательные напряжения в плоскости XZ;

σ_z – вертикальная составляющая нормальных напряжений;

u_z – вертикальная составляющая полного вектора смещений в геологической среде;

$P(x, y)$ – величина распределённой нагрузки в точке с координатами (x, y) ;

ρ – средняя плотность вещества геологической среды;

ρ_0 – средняя плотность вещества ниже условной модельной границы приложения внешней распределённой нагрузки;

g – ускорение силы тяжести;

h_{\max} – наибольшая величина отклонения модельной нижней границы от нулевого уровня;

h – средняя толщина рассматриваемого модельного упругого пространства.

Компоненты тензора напряжений и составляющие вектора смещений в геологической среде при этом представляются следующим образом [1, 3]:

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

где $\alpha \in \{x, y, z, xy, xz, yz\}$;

$\beta \in \{x, y, z\}$.

Начальные модели, ориентированные на оценку геодинамического риска для достаточно протяжённых территорий (регионального масштаба), были детерминированными. Однако они не всегда корректно "работали" на меньших по площади территориях, показывая различные результаты на платформенных и орогенных территориях [5, 6].

Всё это заставило искать новые модели для оценки геодинамического риска, что в итоге привело авторов к созданию целого их комплекса, классификация которых приведена на рис. 1.

Тип 2 – вероятностные модели.

Суть моделей состоит в следующем [1, 5-7]. Предполагается, что последовательность геодинамических состояний геологической среды некоторой территории представляет собой поток однородных событий, который удовлетворяет условиям независимости, однородности и ординарности, то есть представляет собой простейший поток.

Обозначая через $p_k(t)$ вероятность того, что в течение некоторого промежутка времени реализация геодинамического процесса может соответствовать k состояниям геологической среды, и, учитывая, что эта вероятность не зависит ни от выбора системы отсчета, ни от предыстории геосреды, построены соотношения для определения изменения рассматриваемых состояний, основанные на дифференциальных уравнениях Колмогорова (для трёх состояний):

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

Тип 3 – нечёткие модели. К территориям, значительно неоднородным в тектоническом отношении, применение указанных детерминированных и вероятностных математических моделей для оценки геодинамического риска не всегда оправдано. Поэтому авторами были разработаны модели, основанные на теории нечётких множеств [8].

При формировании базы правил системы нечеткого вывода в качестве входных переменных использовались характеристики геологической среды, полученные как на основании анализа макросейсмических и других данных по землетрясениям, так и информация о напряжениях и смещениях, рассчитанных в ходе применения детерминированных и вероятностных математических моделей. В результате определен набор входных переменных, который затем был подвергнут процедуре "фазификации".

Так, например, функция принадлежности вертикальных смещений в геологической среде u_z (мм/год) была представлена в виде набора кусочно-линейных функций вида:

$$\mu_{T_1}(u_z) = a_i u_z + b_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

а функция принадлежности относительной плотности потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды E_p (Дж/(м³ · год)) – логарифмической зависимостью вида:

$$\mu_{T_2}(E_p) = d + c \lg(E_p). \quad (5)$$

В соотношениях (4) и (5) символами $\mu_{T_1}(u_z)$ и $\mu_{T_2}(E_p)$ обозначены термножества соответствующих лингвистических переменных с коэффициентами $a_i, b_i, c, d \in \mathfrak{R}$.

Учёт масштаба территорий оценки риска

Для территорий значительной протяжённости авторами использовались *региональные модели* вида (1).

В отличие от них, *модели районного масштабного уровня* позволяют достоверно оценивать геодинамическую ситуацию для территорий с площадью не более нескольких десятков км^2 . В качестве входных данных в таких моделях используется информация о топографическом рельефе местности и распределении плотностных неоднородностей на исследуемой территории.

Модельный упругий объём геологической среды при подобном подходе представляет собой параллелепипед, к нижней границе которого приложено внешнее возмущающее воздействие $P(x, y)$, а граница возмущений от плотностных неоднородностей внутри этого слоя представляет собой трёхмерную поверхность, задаваемую функцией вида $W(x, y, z)$ [9]:

$$\begin{cases} \sigma_z(x, y, 0) = P(x, y), & \tau_{xz}(x, y, 0) = 0, \\ \sigma_z(x, y, \chi) = W(x, y, \chi), & \tau_{xz}(x, y, h) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где χ – некоторая фиксированная глубина для каждой точки (x, y) .

Такие модели позволяют более детально исследовать территорию районного масштабного уровня на предмет их устойчивости по отношению к проявлению опасных геодинамических процессов – крип, оползни, провалы, оседания земной поверхности.

Модели локального масштабного уровня предназначены для территорий, на которых располагаются несколько зданий с инженерными коммуникациями, или же небольшие жилые массивы.

Согласно этим моделям, влияние топографических масс местности (возмущения $P(x, y)$) учитывается на нижней поверхности модельного упругого трёхмерного слоя геологической среды, влияние плотностных неоднородностей – путём введения функции $W(x, y, z)$.

На верхнюю часть упругого слоя действует распределенная нагрузка от зданий и сооружений, то есть при $z = h$ $\sigma_z(x, y, h) = F(x, y)$ (σ_z – вертикальные нормальные напряжения в среде), на уровне $z = 0$ – возмущения от топографического рельефа местности, а на глубинах $z = \chi$ – влияние плотностных неоднородностей [9]:

$$\begin{cases} \sigma_z(x, y, h) = F(x, y); \\ \sigma_z(x, y, \chi) = W(x, y, \chi); \\ \sigma_z(x, y, 0) = P(x, y); \\ \tau_{xz}(x, y, 0) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Поскольку численные расчёты по упомянутым математическим моделям чрезвычайно трудоёмки, они были реализованы в виде проблемно-ориентированных компьютерных программ, созданных в среде программирования Borland Delphi 7.0. Остановимся более подробно на них.

Программные средства для оценки геодинамического риска и результаты

Существующие до настоящего времени алгоритмы оценки геодинамического риска были ориентированы исключительно на интерпретацию распределенной нагрузки от какого-либо одного из геофизических полей: аномального гравитационного поля, поля современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК), поля статической нагрузки от зданий и сооружений.

При этом использовались достаточно громоздкие схемы численного решения дифференциальных уравнений, а сама распределенная нагрузка представлялась в виде периодических функций.

Принципиальными отличиями представляемых авторами моделей и алгоритмов оценки геодинамического риска являются следующее:

- используется комплексный набор входных данных по распределенным нагрузкам, действующим на геосреду на различных глубинных уровнях;
- благодаря полученным точным аналитическим выражениям для компонент тензора геодинамических напряжений и составляющих вектора смещений в геосреде, применяется более быстрый, "сквозной" алгоритм расчёта;
- распределённые нагрузки представляются в виде непериодических функций.

Программа *Region* предназначена для численной реализации региональной детерминированной и вероятностной моделей для оценки геодинамического риска.

Для её функционирования необходима информация о:

- внешней вертикальной нагрузке, действующей на геологическую среду и представленной в формате системы GEOGRID;
- скоростях современных вертикальных движений на земной поверхности;
- глубине, на которой расположена условная граница возмущений и расчётная плоскость;
- долготном и широтном профилях.

После расчёта данных об изостатических аномалиях производятся расчёты по каждой компоненте тензора напряжений и составляющей вектора смещений в геосреде.

С помощью программы *Region* выполнены численные оценки геодинамического риска для территории центральной части России (рис. 2), Эквадора (рис. 3) и многих других регионов.

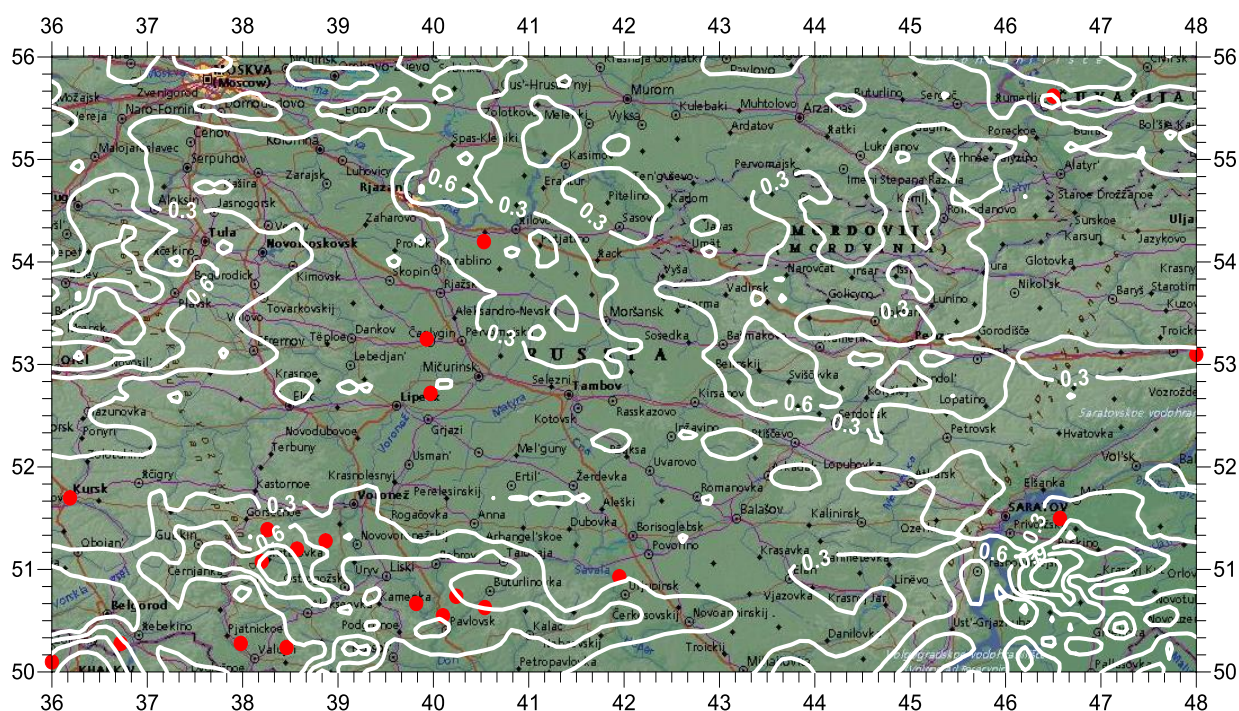


Рис. 2. Эквипотенциальное распределение сдвиговых геодинамических напряжений (сечение изолиний – 0,3 МПа), рассчитанных по региональной модели, с эпицентрами тектонических землетрясений, произошедших за последние 100 лет

На рис. 2, 3 области, оконтуренные изолиниями со значением вероятности 0,5, определены как зоны потенциального риска; 0,7 – зоны умеренного риска; 0,8 – зоны повышенного риска; 0,9 – зоны чрезвычайной опасности.

Эти карты, построенные на основе расчётов показателя геодинамического риска, в данном случае – вероятности возникновения сейсмического события, с нанесёнными на неё эпицентрами землетрясений, наглядно демонстрируют адекватность математических моделей: эпицентры произошедших землетрясений "легли" как раз на те участки территории, которые определены по модели как наиболее опасные в геодинамическом отношении.

Важно отметить, что карты, подобные представленной на рис. 4, отражают не интегральную вероятность сейсмического риска для всего региона в целом, а "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.

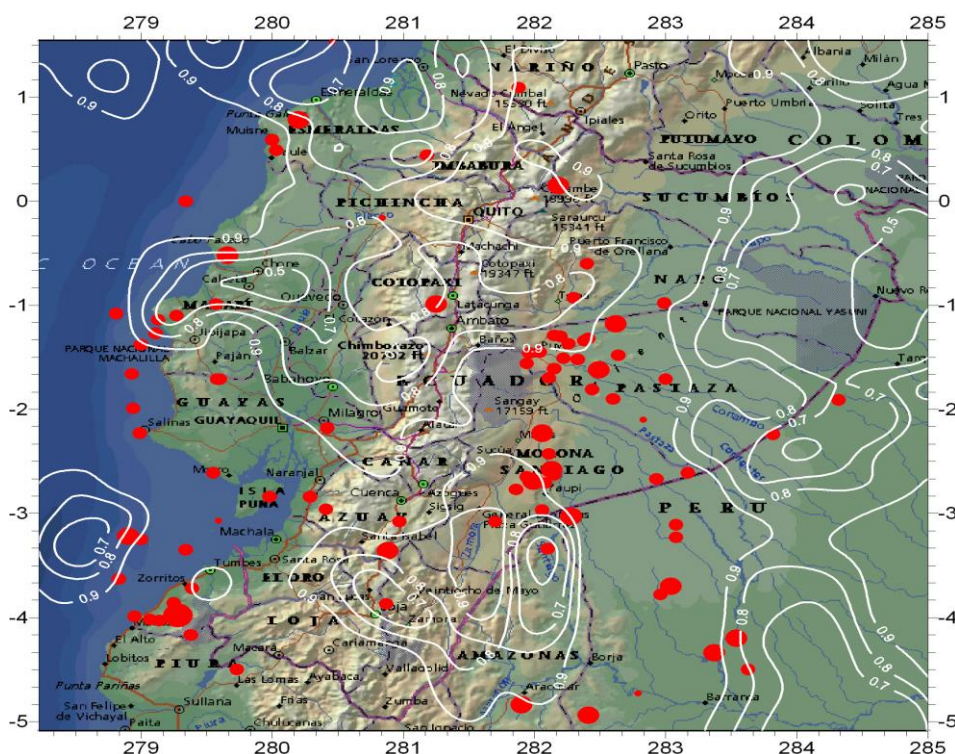


Рис. 3. Карта эквипотенциального распределения вероятностного показателя геодинамического риска для территории Эквадора и прилегающих к нему государств с эпицентрами произошедших за период 1970-2011 гг. землетрясений

Следующая *программа GeoRisk* численно реализует математические модели для оценки геодинамического риска на территориях районного и локального масштабов, а также может быть использована и для отдельных "точечных" объектов.

Программа требует ввода данных по:

- топографическому рельефу местности;
- распределению плотностных неоднородностей;
- данных по распределенной статической нагрузке от зданий и сооружений, если это требуется;
- глубинам залегания границы возмущений и расчётной плоскости;
- длинам долготного и широтного профилей.

Указанная информация также упорядочивается в файлах в формате системы GEOGRID. Интерфейс программы похож на интерфейс программы Region.

Приведём в качестве примера результаты расчётов по предварительной оценке территории, планируемой для проведения на ней градостроительных работ. Карты для исследуемой территории приведены в их сопоставлении с результатами моделирования только с учётом топографии (модель 1), с учётом топографии и плотностных неоднородностей (модель 2), и по комплексной модели (модель 3) (рис. 4-6). Числами на прямоугольниках, схематично обозначающих жилые дома, указана этажность планируемого для постройки здания.

От карты к карте видно, что по мере усложнения моделей меняется не только конфигурация распределения сдвиговых напряжений, но и значительно увеличиваются сами их значения. Это свидетельствует о том, что дополнительный учёт только одних плотностных неоднородностей говорит о том, что геодинамическая обстановка на большей части территории является неустойчивой. Если же мы обратимся к рис. 6, то можно видеть, что в случае застройки этой территории зданиями и сооружениями планируемой этажности можно ожидать негативных последствий, связанных с обрушением зданий.

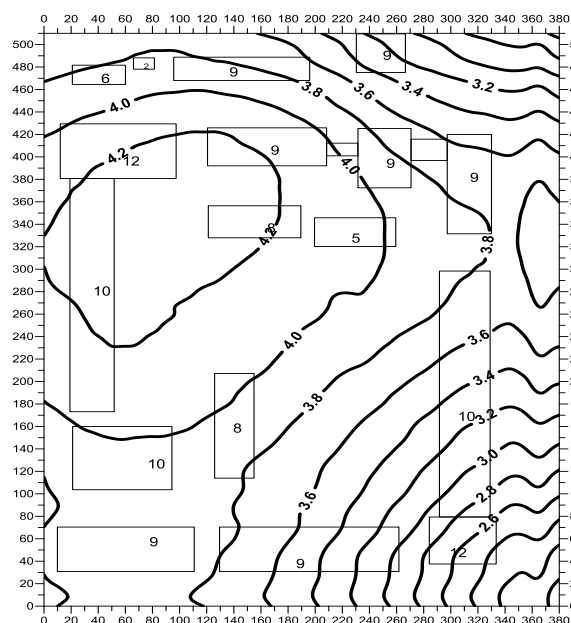


Рис. 4. Сдвиговые напряжения по модели 1

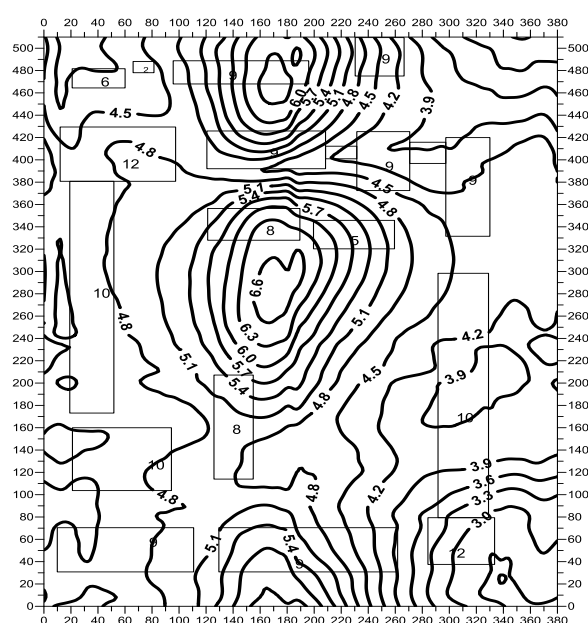


Рис. 5. Сдвиговые напряжения по модели 2

Приведённые модели имеют огромную практическую ценность, поскольку позволяют на основе достоверной оценки геодинамической ситуации для сложных распределённых природно-технических систем локального масштабного уровня значительно оптимизировать процедуру принятия управленческих решений при разработке генерального плана застройки территории.

Программа FuzzyCalc v.1.0 предназначена для реализации нечетких оценок состояния геологической среды различных по своему масштабу территорий. Она требует для своей реализации данных о:

- топографии местности;
- распределении плотности геосреды;
- распределении неоднородностей геологической среды;
- статической нагрузки от зданий и сооружений (при необходимости).

Информация о внешних воздействиях на геологическую среду в программе размещается в файлах формата системы GEOGRID, используются несколько типов нечеткого алгоритма оценок.

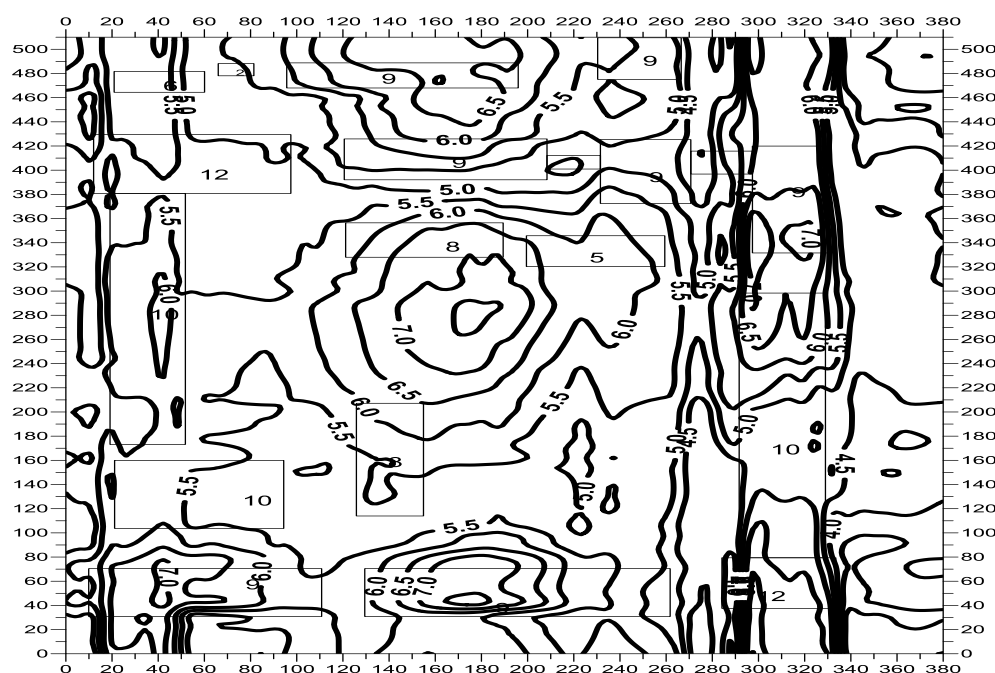


Рис. 6. Сдвиговые напряжения по модели 3

Результаты, полученные с помощью этой программы, проиллюстрируем на примере территории современной Армении [10]. Её, согласно рис. 7, можно охарактеризовать как территорию значительного и высокого риска, что соответствует настоящему геодинамическому состоянию этого региона, оцениваемого как высоко сейсмически активное.

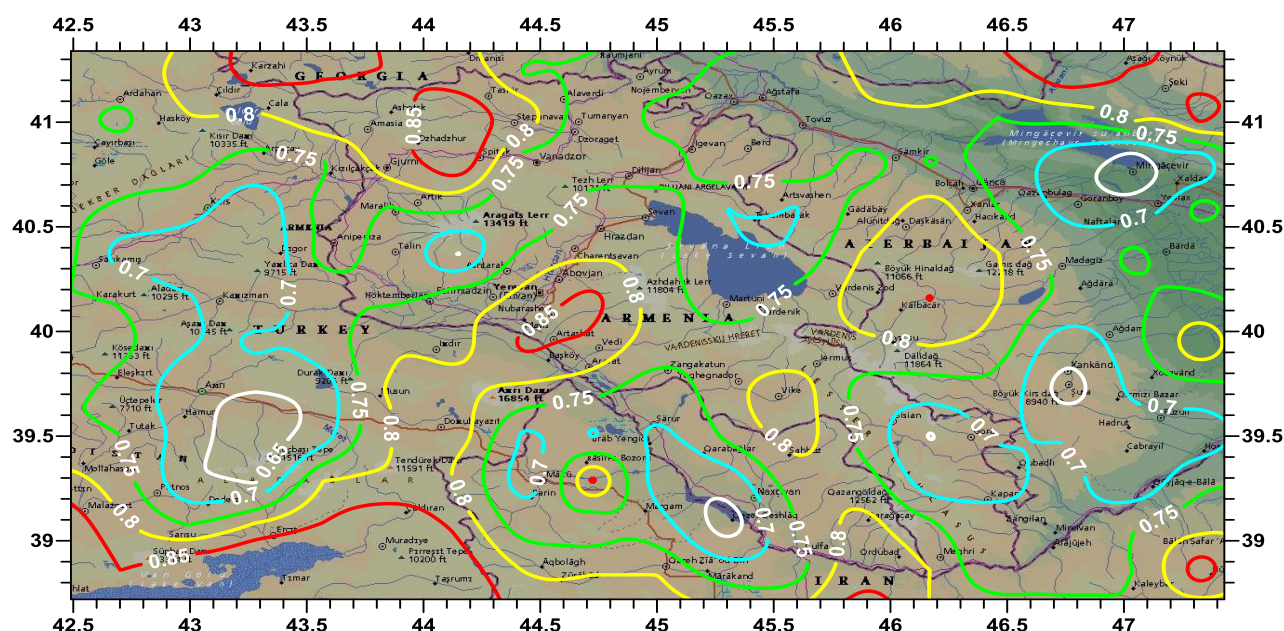


Рис. 7. Эквипотенциальное распределение вероятностного геодинамического риска на территории современной Армении и прилегающих к ней государств.
Сечение изолиний равно 0,05

Представим карту распределения векторов горизонтальных сдвиговых напряжений в геологической среде исследуемой территории, полученную по результатам математического моделирования, выполненного с помощью программы FuzzyCalc v.1.0 (рис. 8).

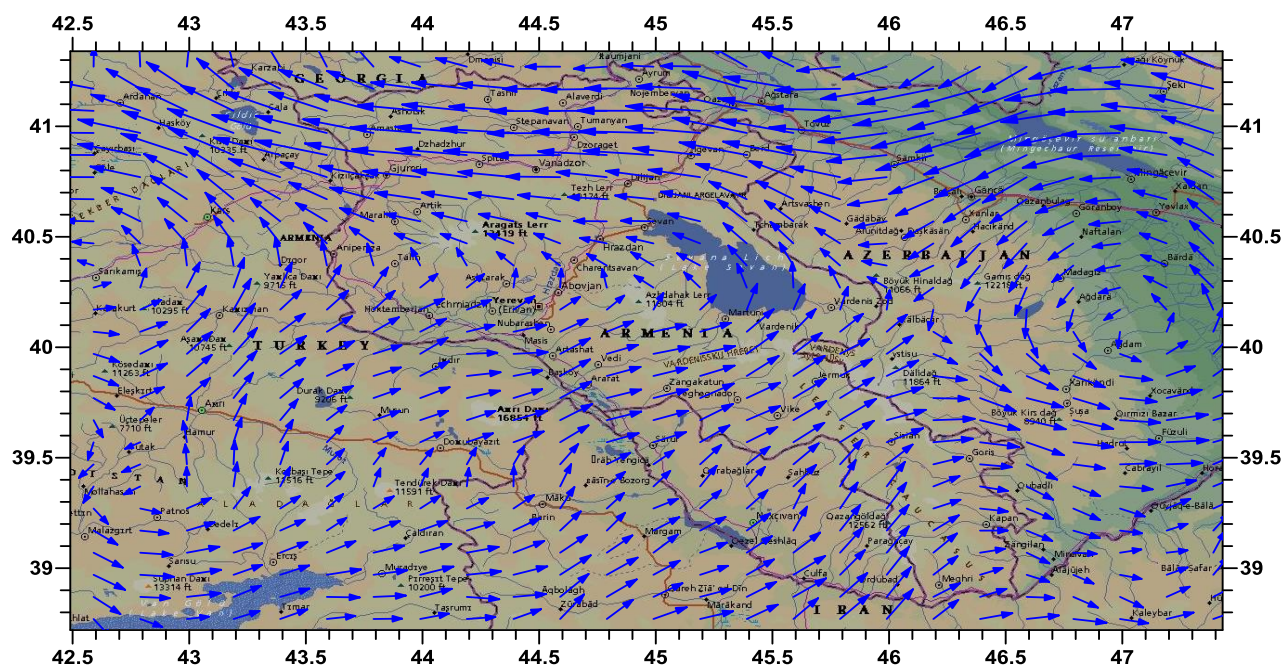


Рис. 8. Векторы горизонтальных сдвиговых напряжений на территории современной Армении и прилегающих к ней государств

Векторы, показанные рис. 8, отображают тенденцию изменения пространственного поля распределения сдвиговых напряжений, что позволяет оценить динамику опасных геологических процессов, происходящих в литосфере. Кроме того, направление векторов также связано с протяженными тектоническими структурами и с информацией о современных горизонтальных движениях, полученных по данным космической геодезии.

Выводы

В заключение отметим, что разработанные авторами математические модели и программные средства их реализации позволяют более оперативно, рационально и менее затратным способом, по сравнению с существующими, выполнять количественную оценку показателей геодинамического риска для самых разнообразных по своему масштабу, составу и геологическому строению территорий и расположенных на них объектов.

Литература

1. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М.: изд. дом "Инфра-М", 2009. 370 с.
2. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** "Медленные" катастрофы, здоровье и безопасность населения // Матер. 15-й науч.-техн. конф. "Системы безопасности – 2006". М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. С. 14-17.
3. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** Математические методы и модели в геоэкологическом районировании рекреационных территорий // Матер. региональной науч.-практ. конф. "Математические методы и информационные технологии в современном обществе". Рязань: Академия права и управления ФСИН России, 2007. С. 111-117.
4. **Минаев В.А., Фаддеев А.О.** Безопасность и отдых: системный взгляд на проблему рисков // Труды II междунар. науч.-практ. конф. "Туризм и рекреация: фундаментальные и прикладные исследования". М.: РИБ "Турист", 2007. С. 329-334.
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.** Моделирование геоэкологических рисков и оценка геоэкологической безопасности на рекреационных территориях // Проблемы управления рисками в техносфере. № 4. Т. 8. 2008. С. 69-76.
7. **Минаев В.А., Фаддеев А.О., Данилов Р.М., Павлова С.А., Абрамова А.В.** Математическое моделирование сейсмических рисков // Спецтехника и связь. 2013. № 5. С. 58-63.
8. **Минаев В.А., Фаддеев А.О., Пылькин А.Н., Бондарь К.М., Кираковский В.В.** Гибридная ANFIS-сеть как инструмент снижения рисков при разработке проектов застройки территории // Матер. 23-й междунар науч.-техн конф "Системы безопасности – 2014". М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. С. 116-121.
9. **Минаев В.А., Фаддеев А.О., Топольский Н.Г., Абрамова А.В., Попов А.Н., Мокшанцев А.В.** Строительство без катастроф // Технологии техносферной безопасности. Вып. 2 (54). 2014. С. 141-149. <http://ipb.mos.ru/ttb/2014-2>.
10. **Абрамова А.В.** Математические модели оценки геодинамического риска на территории Армении // Технологии техносферной безопасности. Вып. 4 (56). 2014. С. 228-235. <http://ipb.mos.ru/ttb/2014-4>.