

На правах рукописи



ПАВЛОВА Светлана Анатольевна

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ
ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СРЕДЫ
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Специальность 05.13.10 – управление в социальных и экономических системах

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (РГРТУ),
ФКОУ ВПО «Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний»

Научный руководитель: **Фаддеев Александр Олегович**,
доктор технических наук, профессор
Рязанского государственного университета
имени С.А. Есенина

Научный консультант **Корячко Вячеслав Петрович**,
доктор технических наук,
профессор Рязанского государственного
радиотехнического университета,
Заслуженный деятель науки и техники РФ

Официальные
оппоненты: **Прус Юрий Витальевич**,
доктор физико-математических наук, профессор
Академии государственной противопожарной
службы МЧС России, г. Москва

Ананьев Михаил Петрович,
кандидат технических наук, доцент,
начальник отделения ФГУП Государственного
космического научно-производственного центра
имени М.В. Хруничева, г. Москва

Ведущая организация: Филиал ФГУП ГНПРКЦ ЦСКБ «Прогресс»
Особое конструкторское бюро «Спектр», г. Рязань

Защита состоится **18 июня 2014 года в 12 ч.** на заседании
диссертационного совета Д212.211.02 в ФГБОУ ВПО «Рязанский
государственный радиотехнический университет» по адресу:
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Рязанский
государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2014 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.211.02
канд. техн. наук, доцент

Перепелкин Д. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Большое место в жизни современного человечества занимают проблемы, связанные с преодолением последствий различных негативных явлений. Эти негативные явления имеют во многом объективную природу, связанную, в частности, с увеличением количества и сложности технических систем, увеличением мощности их компонент на промышленных объектах, увеличением концентрации сложных технических систем, как на объектном, так и на территориальном уровнях.

В связи с этим защита населения и территорий от природных и техногенных аварий и катастроф, снижение риска воздействия негативных факторов является одной из важнейших задач обеспечения безопасности России.

Поскольку события последних лет наглядно свидетельствуют нам о лавинообразном увеличении количества аварий и катастроф, выходящих за рамки понимания с точки зрения общепринятых инженерных, строительных, геофизических норм и правил, оценка геодинамической устойчивости среды сложных распределенных природно-технических систем в настоящее время является злободневной и актуальной проблемой.

Эта проблема является системной по своей сути и стратегической по характеру. Ее разрешение возможно только на основе корректного научно-методического аппарата и системного методологического подхода, базирующегося на математических моделях, позволяющих с одной стороны, эффективно использовать имеющийся эмпирический материал, а с другой – обладать возможностью гибкой перенастройки на любой объект исследования, принадлежащий к классу распределенных природно-технических систем.

В рамках данной проблемы настоящая диссертация посвящена решению актуальной научной задачи – разработке новых математических моделей оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем, реализованных в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для обеспечения безопасности населения и территорий от возможных проявлений опасных геодинамических процессов.

Объектом исследования является распределенная природно-техническая система, подвергающаяся воздействию опасных процессов геодинамического происхождения.

Предмет исследования составляют математические модели оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем.

Цель диссертационного исследования состоит в обосновании, разработке и исследовании новых математических моделей оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем, подвергающихся воздействию опасных геодинамических процессов.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить следующие **задачи**:

- Разработать комплекс новых математических моделей и компьютерных программ оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем, подвергающихся воздействию опасных геодинамических процессов.
- Разработать алгоритм количественного учета рассеяния сейсмической энергии при оценке геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем и на основе проведения вычислительного эксперимента выполнить проверку этого алгоритма.
- Разработать модель управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций природно-техногенного характера с учетом геодинамических факторов.
- Выполнить количественную оценку геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем различной масштабности с построением оценочно-прогностических карт эквипотенциального распределения показателей геодинамической устойчивости.
- Выполнить проверку адекватности математических моделей оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем и эффективности вычислительного алгоритма реализации этих моделей.

Методы исследований. При построении математических моделей оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем были применены методы механики сплошных сред, методы теории дифференциальных уравнений, метод спектрального Фурье-анализа.

При обработке входных, промежуточных и выходных данных применялись численные методы спектрального анализа на основе дискретного преобразования Фурье, численный метод интерполяции бикубическим сплайном, методы построения сеточных функций, в частности, метод Крайгинга, а также метод спектрально-временного анализа данных.

Программное обеспечение для реализации поставленных в работе цели и задач разработано в программной среде Delphi XE Professional, работа с базами данных осуществлялась в среде MS Excel и MS Access, графическая интерпретация полученных результатов была реализована с помощью программного комплекса Surfer v.10.

При выполнении исследований автор опирался на теоретические результаты отечественных и зарубежных ученых: в области теории математического моделирования, численных методов и их прикладного применения при исследовании естественнонаучных объектов – В.В. Власова, В.И. Кейлис-Борока, А.И. Лурье, А. Лява, Н.И. Мухелишвили, А.А. Самарского, И.Н. Снеддона; в области теории динамики опасных геодинамических процессов – Е.В. Артюшкова, В.М. Кутепова, В.А. Магницкого, В.И. Осипова, Н.Н. Радаева, Г.А. Соболева; в области теории анализа рисков чрезвычайных ситуаций в природной,

техногенной и антропогенной сферах – В.А. Акимова, В.А. Минаева, В.Ф. Протасова, А.Л. Рагозина, Н.Г. Топольского, А.О. Фаддеева и многих других.

Реализация построенных моделей осуществлялась на основании данных о характеристиках окружающей среды, полученных с помощью геологического и геофизического методов исследования, а также с помощью метода геоморфоструктурного районирования территории.

Научная новизна. При исследовании проблемы обеспечения безопасности распределенных природно-технических систем с учетом природно-техногенных факторов геодинамического происхождения и оценки геодинамической устойчивости среды этих систем впервые:

- Теоретически обоснованы и разработаны новые математические модели оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем, подвергающихся воздействию опасных геодинамических процессов и модель управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций природно-техногенного характера с учетом геодинамических факторов.
- Разработан алгоритм количественного учета рассеяния сейсмической энергии при оценке геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем, и на основе проведения вычислительного эксперимента выполнена проверка адекватности этого алгоритма.
- Выполнена количественная оценка геодинамической устойчивости и построены оценочно-прогностические карты эквипотенциального распределения показателей геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем различной масштабности, располагающихся на территориях России (Центральный Федеральный округ), Турции, Ирана, Эквадора и территориях прилегающих к ним государств.
- Выполнена проверка адекватности математических моделей оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем и эффективности вычислительного алгоритма реализации этих моделей.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы для:

- уточнения оценки качества земельных ресурсов с точки зрения интенсивности полей геофизического и геотехногенного происхождения;
- оценки природно-техногенной устойчивости ландшафтов, выявления потенциально сейсмоактивных участков, зон распространения обвалов, оползней и т.п.;
- оценки, анализа и оптимизации размещения систем и сетей инженерных и транспортных коммуникаций;
- геофизической и геоэкологической экспертизы государственных и коммерческих хозяйственных программ;

- разработки государственных и муниципальных программ и планов развития территорий различного масштабного уровня и целевого назначения;
- информационной поддержки государственных и муниципальных органов управления при принятии решений в области хозяйственной и изыскательской деятельности;
- информационной поддержки оценки безопасности среды обитания, в том числе антитеррористической безопасности;
- создания компьютерного атласа регионального масштаба, включающего в себя информацию по геофизическим полям, полям напряжений, смещений, деформаций, оценочно-прогностические карты эквипотенциального распределения показателей геодинамической устойчивости среды и вероятностного прогноза развития геодинамической ситуации.

Реализация результатов диссертации. Полученные в ходе исследований по данному направлению результаты использованы: в РГРТУ - НИИ «Фотон» - для формирования электронных каталогов данных дистанционного зондирования Земли и проектирования геоинформационных систем оперативного мониторинга опасных природных явлений; в деятельности ОАО «Российские космические системы» г. Москва. Результаты исследований внедрены в практику учебного процесса Академии Государственной противопожарной службы МЧС России г. Москва.

Акты о внедрении результатов работы представлены в диссертации.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Комплекс математических моделей и компьютерных программ оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем различного масштабного уровня.
- Алгоритм количественного учета рассеяния сейсмической энергии при оценке геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем.
- Результаты исследований по оценке геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических системах различного масштабного уровня в виде оценочно-прогностических карт их районирования по значениям показателей геодинамической устойчивости.

Достоверность результатов диссертационного исследования определяется комплексным характером, согласованностью результатов теоретических исследований, численного моделирования и интерпретации наблюдаемых данных между собой, их воспроизводимостью, сопоставимостью полученных практических результатов с теоретическими оценками и экспериментальными результатами, приведенными в работах других авторов. Адекватность созданных математических моделей подтверждена тестовыми расчетами и сопоставлением полученных результатов с распределениями произошедших опасных

геодинамических событий в различных регионах России и ряда других государств.

Тематика диссертации соответствует п.1 и п. 5 специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и п. 11 специальности 05.13.10 – «Управление в социальных и экономических системах».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 2 международных и 5 всероссийских научно-технических конференциях: XIV международной научной конференции «Цивилизация знаний» (Москва, 2013г.), XXXIX международной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2013 г.), XXII научно-технической конференции «Системы безопасности» (Москва, 2013 г. – 2 доклада), XV; XVI; XVIII всероссийских научно-технических конференциях "Новые информационные технологии в научных исследованиях" (Рязань, 2010, 2011, 2013- 3 доклада).

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликованы 14 работ: 1 монография, 4 статьи в изданиях ВАК, 8 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях, 1 свидетельство на регистрацию программы.

Структура и объем диссертационного исследования. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Основной текст работы содержит 198 страниц, 28 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 12 страниц и включает 164 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулировку цели и задач работы, основные положения, выносимые на защиту, и определяет содержание и методы выполнения работы. Также показана научная новизна и практическая значимость основных результатов проведенных исследований.

В первой главе «Проблемы оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем» показано, что одним из специфических и весьма значимых видов риска в распределенных природно-технических системах (РПТС) являются опасности, тесно связанные с проявлением процессов геодинамического происхождения, таких как землетрясения, карстово-деформационные процессы, криповые явления, оползни, провалы, проседания (так называемые «медленные» катастрофы), влияющие на технологическое состояние геосреды, сооружения, сети коммуникаций, психические и медико-биологические показатели населения.

Отмечено, что решение задачи обеспечения безопасности населения и территорий от опасных природных, техногенных и антропогенных процессов и комплексной оценки связанного с ними геодинамического риска с позиций

системного подхода следует рассматривать на уровне распределенных природно-технических систем.

Проанализированы существующие на сегодняшний день методы оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем и выявлены недостатки, которыми они обладают.

Показана необходимость разработки более совершенных математических моделей оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем.

Во второй главе «Математические модели оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем» рассмотрен комплекс математических моделей оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем различного масштабного уровня и математических моделей оценки риска чрезвычайных ситуаций геодинамического характера.

Предложена новая универсальная математическая модель оценки геодинамической устойчивости среды распределенной природно-технической системы на основе решения пространственной задачи нахождения напряжений и смещений в геосреде при воздействии на геосреду вертикальных возмущений и проведена проверка этой модели на устойчивость решения. Универсальность предложенной модели заключается в том, что ее можно использовать как для орогенных областей, так и для платформенных территорий.

Предложена принципиально новая трехмерная модель количественной оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем, в которой объединены учет влияния возмущений в геосреде, определяемым по косвенным признакам, в нашем случае – по аномальному гравитационному полю (вертикальная составляющая возмущений) и современным движениям земной коры, основанным на данных повторных геодезических измерений, в частности, по данным космической геодезии (горизонтальная составляющая).

При аналитическом построении данной трехмерной модели были получены в общем виде соотношения для компонент тензора напряжений и составляющих вектора смещений в геосреде:

$$\sigma_x^k(x, y, z) = p_k \left\{ \left[kk_x^2(\beta + \delta z) + \gamma \left(k_x^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right] shkz + \left[kk_x^2(\alpha + \gamma z) + \delta \left(k_x^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right] chkz \right\} \times \\ \times \cos(k_x x) \cos(k_y y),$$

$$\sigma_y^k(x, y, z) = p_k \left\{ \left[kk_y^2(\beta + \Delta_0 z) + \gamma \left(k_y^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right] shkz + \left[kk_y^2(\alpha + \gamma z) + \Delta_0 \left(k_y^2 + \frac{\lambda k^2}{\lambda + \mu} \right) \right] chkz \right\} \times \\ \times \cos(k_x x) \cos(k_y y),$$

$$\sigma_z^k(x, y, z) = p_k k^2 \left\{ \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} \gamma - k(\beta + \delta z) \right] shkz + \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} \delta - k(\alpha + \gamma z) \right] chkz \right\} \cos(k_x x) \cos(k_y y),$$

$$\begin{aligned}
\tau_{xz}^k(x, y, z) &= p_k k k_x \left\{ \left[k(\alpha + \gamma z) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \delta \right] shkz + \left[k(\beta + \delta z) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \gamma \right] chkz \right\} \sin(k_x x) \cos(k_y y), \\
\tau_{yz}^k(x, y, z) &= p_k k k_y \left\{ \left[k(\alpha + \gamma z) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \delta \right] shkz + \left[k(\beta + \delta z) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \gamma \right] chkz \right\} \cos(k_x x) \sin(k_y y), \\
\tau_{xz}^k(x, y, z) &= -p_k k_x k_y \left\{ [k(\beta + \delta z) + \gamma] shkz + [k(\alpha + \gamma z) + \delta] chkz \right\} \sin(k_x x) \sin(k_y y), \\
u_x^k(x, y, z) &= \frac{p_k k_x}{2\mu} \left\{ [k(\beta + \delta z) + \gamma] shkz + [k(\alpha + \gamma z) + \delta] chkz \right\} \sin(k_x x) \cos(k_y y), \\
u_y^k(x, y, z) &= \frac{p_k k_y}{2\mu} \left\{ [k(\beta + \delta z) + \gamma] shkz + [k(\alpha + \gamma z) + \delta] chkz \right\} \cos(k_x x) \sin(k_y y), \\
u_z^k(x, y, z) &= \frac{p_k k}{2\mu} \left\{ \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} \delta - k(\alpha + \gamma z) \right] shkz + \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} \gamma - k(\beta + \delta z) \right] chkz \right\} \cos(k_x x) \cos(k_y y). \quad (1)
\end{aligned}$$

При построении данной модели использована система граничных условий:

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

где λ, μ – постоянные (коэффициенты) Ламе; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, – составляющие нормальных напряжений; $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – составляющие сдвиговых напряжений;

u_x, u_y, u_z – вертикальная составляющая полного вектора смещений в геосреде;

$P(x, y)$ – величина распределенной нагрузки в точке с координатами (x, y) ; $k_x = \frac{\pi n}{L_x}$;

$k_y = \frac{\pi n}{L_y}$; $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ L_x, L_y – длины расчетных профилей, n – порядковый номер

гармоники; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коэффициенты, определяемые из граничных условий;

$V(x, y)$ – модули векторов горизонтальных смещений; h – средняя толщина рассматриваемого модельного упругого пространства; z – глубина залегания расчетной плоскости; p_k – k -ая гармоника возмущающего воздействия на среду РПТС.

В граничных условиях полагается, что к нижней поверхности упругого слоя приложена вертикальная распределенная нагрузка (первое уравнение системы (2)), а сдвиговые напряжения в вертикальных профилях на верхней и нижней поверхностях слоя равны нулю (третье и четвертое уравнения системы (2)). Но, поскольку на верхней поверхности слоя имеются смещения, интерпретируемые как горизонтальная распределенная нагрузка на упругий слой, то необходимо отличие от нуля сдвиговых напряжений в горизонтальной плоскости на верхней поверхности модели, и не просто их отличие от нуля, а соответствие им горизонтальной распределенной нагрузки (второе уравнение системы (2)).

Подставив в систему (2) выражения для соответствующих компонент тензора напряжений (1), получим систему соотношений для отыскания неизвестных коэффициентов α , β , γ , δ , входящих в уравнения (1):

$$\delta = \frac{\frac{P_k}{k^2} \left(khchkh - \frac{\mu}{\lambda + \mu} - khcthkh \right) - \frac{\mu V_k kh}{k_x k_y}}{- (shkh + khchkh) \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu} + khcthkh \right) + (kh)^2 shkh + \frac{(\lambda + 2\mu) khchkh}{\lambda + \mu}},$$

$$\gamma = \frac{P_k}{k^3 hshkh} - \delta \frac{shkh + khchkh}{khshkh}, \quad \beta = -\frac{\lambda}{k(\lambda + \mu)} \gamma, \quad \alpha = \frac{\mu}{k(\lambda + \mu)} \delta - \frac{P_k}{k^3}. \quad (3)$$

После подстановки найденных коэффициентов в выражения для компонент тензора напряжений и составляющих вектора смещений в геосреде (1) получим расчетные соотношения для модели.

Таким образом, вертикально-горизонтальная региональная модель, при задании соответствующих граничных условий и при учете максвелловской реологии среды, позволяет адекватно выполнять оценку геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем.

Также показано, что поскольку в настоящей работе распределенная нагрузка определяется на основе данных аномального гравитационного поля, то это исходное поле необходимо преобразовать таким образом, чтобы в каждой расчетной точке численно учитывались значения этого поля применительно к выбранной модели.

Установлено, что наиболее распространенным способом преобразования поля является его трансформация, сводящаяся к фильтрации наблюдаемого поля с целью выделения полезной информации и подавления помех. В данной работе для проведения практических трансформаций использовались тригонометрические полиномы, т.е. отрезки рядов Фурье.

Рассмотрена вероятностная модель оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем.

Предложена разломно-узловая тектоническая модель участка территории РПТС, которая учитывает геологические неоднородности среды. Учет влияния таких неоднородностей, как тектонические разломные нарушения, является очень важным и существенным при оценке геодинамической устойчивости среды РПТС, так как не всегда аномалии гравитационного поля соответствуют простиранию тектонических разломных нарушений.

Участок РПТС представлен в виде системы четырех узлов и соединяющих их друг с другом тектонических разломных нарушений геосреды (рис. 1).

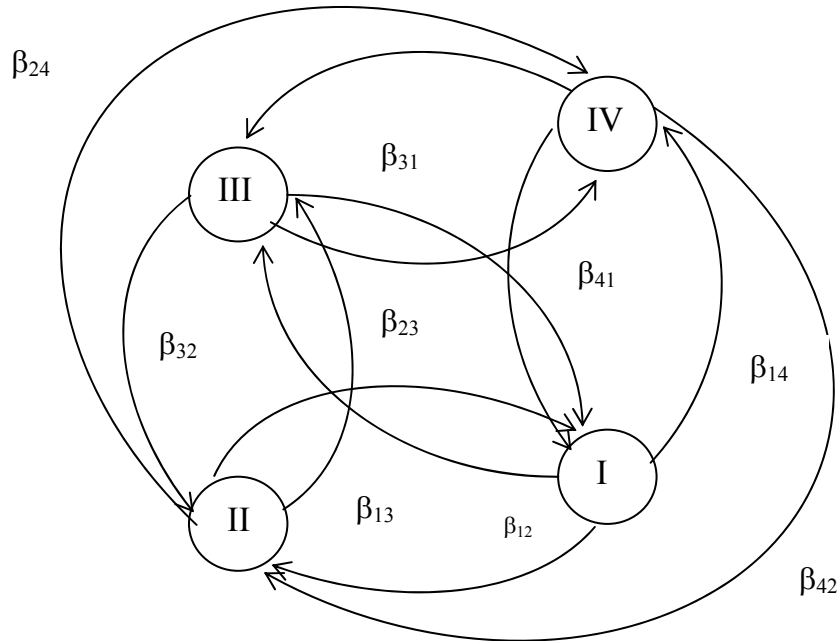


Рис. 1. Разломно-узловая тектоническая модель участка территории распределенной природно-технической системы

Согласно модельным построениям, на первом этапе необходимо оценить вероятность события A – передачи сейсмодеоформационной энергии из узла I:

$$P(A) = \frac{\alpha_{13}\alpha_{32}}{\alpha_{32}\alpha_{13} + \alpha_{23}(\alpha_{31} + \alpha_{13})}. \quad (4)$$

На этом этапе необходима оценка коэффициентов интенсивности процессов α_{ij} . Коэффициенты α_{ij} при этом должны быть пронормированы, а их значения определяются на основании комплексной оценки следующих величин:

$$\alpha_{13} = E_{\rho}; \quad \alpha_{31} = E_{\rho} - D_{E\rho}; \quad \alpha_{32} = E_{\rho} + \dot{u}_r + \dot{u}_z; \quad \alpha_{23} = E_{\rho} + \dot{u}_r + \dot{u}_z - S_E,$$

где $D_{E\rho}$ – величина рассеяния потенциальной энергии E_{ρ} деформируемых пород геосреды; S_E – величина сброшенной энергии при землетрясениях; $\dot{u}_r = \frac{2\mu u_r^2}{3}$,

$\dot{u}_z = \frac{2\mu u_z^2}{3}$ – соответственно обобщенные (переведенные в энергетические единицы) значения горизонтальных u_r и вертикальных u_z смещений в геологической среде.

Для оценки величины $D_{E\rho}$ необходимо знать значения модуля сдвига μ и вязкости среды η для конкретного рассматриваемого объема этой геосреды. Для оценки величины S_E необходима информация о произошедших сейсмических событиях в пределах данного объема геосреды (магнитуды, глубины залегания очага).

На следующем этапе выполняется оценка вероятности события B – возможности передачи сейсмодеоформационной энергии из области I в смежные с ней области, например, в области II, III, IV.

Предположив, что для каждой из указанных областей известны вероятности передачи энергии, которые определяются как:

$$P^{(k)}(A) = \frac{\alpha_{13}^{(k)} \alpha_{32}^{(k)}}{\alpha_{32}^{(k)} \alpha_{13}^{(k)} + \alpha_{23}^{(k)} (\alpha_{31}^{(k)} + \alpha_{13}^{(k)})}, \quad k = 1, \dots, 4 \quad (5)$$

Взаимодействия для данных областей описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} p_1'(t) = \beta_{31}p_3(t) + \beta_{21}p_2(t) + \beta_{41}p_4(t) - (\beta_{13} + \beta_{12} + \beta_{14})p_1(t), \\ p_2'(t) = \beta_{12}p_1(t) + \beta_{32}p_3(t) + \beta_{42}p_4(t) - (\beta_{21} + \beta_{23} + \beta_{24})p_2(t), \\ p_3'(t) = \beta_{13}p_1(t) + \beta_{23}p_2(t) + \beta_{43}p_4(t) - (\beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{34})p_3(t), \\ p_4'(t) = \beta_{14}p_1(t) + \beta_{24}p_2(t) + \beta_{34}p_3(t) - (\beta_{41} + \beta_{42} + \beta_{43})p_4(t), \\ p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) = 1. \end{cases} \quad (6)$$

Обозначая через $\gamma_1 = \beta_{13} + \beta_{12} + \beta_{14}$; $\gamma_2 = \beta_{21} + \beta_{23} + \beta_{24}$; $\gamma_3 = \beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{34}$; $\gamma_4 = \beta_{41} + \beta_{42} + \beta_{43}$, и отбрасывая одно из уравнений системы (6), придем к системе алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} -\gamma_1 p_1 + \beta_{21} p_2 + \beta_{31} p_3 + \beta_{41} p_4 = 0, \\ \beta_{12} p_1 - \gamma_2 p_2 + \beta_{32} p_3 + \beta_{42} p_4 = 0, \\ \beta_{13} p_1 + \beta_{23} p_2 - \gamma_3 p_3 + \beta_{43} p_4 = 0, \\ p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Разрешая эту систему относительно неизвестных вероятностей, получим:

$$p_1 = \frac{\varepsilon_1 \delta_{22} - \delta_{12} \varepsilon_2}{\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12} \delta_{21}}; \quad p_2 = \frac{\varepsilon_2}{\delta_{22}} - \frac{\delta_{21}}{\delta_{22}} \cdot \frac{\varepsilon_1 \delta_{22} - \delta_{12} \varepsilon_2}{\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12} \delta_{21}};$$

$$p_3 = \frac{\beta_{43}}{\gamma_3 + \beta_{43}} - \frac{\beta_{43} - \beta_{13}}{\gamma_3 + \beta_{43}} \cdot \frac{\varepsilon_1 \delta_{22} - \delta_{12} \varepsilon_2}{\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12} \delta_{21}} - \frac{\beta_{43} - \beta_{23}}{(\gamma_3 + \beta_{43}) \delta_{22}} \left(\varepsilon_2 - \delta_{21} \cdot \frac{\varepsilon_1 \delta_{22} - \delta_{12} \varepsilon_2}{\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12} \delta_{21}} \right);$$

$$p_4 = 1 - \frac{\varepsilon_2}{\delta_{22}} - \frac{\beta_{43}}{\gamma_3 + \beta_{43}} - \frac{\varepsilon_1 \delta_{22} - \delta_{12} \varepsilon_2}{\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12} \delta_{21}} \left(1 - \frac{\delta_{21}}{\delta_{22}} - \frac{\beta_{43} - \beta_{13}}{\gamma_3 + \beta_{43}} \right) + \frac{\beta_{43} - \beta_{23}}{(\gamma_3 + \beta_{43}) \delta_{22}} \times \\ \times \left(\varepsilon_2 - \delta_{21} \cdot \frac{\varepsilon_1 \delta_{22} - \delta_{12} \varepsilon_2}{\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12} \delta_{21}} \right);$$

$$\text{где } \delta_{11} = \gamma_1 + \beta_{41} - \frac{(\beta_{41} - \beta_{31})(\beta_{43} - \beta_{13})}{\gamma_3 + \beta_{43}}; \quad \delta_{12} = \beta_{41} - \beta_{21} - \frac{(\beta_{41} - \beta_{31})(\beta_{43} - \beta_{23})}{\gamma_3 + \beta_{43}};$$

$$\delta_{21} = \beta_{42} - \beta_{12} - \frac{(\beta_{42} - \beta_{32})(\beta_{43} - \beta_{13})}{\gamma_3 + \beta_{43}}; \quad \delta_{22} = \gamma_2 + \beta_{42} - \frac{(\beta_{42} - \beta_{32})(\beta_{43} - \beta_{23})}{\gamma_3 + \beta_{43}};$$

$$\varepsilon_1 = \beta_{41} - \frac{(\beta_{41} - \beta_{31})\beta_{43}}{\gamma_3 + \beta_{43}}; \quad \varepsilon_2 = \beta_{42} - \frac{(\beta_{42} - \beta_{32})\beta_{43}}{\gamma_3 + \beta_{43}}.$$

Коэффициенты β_{ij} представляют собой вероятность передачи сейсмодиформационной энергии из области i в область j , т.е. величины,

рассчитываемые по соотношению (5). Описанная схема позволяет установить вероятностную траекторию движения сейсмодинамической энергии (её миграции) в геосреде вдоль тектонических разломных нарушений.

В третьей главе «Результаты оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем» рассмотрены особенности применения метода спектрального анализа на основе дискретного преобразования Фурье при решении задачи оценки геодинамической устойчивости среды РПТС. Также представлена методика применения численного метода интерполяции данных бикубическим сплайном при подготовке и использовании входных геофизических данных, посредством которых оптимизируются авторские математические модели.

Рассмотрены и проанализированы полученные результаты математического моделирования геодинамической устойчивости среды различных РПТС. Все расчеты проводились с помощью рассмотренных ранее численных методов по авторским алгоритмам, реализованных в виде комплекса компьютерных программ, написанных на языке программирования высокого уровня Borland Delphi XE Professional, графическая интерпретация полученных результатов была реализована с помощью программного комплекса Surfer v.10.

Апробация математической модели с учетом вертикальных возмущений производилась для части территории Турции, в пределах которой предполагается строительство АЭС «Аккую» (г. Гюльнар), т.е. для распределенной природно-технической системы с опасным в техногенном отношении объектом (рис. 2) и для территории Эквадора (рис. 3).

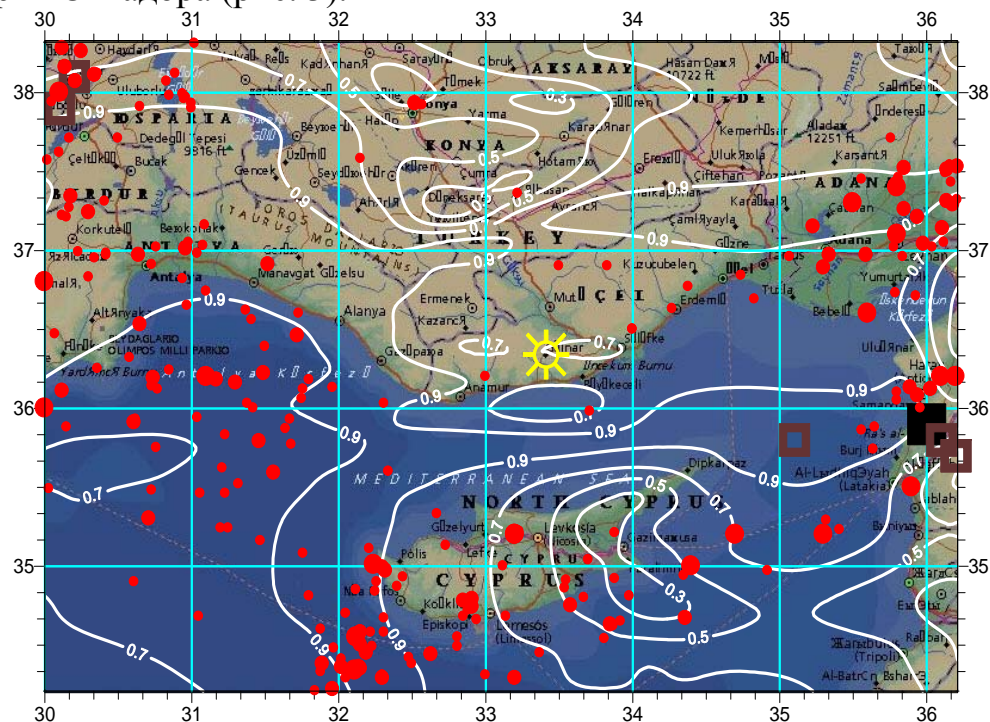


Рис. 2. Карта-схема эквипотенциального распределения вероятностного геодинамического риска для региона предполагаемого размещения АЭС «Аккую»

Области геодинамического риска оконтурены изолиниями в диапазоне от 0.1 до 0.9 с шагом значений 0.2. Кружками красного цвета обозначены эпицентры

уже произошедших за период времени с 528 г. по май 2010 г. в этом регионе землетрясений с магнитудами от 4 до 7 (всего 232 сейсмических события). Незакрашенными квадратами указаны эпицентры пяти исторических высокоэнергетических землетрясений, произошедших 13.12.115 (координаты 35.°8 с.ш., 35.°1 в.д., магнитуда $M = 7.5$); 13.02.1404 (35.°7 с.ш., 36.°2 в.д., $M = 7.0$); 30.12.1408 (35.°8 с.ш., 36.°1 в.д., $M = 7.5$); 04.05.1875 (38.°1 с.ш., 30.°2 в.д., $M = 7.3$); 03.10.1914 (37.°9 с.ш., 30.°1 в.д., $M = 7.1$). Черным закрашенным квадратом обозначен эпицентр катастрофического землетрясения 08.04.859 (35.°9 с.ш., 36.°0 в.д., $M = 8.0$).

Распределение землетрясений выполнено на основе выборок сейсмологических данных, полученных из таких официальных источников, как: региональные каталоги «Землетрясения в Северной Евразии, 1992 – 2000 гг.»; «Землетрясения в Турции, 1913 – 1970 гг.»; Землетрясения Средиземноморья и окружающей территории, 1901 – 1975 гг.»; «Оперативный сейсмологический каталог Геофизической службы РАН, Обнинск», а также ряда специализированных баз данных, в частности, глобальной базы данных о гипоцентрах землетрясений за период времени с 2100 г. до н.э. по 1992 г. н.э.

Как видно на рис. 2, пространственное распределение вероятностного геодинамического риска достаточно значимо согласуется с распределением выделившейся сейсмической энергии в рассматриваемом регионе, что свидетельствует об адекватности математической модели, использованной для количественной оценки указанного риска.

Важно отметить, что карты, подобные представленной на рис. 2, отражают не интегральную вероятность сейсмического риска для всего региона в целом, а именно «точечно-площадную» вероятность проявления сейсмических событий.

На рис. 3 представлена карта эквипотенциального распределения величин сдвиговых геодинамических напряжений (в условных единицах). Расчетные данные указывают на значительную концентрацию сдвиговых напряжений, а значит, и относительной плотности потенциальной энергии деформируемых пород геосреды в центральной части и на севере Эквадора, особенно в районе столицы – города Кито. Также повышенные значения относительной плотности энергии и сдвиговых геодинамических напряжений по данным моделирования можно отметить для прибрежных районов Эквадора.

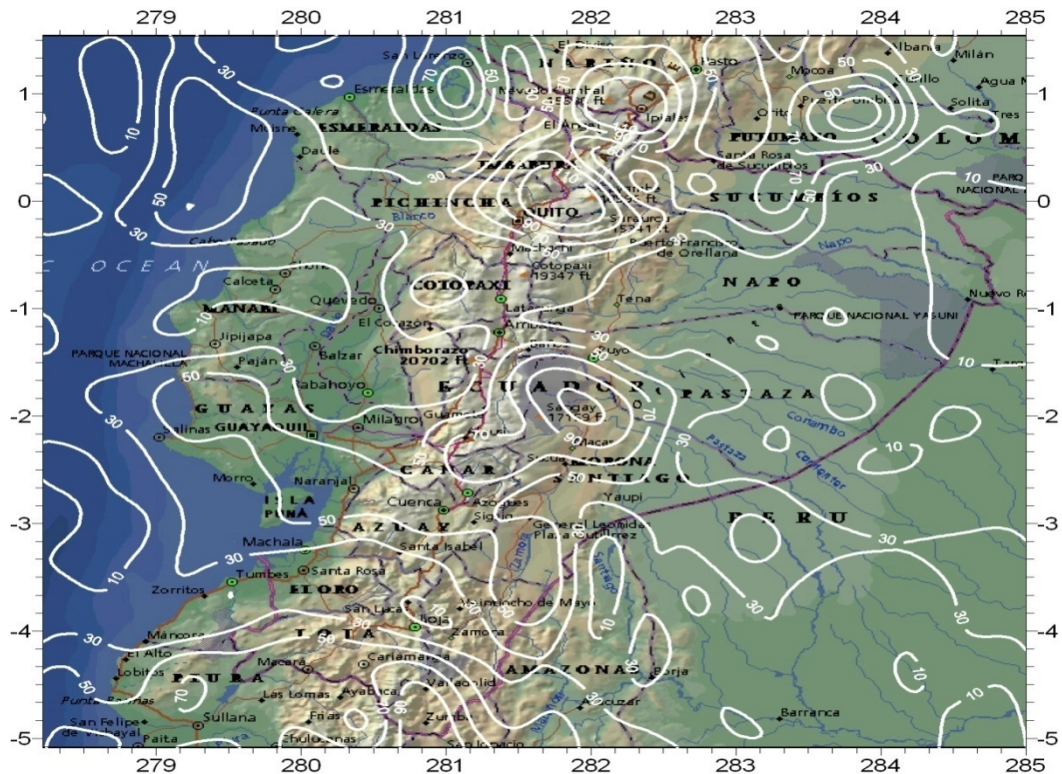


Рис. 3. Карта эквипотенциального распределения величин сдвиговых геодинамических напряжений (в условных единицах) для территории Эквадора и прилегающих к нему государств

Вертикально-горизонтальная региональная математическая модель была практически реализована для распределенной природно-технической системы, включающей в себя часть территории Турции, Ирана, Ирака, Сирии, Азербайджана, Грузии, Армении, Украины, России.

Проверка обобщенной вероятностной модели оценки геодинамического риска была выполнена для обеих указанных выше РПТС.

Приведенные результаты практической реализации предложенных и построенных математических моделей оценки геодинамической устойчивости среды РПТС наглядно демонстрируют адекватность этих моделей реальным состояниям геосреды исследованных территорий.

Предложена модель управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Одним из ключевых моментов реализации данной модели при определении риска возникновения чрезвычайных ситуаций геодинамического характера в РПТС является использование разработанных автором математических моделей оценки геодинамической устойчивости среды этих систем, что может быть востребовано при принятии обоснованных управленческих решений в оборонной сфере, в МЧС, различных силовых ведомствах и структурах, а также в практике градостроительства.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Рассмотрены и проанализированы существующие математические методы оценки геодинамических опасностей и на этой основе разработан новый подход к количественной оценке геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем, основанный на совместном анализе аномалий гравитационного поля и данных космической геодезии.

2. Теоретически обоснованы и разработаны новые математические модели оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем, подвергающихся воздействию опасных геодинамических процессов.

3. Построены алгоритмы численного решения уравнений для моделей оценки геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем и осуществлена их практическая реализация в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента с помощью ЭВМ.

4. Выполнена оценка адекватности математических моделей (в среднем 0.9) и эффективности вычислительного алгоритма реализации этих моделей (0.99).

5. Разработан алгоритм количественного учета рассеяния сейсмической энергии при оценке геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем и на основе проведения вычислительного эксперимента выполнена проверка данного алгоритма. Проверка показала целесообразность использования этого алгоритма в прогностических целях.

6. Выполнена количественная оценка геодинамической устойчивости и построены оценочно-прогностические карты эквипотенциального распределения показателей геодинамической устойчивости среды распределенных природно-технических систем различной масштабности, располагающихся на территориях России (часть территории Центрального Федерального округа), Турции, Ирана, Эквадора и территориях прилегающих к ним государств.

7. Разработана модель управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций природно-техногенного характера с учетом геодинамических факторов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Статьи в изданиях по списку ВАК**

1. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Абрамова А.В., Павлова С.А. Обобщенная вероятностная модель для оценки геодинамической устойчивости территорий // Технологии техносферной безопасности. Интернет-журнал. 2013. Вып. 5 (51). С. 12.
2. 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.
3. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Павлова С.А., Абрамова А.В. Обобщенная вероятностная модель оценки геодинамической устойчивости среды территориальных природно-технических систем // Вестник Российского Нового университета. 2013. №4. С. 12 - 18.
4. Минаев В.А., Фаддеев А.О., Абрамова А.В., Павлова С.А. Комплексная математическая модель оценки сейсмических рисков // Вестник Российского Нового университета. 2013. №4. С. 19 - 24.

Статьи в межвузовских сборниках

5. Фаддеев А.О., Минаев В.А., Резько А.П., Смоляков А.П., Абрамова А.В., Павлова С.А. Моделирование динамической устойчивости геологических структур // Информатизация образования и науки. 2013. С. 113 – 119.
6. Павлова С.А. Комплексная математическая модель оценки геодинамической устойчивости геосреды. // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. 2013. С. 86 – 91.
7. Минаев В.А., Павлова С.А., Фаддеев А.О. Оценка сейсмических рисков на основе комплексной математической модели // Вестник СПбУ ГПС МЧС России, 2014, №1, С. 59-66.

Тезисы докладов на международных и всероссийских конференциях

8. Павлова С.А. Организация рабочих мест с помощью терминальных технологий. // Тез. докл. XV всерос. науч.-технич. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании». Рязань: РГРТУ. 2010, С. 60-66.
9. Павлова С.А. Современные информационные технологии в управлении сложными процессами: проблемы и перспективы. // Тез. докл. XVI всерос.

науч.-технич. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании». Рязань: РГРТУ. 2011. С. 41 – 43.

10. Фаддеев А.О., Минаев В.А., Абрамова А.В., Павлова С.А. Комплексная математическая модель для оценки сейсмических рисков // Тез. докл. мат. XXII научн.-техн. конф. «Системы безопасности – 2013». М.: Академия ГПС МЧС РФ. 2013. С. 17 – 19.

11. Фаддеев А.О., Минаев В.А., Павлова С.А. Обобщение моделей геодинамического риска.// Тез. докл. междунар. конф. «Цивилизация знаний – XIV». М.: РосНОУ. 2013. С. 56 – 60.

12. Фаддеев А.О., Минаев В.А., Павлова С.А. Космос и прогнозирование сейсмических рисков.// Тез. докл. междунар. конф. XXXIX Гагаринские чтения. М.: МАТИ_РГТУ. 2013. С. 37 – 43.

13. Фаддеев А.О., Павлова С.А. Математические модели оценки сейсмических рисков. // Тез. докл XVIII всерос. науч.-технич. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань: РГРТУ. 2013. С. 317 – 320.

Павлова Светлана Анатольевна

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ
ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СРЕДЫ
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.