

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ НА БАЗЕ МОДЕЛЕЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ РИСКОВ

Минаев В.А.¹, Мокшанцев А.В.^{2,3}, Овсяник А.И.^{2,3}, Фаддеев А.О.⁴

¹Московский университет МВД России имени В.Я. Кикотя

²Финансовый университет при Правительстве РФ

³Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

⁴Рязанский филиал Московского университета МВД России имени В.Я. Кикотя

Аннотация

В статье рассматривается проблема обеспечения безопасности экономических проектов, реализуемых в природно-технических системах. Приводится краткий анализ существующих технологий оценки рисков, возникающих в них вследствие реализации опасных природных и техногенных процессов геодинамической обусловленности. Подробно рассматривается инновационная технология компьютерного геодинамического моделирования (КГДМ), направленная на решение задач обеспечения безопасности экономических проектов. Рассмотрен и проанализирован комплекс математических моделей, лежащих в основе технологии компьютерного геодинамического моделирования. Обсуждаются результаты применения данной технологии в конкретных реализованных проектах. На основании результатов моделирования в рамках рассматриваемой технологии выполнены численные оценки смещений и термоупругих деформаций в поверхностных слоях земной коры как для всей южной Якутии, так и для окрестностей Якутска, а также прогнозная карта предварительной разведки месторождений углеводородов. Сделан вывод, что представленная технология даёт возможность осуществлять мониторинг зданий, инженерных сооружений и их грунтовых оснований, в том числе – в условиях криолитозоны, обосновывать условия безопасного строительства как отдельных объектов, так и их комплексов, а также управлять процедурой строительства на различных по своему масштабу территориях, проводить предварительную разведку месторождений углеводородов.

Ключевые слова

Безопасность, экономический проект, геодинамический риск, инновационная технология, моделирование, месторождения углеводородов, предварительная разведка.

Введение

Обеспечение безопасности экономического проекта является неотъемлемой составляющей частью управления им [1, 2, 5, 10, 11, 13, 15, 16]. На системном уровне целью любого экономического проекта является улучшение экономических показателей функционирования какой-либо сложной системы, в том числе – природно-технической системы (ПТС), под которой понимается *целенаправленное единство взаимодействующих инженерно-технических объектов с геологической средой, находящейся под влиянием хозяйственной деятельности человека* [1, 10].

Проблемы обеспечения безопасности и оценки рисков как для самих ПТС, так и для разрабатываемых и реализуемых для них экономических проектов особенно актуальны в последние годы, которые стали особенно «урожайными» именно на природно-техногенные катастрофы и аварии. Участились проявления таких катастрофических по своим последствиям

процессов, как землетрясения, оползни, проседания и подобные им явления, называемые геодинамическими опасностями. Да и социально-экономические потери становятся все более и более ощутимыми [1, 5, 10, 11, 13, 15, 16].

Существующие на сегодняшний день технологии оценки рисков, возникающих при проявлении геодинамических опасностей, не позволяют в полной мере решать задачи по обеспечению безопасности ПТС и реализуемых в них экономических проектов. Поэтому необходима разработка современных инновационных технологий оценки геодинамических рисков, формирующихся в ПТС, требующихся для решения задач обеспечения их безопасности [1, 10].

Вопросам разработки указанных технологий посвящена настоящая статья.

Технологии обеспечения безопасности экономических проектов

Технология обеспечения безопасности экономических проектов должна:

- 1) обладать возможностью гибкой настройки на любой объект как в масштабном, так и в функциональном смыслах;
- 2) учитывать вероятностный характер развития опасной природно-техногенной ситуации;
- 3) характеризоваться достаточной эффективностью, позволяющей оперативно решать поставленные задачи;
- 4) быть экономичной и быстро окупаемой.

Разумеется, это – далеко не полный перечень требований, предъявляемых к подобным технологиям, однако в статье ограничимся минимумом, представленным выше.

Рассмотрим существующие технологии оценки рисков, формирующихся в ПТС вследствие протекания в них опасных природно-техногенных процессов геодинамической обусловленности.

В основе одной из таких технологий лежит метод трёхмерного гидрогеологического моделирования. Она реализована при исследованиях Терско-Кумского артезианского бассейна [11], что позволило получить многовариантную картину для различных схем извлечения подземных вод. Однако использование для оценок и последующего прогноза состояния геологической среды ПТС трёхмерной детерминированной модели не представляется достаточно обоснованным. Более уместно применение стохастического или, по крайней мере, вероятностно-детерминированного аналога. Причем он может быть применен к исследованию территории ПТС к тем ее зонам, для которых имеется достоверная сеть данных.

В практике оценок и количественных прогнозов геодинамических рисков получила распространение технология, базирующаяся на методе аналогий [13]. Она позволяет получить достаточно адекватное отражение реальной картины в отношении опасных природно-техногенных процессов геологической обусловленности, но только тех, которые описаны длительными временными рядами данных. Поэтому метод аналогий практически применим только к хорошо изученным в геодинамическом смысле единичным территориальным объектам.

Технология, использующая метод геологического анализа, достаточно хорошо зарекомендовала себя при проведении геологического районирования территории [15]. Однако её использование возможно только в том случае, если имеется надёжная информация как о геологии, так и о тектонике исследуемого региона. При этом обязательным элементом проведения оценочных работ является ретроспективный анализ тектонических процессов, некогда имевших место на данной территории.

Более эффективной является технология, основанная на методе морфоструктурного районирования. Она основана на представлении о блоковой структуре земной коры, согласно которому относительно однородные пространства – блоки ограничены узкими подвижными зонами [7]. Эта технология в свое время разработана для решения задачи прогнозирования мест сильных землетрясений в горных странах и позднее модифицирована применительно к платформенным территориям. Её использование даёт возможность учесть нарушаемость территорий по морфоструктурным параметрам. Однако она адекватна только при наличии базы, содержащей длительные временные ряды данных относительно территории ПТС.

Технология районирования территории ПТС по интенсивности проявления опасных геодинамических процессов основана на расчётах количественных показателей интенсивности проявления опасного геодинамического процесса, в качестве которых принимается поражённость им территории ПТС, оцениваемая площадными или линейными коэффициентами [15]. Но её применение также напрямую зависит от рядов наблюдательных данных.

Технология районирования территории ПТС по величине геодинамического потенциала основана на одноимённом методе, разработана ещё в 70-е годы прошлого столетия и успешно использовалась для выявления и картирования оползнеопасных участков в различных инженерно-геологических условиях [13, 15]. Эта технология базируется на использовании материалов инженерно-геологических съёмок, картографирования (геологического, гидрогеологического, инженерно-геологического, климатического, топографического и других) и ряда специальных исследований. Всё это свидетельствует об определенной громоздкости и малой экономичности технологии.

Резюмируя вышесказанное, отметим, что ни одна из рассмотренных и применяемых сегодня технологий не удовлетворяет требованиям, приведённым выше, которые должны быть присущи перспективной технологии обеспечения безопасности экономических проектов для природно-технических систем.

Тем не менее, как показали наши исследования, такие технологии могут быть созданы. И в качестве основной «движущей силы» при этом необходимо применять методы математического и имитационного компьютерного моделирования. О такой технологии будем далее вести речь в статье.

Технология компьютерного геодинамического моделирования

Изложим суть технологии компьютерного геодинамического моделирования (КГДМ), особенности её использования при решении задач обеспечения безопасности применительно к экономическим проектам для ПТС, а также обсудим полученные с её помощью результаты.

Принципиально КГДМ основана на комплексе геодинамических моделей, дающих возможность вычислять по всей глубине земной коры показатели напряжений, деформаций и смещений, возникающих в результате миграции эндогенно-деформационной энергии в литосфере Земли [1, 10].

На выполнение каких задач ориентирована эта технология, какие проблемные ситуации, возникающие в природно-технических системах, она позволяет решать?

1. В первую очередь, это, конечно, выявления потенциально сейсмоактивных участков, зон распространения криповых подвижек, обвалов, оползней, проседаний, цунами и оценки их последствий в интересах решения стратегических задач для военно-оборонного, промышленного комплексов и гражданских объектов.

2. Далее, оценка пространственно-динамических характеристик опасных эндогенных геологических процессов и построения траектории миграции их энергии при решении уже обозначенных задач стратегического назначения.

3. Обеспечение качества, результативности и оперативности, с одновременным уменьшением стоимости работ по поиску и разведке месторождений полезных ископаемых, что будет способствовать повышению эффективности изучения методами космической разведки глубоких горизонтов верхних слоёв земной коры и, как следствие, улучшению воспроизводства минерально-сырьевой базы Российской Федерации.

4. Выполнение количественных оценок последствий воздействия вторичных геодинамических факторов – мощного электрического поля и акустических полей инфразвукового диапазона – на оборудование и персонал объектов военно-оборонного и промышленного комплексов, гражданских объектов.

5. Количественное обоснование управленческих решений в области гражданского и военного строительства, а также размещения особо важных, стратегически значимых объектов

(АЭС, космодромы, аэродромы-аэропорты, взлетно-посадочные полосы, терминалы, плавучие и подводные доки, транспортные артерии и инфокоммуникационные сети и т.п.).

Рассмотрим кратко комплекс математических моделей, лежащих в основе технологии КГДМ.

Математические модели оценки геодинамического риска

Прежде, чем переходить к описанию математических моделей, составляющих основу метода КГДМ, кратко остановимся на вопросах, связанных с особенностями их использования при решении задач по обеспечению безопасности экономических проектов, реализуемых для природно-технических систем.

Поскольку геологическая среда ПТС представляет собой некоторый объём самого разнообразного масштабного уровня – от локального до транс регионального, который может иметь различную как глубинную, так и латеральную протяжённость, математические модели также должны быть объёмными (трёхмерными). И вот тут-то и кроется первая сложность.

Для эффективного использования трёхмерной математической модели, необходимо иметь достаточно адекватное представление о том объёме геологической среды, для которого она строится. А сложность обуславливается следующими основными причинами [1].

1. Обеспечение модели информацией о реальных характеристиках геологической среды, как правило, производится в условиях неопределённости, т.е. истинное состояние среды изначально неизвестно.

2. В трёхмерной модели необходимо учитывать взаимовлияние всех «точек» друг на друга. В подобной постановке данная задача практически не решается.

Резюмируя сказанное, отметим, что использование трёхмерной детерминированной модели для оценок и последующего прогноза состояния геологической среды не представляется возможным. Возможен только стохастический или вероятностно-детерминированный вариант ее применения.

Именно по этому пути пошли авторы, сочетая не только детерминированные и вероятностные модели, но и модели, основанные на теории нечётких множеств (рисунок 1) [1].

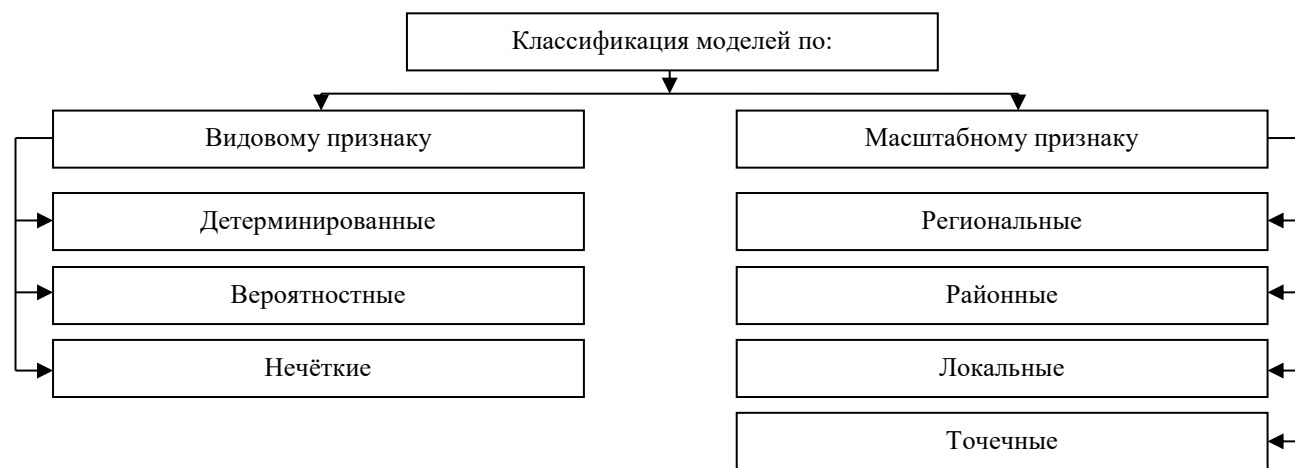


Рисунок 1 – Классификация математических моделей оценки геодинамического риска

Исходной информацией для детерминированных моделей являются косвенные признаки геодинамической неустойчивости, например, такие как горизонтальные градиенты аномалий гравитационного поля в изостатической редукции, горизонтальные градиенты скоростей современных вертикальных движений на поверхности Земли (СВДЗК), полученные по данным повторных нивелировок градиентов новейших (неотектонических) движений [6, 7, 21, 22].

Поскольку распределенная нагрузка в таких моделях определяется на основе данных какого-либо аномального геофизического поля, то его необходимо преобразовать таким образом, чтобы к каждой расчётной точке численно учитывать значения этого поля применительно к выбранной модели.

Наиболее распространенным способом преобразования поля является его трансформация с целью выделения полезной информации и подавления помех. Для проведения практических трансформаций являются тригонометрические полиномы, т.е. отрезки рядов Фурье [9, 20].

В технологии КГДМ используются трёхмерные модели, являющиеся достаточно эффективными, поскольку позволяют охватывать не отдельные слои, а целые блоки земной коры. Трёхмерные модели, в основном, содержат граничные условия следующего вида [1, 10]:

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

где τ_{xz} – сдвиговые напряжения в плоскости XZ ; σ_z – вертикальная составляющая нормальных напряжений; u_z – вертикальная составляющая полного вектора смещений в геологической среде; $P(x, y)$ – величина распределенной нагрузки в точке с координатами (x, y) ; ρ – средняя плотность вещества геологической среды; ρ_0 – средняя плотность вещества ниже условной модельной границы приложения внешней распределенной нагрузки; g – ускорение силы тяжести; $h_{\max}$ – наибольшая величина отклонения модельной нижней границы от нулевого уровня; h – средняя толщина рассматриваемого модельного упругого пространства.

Трёхмерные модели с граничными условиями (1) используются исключительно при оценках сейсмического риска для территорий регионального масштаба и практически не применяются для оценок сейсмического или геодинамического рисков на небольших по площади территориях. Это обусловлено значительной разреженностью на таких малых по площади территориях значений различных геофизических полей. Поэтому авторами разработаны вероятностные математические модели, нивелирующие недостатки детерминированных моделей. Основным принципом при построении вероятностных моделей является предположение о том, что последовательность геодинамических состояний геологической среды исследуемой территории представляет собой поток однородных событий, удовлетворяющий условиям независимости, однородности и ординарности, т.е. представляет собой простейший поток [1, 10].

Обозначая через $p_k(t)$ вероятность того, что в течение некоторого промежутка времени длительности t к процессу реализации различных геодинамических состояний геологической среды будут предъявлены k требований (различных геодинамических процессов), можно построить соотношения для определения изменения вероятностей $p_k(t)$, основанные на дифференциальные уравнения Колмогорова (например, для трёх состояний) [1, 10]:

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

Величины α_{ij} (где $i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, 3$), входящие в соотношения системы уравнений (2), физически представляют собой сумму энергетических параметров процессов, протекающих в геологической среде, окончание которых приводит к непосредственному переходу этой среды из состояния i в состояние j (рисунок 2).

В то же время, вероятностные модели имеют свои недостатки. Их использование на значительно неоднородных в геологическом и тектоническом отношении территориях не всегда позволяет адекватно выполнить оценки геодинамического риска. Это же относится и к территориям, где имеется существенная неопределённость в отношении информации о физико-механических характеристиках геологической среды или распределённых геофизических полях-источниках геодинамических аномалий. Всё это послужило основанием в пользу разработки моделей, основанных на теории нечётких множеств [12, 14, 17–19, 24].

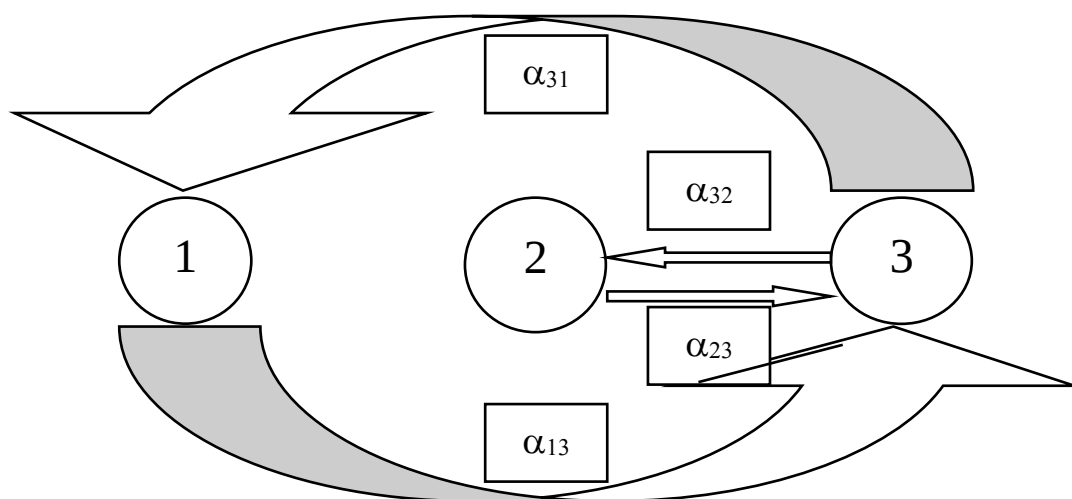


Рисунок 2 – Схема переходов геологической среды между состояниями

В [1, 10] и ряде других работ авторами использовались модели нечёткой оценки состояния геологической среды, основанные на прямом нечётком выводе и алгоритме Мамдани, а также модели, использующие алгоритм Сугено.

Сконструированные таким образом модели позволяют на основе анализа топографического рельефа местности и экспертных оценках физических характеристик геологической среды заблаговременно, до начала проведения строительных работ, выполнить превентивные оценки геодинамической устойчивости геологической среды в виде значений геодинамического риска, что дает возможность произвести предварительную оценку проекта планировочных решений по застройке той или иной территории.

Помимо рассмотренных моделей, отметим последние разработки, не только органично дополнившие комплекс моделей, составляющих основу технологии КГДМ, но и позволившие выйти на качественно новый уровень решения задач, связанных с обеспечением безопасности экономических проектов, реализуемых в ПТС.

Так, одна из них, так называемая «термическая» модель, позволила значительно повысить точность и адекватность оценок величин, напряжений, смещений и деформаций, формирующихся в верхних слоях земной коры, что является весьма существенным при проведении проектных разработок в природно-технических системах.

В настоящее время широкий размах приобрели региональные исследования теплового потока и поиски связей термических параметров с различными геолого-геофизическими структурами, в особенности – с тектоническими [4, 23]. Зависимость между тепловым потоком и вертикальными движениями земной коры рассматривалась рядом исследователей [4, 18, 21], которые указывали, что одной из причин возникновения землетрясений могут являться термоупругие напряжения, формирующиеся в земной коре в результате изменений температуры земных недр во времени и пространстве.

Для решения задачи термоупругости в перемещениях нами применялись следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} \mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \vec{u} + \vec{F} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \text{grad}(T - T_0) - \rho \ddot{\vec{u}} = 0, \\ \nabla^2 T + \frac{w_0}{\lambda_q} - \frac{1}{a} \dot{T} - \frac{(3\lambda + 2\mu) \alpha_T T_0}{\lambda_q} \text{div } \dot{\vec{u}} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где u – смещения в геологической среде; F – объёмные силы; λ, μ – коэффициенты Ламе; w_0 – плотность теплового потока; λ_q – коэффициент теплопроводности; T – температура геологической среды; T_0 – температура геологической среды в недеформированном состоянии; α_T – средний коэффициент линейного теплового расширения в интервале температур (T_0, T) ;

$a = \frac{\lambda_q}{c_\varepsilon}$ – коэффициент температуропроводности; ρ – плотность геологической среды;

$$\begin{cases} \sigma_z(x, y, h) + \rho(x, y, 0) \cdot g \cdot u_z(x, y, h) = 0, \\ \tau_{xz}(x, y, h) = 0, \\ \sigma_z(x, y, 0) = \rho_{cp}(x, y) \cdot \Delta g(x, y) \cdot H(x, y), \\ \tau_{xz}(x, y, 0) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где σ_z – вертикальные нормальные напряжения; τ_{xz} – сдвиговые напряжения в вертикальной плоскости XZ (граничные условия для вертикальной плоскости YZ аналогичны плоскости XZ); u_z – вертикальная компонента вектора смещений в геологической среде; ρ – плотность геологической среды на верхней поверхности модели геологической среды (дневная поверхность Земли) в точке с координатами $(x, y, 0)$; g – ускорение свободного падения, принимаемое за постоянную величину как в латеральном отношении, так и по всей глубине рассматриваемого упругого объёма геологической среды; $\rho_{cp}(x, y)$ – средняя плотность геологической среды, вычисляемая как осреднённое значение плотности по её объёму этой среды; $\Delta g(x, y)$ – величина аномалии гравитационного поля в изостатической редукции в точке с координатами (x, y) ; $H(x, y)$ (в м) – толщина (глубина) слоя геологической среды в точке с координатами (x, y) ; точки с координатами $(x, y, 0)$ соответствуют нижней границе объёма геологической среды (границе Мохоровичича – границе Мохо); точки с координатами (x, y, h) соответствуют верхней границе геологической среды (дневной поверхности Земли); h – параметр, соответствующий верхней поверхности модели.

Найденные с помощью систем (3) и (4) решения позволили количественно оценить напряжения и смещения, формирующиеся в упругой геологической среде вследствие влияния на неё возмущений, связанных с комплексным воздействием на эту среду тектонических и термических процессов [4, 23].

Другая модель позволила осуществить принципиально новый, дистанционный подход к предварительной разведке месторождений углеводородов, своеобразный «взгляд изнутри» на верхние слои земной коры, являющийся наименее дорогостоящим из всех существующих методов, на порядок отличаясь от традиционных схем – полевых и аналитических, и ориентированный как на слабо освоенные территории, каковой является, например, Арктическая зона, так и на недоразведанные части Земли.

Согласно этой модели, для выявления нефтегазоносного участка необходимо вначале количественно оценить величину конкретного геодинамического индикатора, а именно – скорости горизонтальных сдвиговых деформаций. Но для выполнения подобных оценок вначале необходимо рассчитать величины нормальных, сдвиговых напряжений, вертикальных и горизонтальных смещений в геологической среде. Всё это и позволяет выполнить рассматриваемая модель.

Граничные условия этой модели представляются системой уравнений:

$$\begin{cases} \tau_{xy}(x, y, h) = \mu(x, y, h)\varepsilon_{xy}(x, y, h), \\ \sigma_z(x, y, 0) + \delta\rho u_z(x, y, 0) = \rho_s(x, y)\Delta g_n(x, y)H(x, y), \\ \tau_{xz}(x, y, h) = 0, \\ \tau_{xz}(x, y, 0) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где σ_z – вертикальные нормальные напряжения; τ_{xy} – сдвиговые горизонтальные напряжения в плоскости XY ; ε_{xy} – сдвиговые горизонтальные деформации в плоскости XY ; τ_{xz} – сдвиговые вертикальные напряжения в плоскости XZ (в плоскости YZ условия для вертикальных сдвиговых напряжений аналогичны для плоскости XZ); u_z – вертикальные смещения в геологической среде; $\delta\rho$ – скачок плотности на границе раздела земная кора – литосферная мантия (на границе Мохо); ρ – значение плотности на соответствующей глубине и в точке с координатами (x, y) ; Δg – значение аномалии гравитационного поля в точке с координатами (x, y) ; $H(x, y)$ – глубина залегания границы Мохо; g – ускорение свободного падения, которое принимается постоянным для любой точки (x, y, z) модельного пространства; h – толщина модельного пространства, $\rho_s(x, y)$ – плотность геологической среды в точке с координатами (x, y) , вычисляемая из соотношения $\rho_s(x, y) = \int_0^H \rho(x, y, z) dz$.

Выражения для компонент тензора напряжений и составляющих вектора смещений строились, основываясь на системе уравнений (5) и известных соотношениях для k -ой гармоники, полученных и уже описанных нами в соответствующих изданиях, посвящённой оценке геодинамического риска:

$$\begin{cases} \sigma_z^{(k)}(x, y, z) = k^2 \left\{ \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dz) \right] shkz + \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Cz) \right] chkz \right\} \cos k_x x \cos k_y y, \\ u_z^{(k)}(x, y, z) = \frac{k}{2\mu} \left\{ \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} D - k(A + Cz) \right] shkz + \left[\frac{2\mu}{\lambda + \mu} C - k(B + Dz) \right] chkz \right\} \cos k_x x \cos k_y y, \\ \tau_{xy}^{(k)}(x, y, z) = -k_x k_y \left\{ [k(B + Dz) + C] shkz + [k(A + Cz) + D] chkz \right\} \sin k_x x \sin k_y y, \\ \tau_{xz}^{(k)}(x, y, z) = k k_x \left\{ \left[k(A + Cz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} D \right] shkz + \left[k(B + Dz) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} C \right] chkz \right\} \sin k_x x \cos k_y y, \end{cases} \quad (6)$$

где $k_x = \frac{\pi m}{a}$; $k_y = \frac{\pi n}{b}$; $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ (m, n – порядковые номера гармоник по осям

X и Y , соответственно; a – длина модельного пространства (по оси X); b – ширина модельного пространства (по оси Y); A, B, C, D – неизвестные коэффициенты, определяемые из условий (5).

Зная величины составляющих напряжений и смещений в геологической среде, можно рассчитать сдвиговые деформации $\gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \gamma_{xy}$ в плоскостях XZ, YZ, XY , соответственно:

$$\left\{ \gamma_{xz} = \frac{1}{\mu} \tau_{xz}, \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{\mu} \tau_{yz}, \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{\mu} \tau_{xy}, \right. \quad (7)$$

и затем уже построить поле скоростей этих деформаций, т.е. численно оценить величину геодинамического индикатора, позволяющий идентифицировать тот или иной район Земного шара как нефтегазоносный.

Рассмотрим и обсудим некоторые результаты, полученные в ходе практического использования технологии компьютерного геодинамического моделирования.

Результаты применения компьютерного геодинамического моделирования

Приведем наиболее важные результаты, полученные в ходе использования технологии КГДМ при выполнении ряда проектов, реализуемых для территории Республики Саха (Якутия).

Так, по одному из проектов выполнялись количественные оценки термоупругих деформаций для территории, прилегающей к г. Якутску – столице Республики Саха.

Представим вначале для этого региона подробные карты-схемы распределений скоростей вертикальных (рисунок 3) и горизонтальных (рисунок 4) смещений на поверхности.

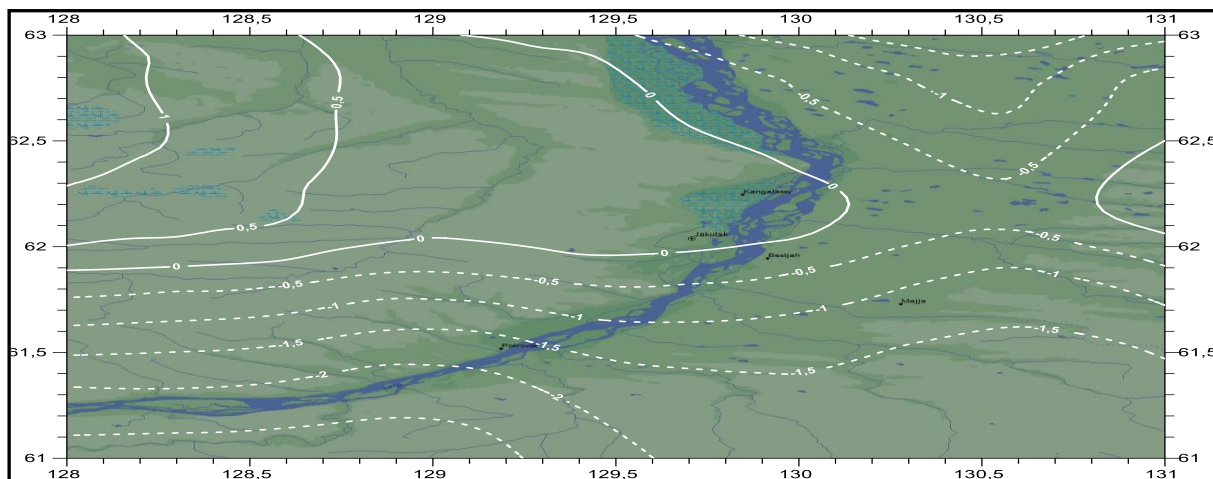


Рисунок 3 – Распределение скоростей вертикальных смещений (в мм/год) для окрестностей г. Якутска

Исходя из данных, приведённых на рисунке 4, для территории, прилегающей к Якутску, установлены высокие скорости современных горизонтальных движений – до 20-25 мм/год. Действительно, на пересечении 62.5° с. ш. и 131° в. д. как раз и наблюдаются подобные значения скоростей горизонтальных движений на поверхности (рисунок 4).

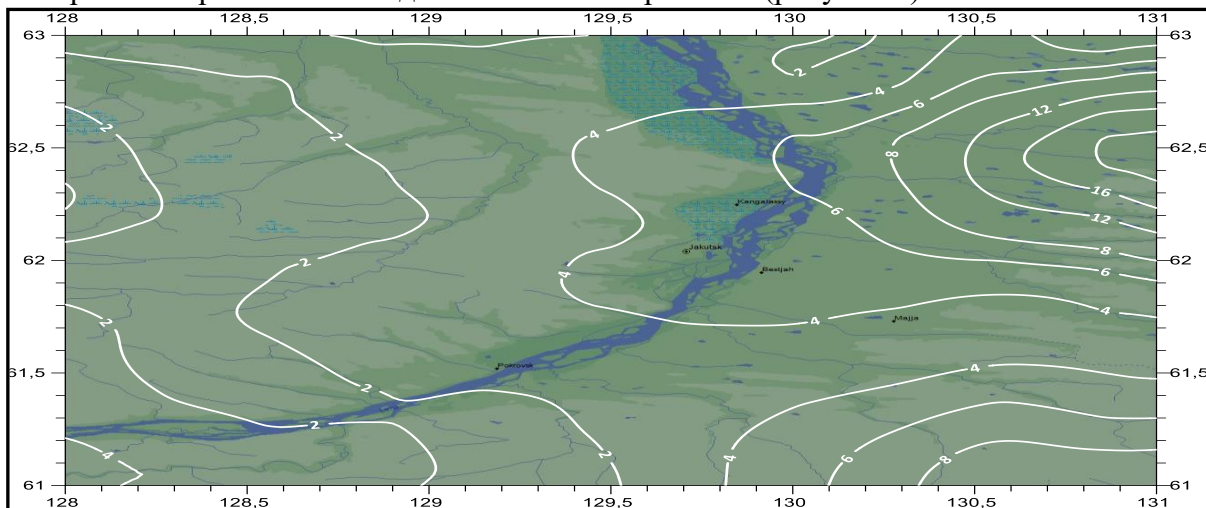


Рисунок 4 – Распределение скоростей горизонтальных смещений (в мм/год) для окрестностей г. Якутска

Рассмотрим термоупругие деформации. Они также количественно оценены, что дало возможность построить соответствующие карты-схемы их распределений (рисунки 5, 6).

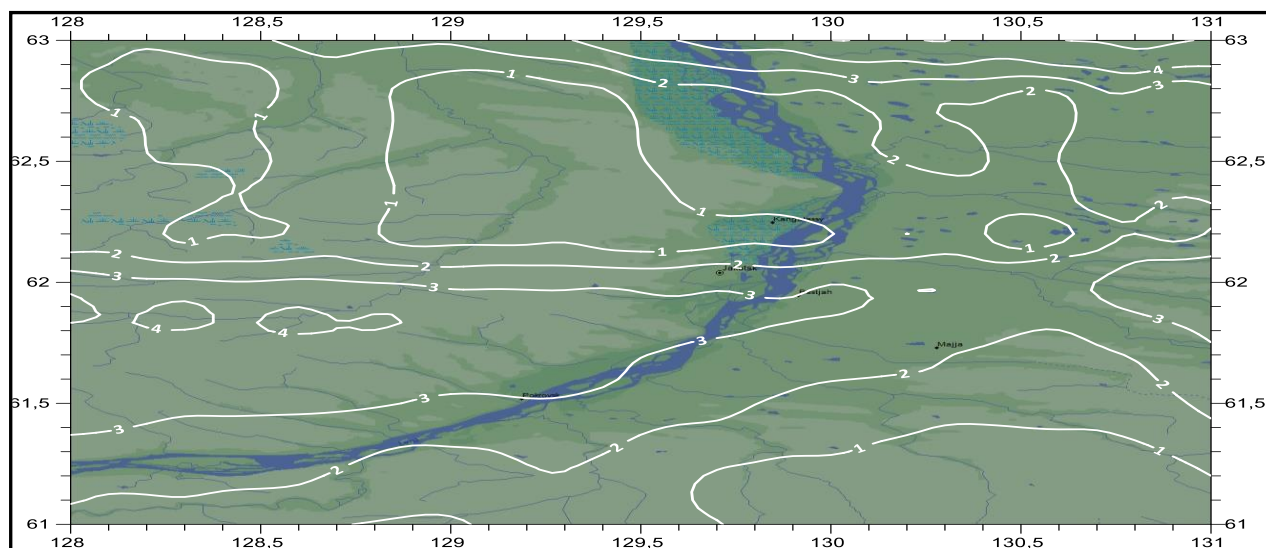


Рисунок 5 – Распределение вертикальных деформаций ($\times 10^{-7}$) для окрестностей г. Якутска

При анализе рисунков 5, 6 обращает на себя внимание то, что горизонтальные деформации на порядок превышают вертикальные. Всё это свидетельствует о том, что зафиксированные по инструментальным данным повторного нивелирования скорости современных вертикальных движений не всегда отражают реальный темп и направленность движений земной коры. Поэтому не всегда в исследованиях нужно ориентироваться на полную сопоставимость с инструментальными данными. Всякий раз необходима дополнительная информация о проверке соответствия теоретических и эмпирических данных.

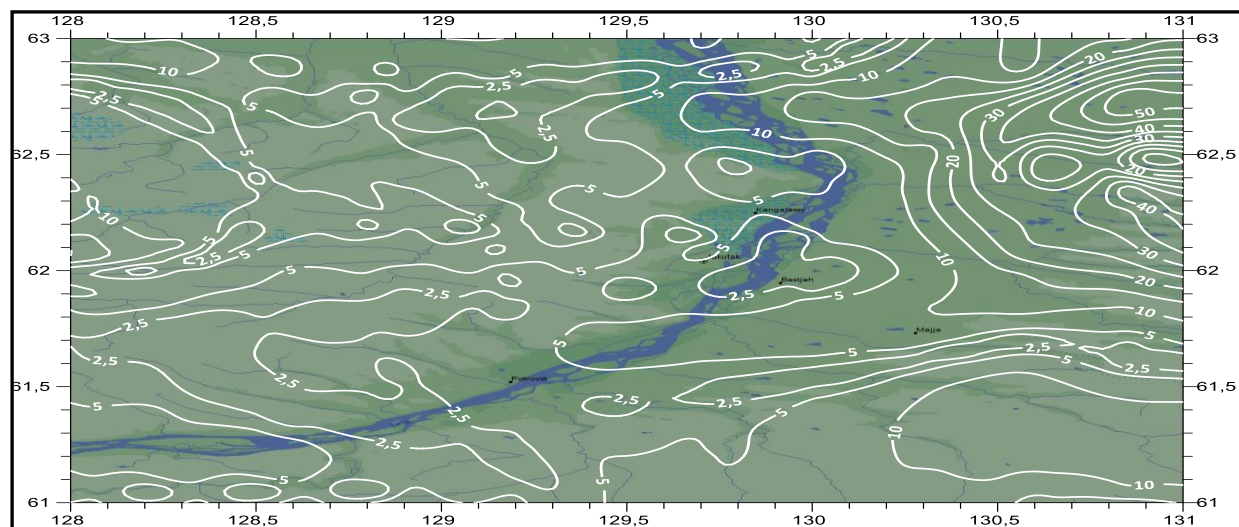


Рисунок 6 – Распределение горизонтальных деформаций ($\times 10^{-7}$) для окрестностей г. Якутска

Количественная реализация данной модели позволила более точно переоценить упругие деформации, формирующиеся в земной коре из-за протекания тепловых и иных процессов, что является очень важным при осуществлении мониторинга зданий, инженерных сооружений и их грунтовых оснований, в том числе – в условиях криолитозоны, разработках обоснованных рекомендаций по условиям безопасного строительства как отдельных объектов, так и их комплексов, а также при управлении самой процедурой строительства на различных по своему масштабу территориях.

Также для части Арктического региона Российской Федерации, территориально относящегося к северной части Якутии, выполнены работы по предварительной разведке месторождений углеводородов в районе моря Лаптевых (рисунок 7).

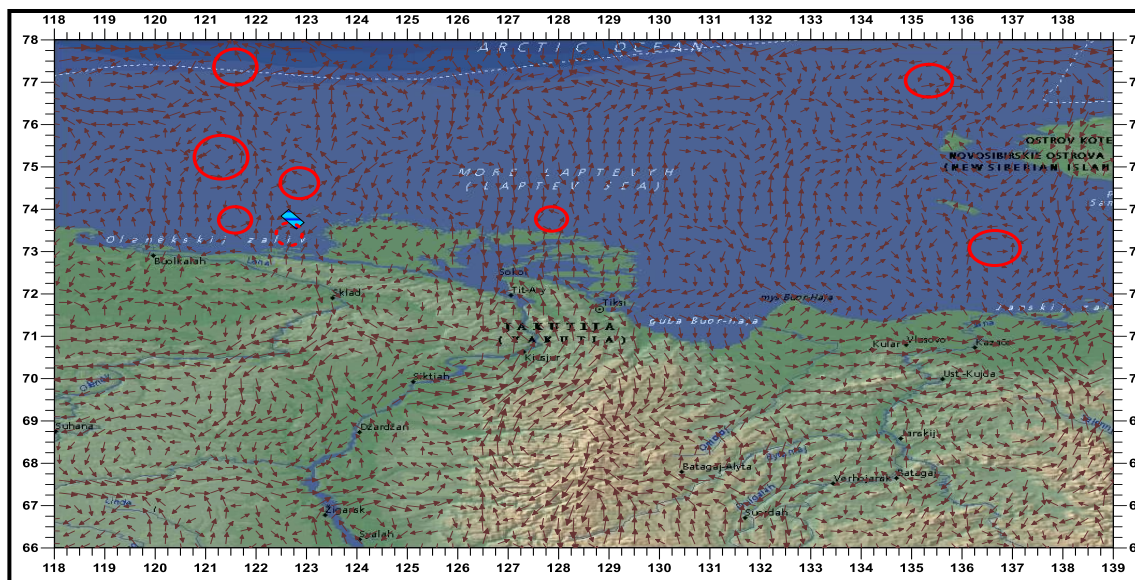


Рисунок 7 – Карта потенциальных мест расположения залежей углеводородов (обозначены сплошными окружностями красного цвета) с распределением вихревых структур векторов скоростей горизонтальных сдвиговых деформаций (глубина 2 км).

Прогноз коллектива авторов настоящей статьи

Характерно, что, согласно работе других авторов [3], исследовавших иными методами подошву осадочного чехла южной части бассейна моря Лаптевых, примерно в том же районе стрелкой указан участок, рекомендуемый для разведочного бурения (рисунок 8). На последнем рисунке он показан в виде заштрихованного четырехугольника.

Расположение этого участка в целом согласуется с расположением прогнозируемых авторами возможных мест залежей углеводородов – ближайшие находятся от него на расстояниях порядка 30 км западнее и порядка 80 км севернее. Более того, по расчетам южнее от этого участка также находится возможное место расположения залежей углеводородов (оно обозначено окружностью красного цвета с пунктирной границей) – на расстоянии порядка 40 км (рисунок 7). Важно отметить, что на этом рисунке представлена карта в прямоугольной проекции, и поэтому наблюдаются визуальные искажения в долготном и широтном направлениях.

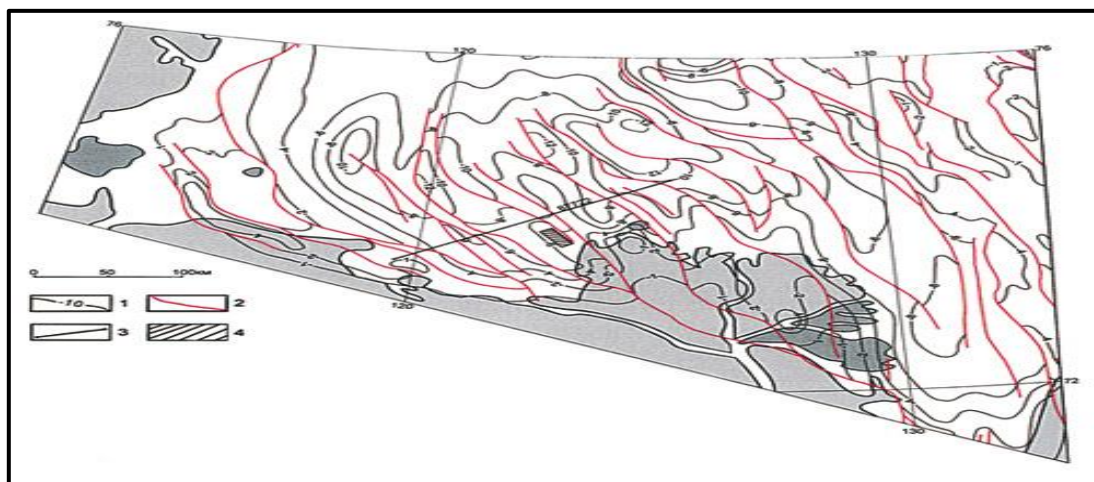


Рисунок 8 – Структурная карта подошвы осадочного чехла южной части Лаптевского бассейна. Обозначения на карте: 1 – изогипсы подошвы осадочного чехла (км); 2 – разрывные нарушения; 3 – сейсмический профиль МОВ ОГТ 87722; 4 – рекомендуемый участок для бурения [3]

Заключение

Как показали исследования, сложность количественной оценки напряжений, смещений и деформаций в земной коре заключается в том, что при проведении подобных работ возникает ряд существенных противоречий.

Первое из них связано с входной информацией, используемой в моделях возмущённого состояния геологической среды – каковы ее геофизические параметры, и каким образом их включать в уравнения.

Второе логически вытекает из первого – какова структура математической модели, сколько в ней уравнений, что эти уравнения отражают физически, каким реальным процессам они соответствуют.

Третье – это сама количественная оценка величин напряжений, смещений и деформаций. Ведь до сих пор нет единого мнения, какими должны быть реальные значения этих величин, диапазон их изменения весьма широк.

Учёт термических процессов, протекающих в геологической среде на различных глубинах, даёт возможность приблизиться к реальным значениям ключевых геофизических параметров, в нашем случае – к значениям скоростей вертикальных современных тектонических движений, и их пространственному региональному распределению.

Поскольку значения скоростей вертикальных смещений определяются на основании оценок напряжений и смещений, можно адекватно оценить величины деформаций, что и было выполнено в ходе исследовательских работ. Численные оценки термоупругих деформаций в поверхностных слоях южной части Якутии по своему порядку (10^{-7} – 10^{-6}) находятся в хорошем соответствии с экспериментальными оценками, выполненными исследователями для аналогичных геологических структур [8].

Отмечено, что горизонтальные термоупругие деформации доминируют над вертикальными, формируя значительные геодинамические риски для Якутска и его окрестностей, что нельзя не учитывать при развитии инфраструктуры городской среды и строительстве различных транспортных коммуникаций и объектов, в том числе – мостовых сооружений через реку Лена.

Технология КГДМ может использоваться на территориях с линейными размерами в нескольких сотен метров, в том числе – и для условий криолитозоны. При наличии для исследуемой территории информации о поверхностном тепловом потоке и реологии геологической среды возможно построение полей распределения термоупругих деформаций и температуры этой среды для диапазона глубин 0–500 м с шагом по глубине не более 10 м.

Таким образом, при наличии достоверной входной информации, на сегодняшний день реально решаемые задачи – это количественные оценки температуры, термоупругих деформаций, их пространственного распределения в пределах первой сотни метров поверхностного слоя земной коры, включающего существенные изменения в криолитозоне.

Решения указанных задач дают возможность превентивно оценивать геодинамические риски, «проигрывая» различные природно-техногенные ситуации на исследуемой территории. Предлагаемый подход даёт возможность на принципиально новой основе осуществлять мониторинг зданий, инженерных сооружений и их грунтовых оснований, в том числе – в условиях криолитозоны, разрабатывать обоснованные рекомендации по условиям безопасного строительства как отдельных объектов, так и их комплексов, а также управлять самой процедурой строительства на различных по своему масштабу ПТС.

Кроме того, технология КГДМ даёт возможность осуществлять дистанционную предварительную разведку месторождений углеводородов. По своим экономическим показателям КГДМ на несколько порядков эффективнее всех контактных методов, использующих гравитационную, сейсмическую и магнитную разведку, поисковое бурение, а также аналитических методов. По затратам новая разработка также дешевле геоморфологических и структурометрических методов, требующих дорогостоящих аэрокосмических снимков.

В частности, об этом говорит сравнение рассматриваемых методов, проведенное с привлечением опытных специалистов в области нефтегазоразведки. Относительные затраты при поиске и разведке на одну продуктивную скважину, полученные экспертным путем, составляют: полевые геологические и геофизические исследования – 10 условных относительных единиц; аналитические исследования – 5; геоморфологические методы – 3; структурометрические методы – 2; метод КГДМ – 1.

В заключение ещё раз подчеркнем, что обеспечение безопасного и устойчивого развития природно-технических систем и реализуемых для них экономических проектов может быть реализовано благодаря разработанной и применяемой авторами технологии компьютерного геодинамического моделирования.

Библиография

1. Ахметшин Т.Р., Минаев В.А., Степанов Р.О., Фаддеев А.О., Габитов С.И. Геодинамические риски: моделирование, оценки, управление: Монография / Под ред. В.А. Минаева. Уфа: УНЦП Изд-во УГНТУ, 2023. – 338 с.
2. Бурков В.Н., Грацианский Е.В., Дзюбко С.И., Щепкин А.В. Модели и механизмы управления безопасностью. М.: Изд-во СИНТЕГ, 2001. – 160 с.
3. Виноградов В.А., Горячев Ю.В., Супруненко О.И. Море Лаптевых как возможный плацдарм эффективного освоения нефтегазовых ресурсов Арктического шельфа России // Бурение и нефть. 2013. №2 (электронная версия).
4. Глико А.О., Парфенюк О.И. Тепловой режим литосферы и мантии Земли – геотермические исследования в ИФЗ РАН // Физика Земли. 2019. №1. – С. 28 – 41.
5. Ефремов, И. В. Надежность технических систем и техногенный риск. – М.: Бибком, 2013. – 647 с.
6. Зверев, А.Л. Инженерная геодинамика. – М.: МИИГАиК, 2013. – 326 с.
7. Копылов, И.С. Морфокинетическая система оценки геодинамической активности. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2019. – 131 с.
8. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Горная книга, 2012. – 264 с.
9. Носач, В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. М.: МИКАП, 1994. – 354 с.
10. Минаев В.А., Степанов Р.О., Фаддеев А.О. Арктические риски: моделирование, комплексная оценка, управление. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 420 с.
11. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / Под ред. А.Л. Рагозина. – М.: Издательская фирма «КРУК», 2002. – 248 с.
12. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. М.: Мир, 1993. – 368 с.
13. Природные опасности России. Природные опасности и общество. Тематический том / Под ред. В.А. Владимирова, В.Л. Воробьева, В.И. Осипова. – М.: Издательская фирма «КРУК», 2002 а. – 248 с.
14. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
15. Экзогенные геологические опасности. Тематический том / Под ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко. – М.: Издательская фирма «КРУК», 2002. – 348 с.
16. Экономическая безопасность России: теоретическое обоснование и методы регулирования: монография / под общ. ред. А.Е. Городецкого, И.В. Караваевой. М.: Институт экономики РАН, 2023. – 361 с.
17. Fukuyama Y., Sugeno M. A New Method of Choosing the Number of Clusters for the Fuzzy C-means Method // Proceedings of the Fifth Fuzzy Systems Symposium, 1989. – P. 247–250.

18. Harnisch G. Research of Possible Correlation Between the Recent Vertical Crustal Movements and Heat Flow // *Gerlands Beitr. Geophysik*. 1975. 84. – Pp. 311–316.
19. Jang J.S. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System // *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.* 1993. Vol. 23. – P. 665–685.
20. K. E. Kerry, K.A. Hawick. Kriging Interpolation on High-Performance Computers. Department of Computer Science, University of Adelaide, SA 5005, Australia. Technical Report DHPC-035, <http://acsys.adelaide.edu.au/reports/035/abs-035.html>.
21. Morgan, W.J. Heat Flow and Vertical Crustal Movements // *Petroleum and Global Tectonics*. Princeton University Press. 1975. URL: Heat Flow and Vertical Movements of the Crust (degruyter.com).
22. Schettino, A. Physics of the Earth – plate kinematics – geodynamics. Springer, 2015. – 409 p.
23. Stasey F.D., Loper D.E. Thermal History of the Core and Mantle // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1984. – Pp. 99–115.
24. Wu K.-L., Yang M.-S. A Cluster Validity Index for Fuzzy Clustering // *Pattern Recognition Letters*, 2005. Vol. 26. – № 9. – P. 1275–1291.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR ENSURING SAFETY OF ECONOMIC PROJECTS ON THE BASIS OF GEODYNAMIC RISK MODELS

Minaev V.A.¹, Mokshantsev A.V.^{2,3}, Ovsyanik A.I.^{2,3}, Faddeev A.O.⁴

¹Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after V.Y. Kikotya

²Finance University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia;

³Academy of the State Fire Fighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

⁴Ryazan Branch of the V.Y. Kikotya Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia

Abstract

The article deals with the problem of ensuring the safety of economic projects implemented in natural and technical systems. Analysis of existing technologies for assessing risks arising in these systems due to the implementation of dangerous natural and man-made processes of geodynamic conditioning in them is carried out. An innovative technology of computer geodynamic modeling is proposed and considered in detail, designed to solve the main problems of ensuring the safety of economic projects implemented in natural engineering systems. The complex of mathematical models underlying the technology of computer geodynamic modeling is considered and analyzed. The results of the application of this technology are presented and discussed using examples of specific implemented projects. Based on the results of modeling within the framework of the claimed technology, numerical estimates of displacements and thermoelastic deformations in the surface layers of the Earth's crust were performed for both the entire southern Yakutia and the vicinity of Yakutsk, as well as a forecast cortex for preliminary exploration of hydrocarbon deposits. An important conclusion is made that the presented technology makes it possible to monitor buildings, engineering structures and their ground bases, including in cryolithozone conditions, to develop sound recommendations on the conditions of safe construction of both individual facilities and their complexes, as well as to manage the construction procedure itself in territories of various scales, to carry out preliminary exploration of hydrocarbon deposits.

Keywords

Safety, economic project, geodynamic risk, innovative technology, modeling, hydrocarbon deposits, preliminary exploration.