

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРИРОДНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ И ПРИНЯТИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

С.Ю. ПРИХОДЬКО, Л.П. ПОЛЯКОВА

Предложена математическая модель, описывающая поведение горного массива при воздействии на него массовых сил. Найдены условия параметров задачи, при которых возможны геотектонические нарушения. Предложена методика исследований, заключающаяся в системном подходе решения вопроса, который состоит в выделении рассматриваемой системы, определении составляющих ее компонентов, определение связей между ними. Определяющим моментом методики исследования является наличие базы данных по факторам влияния. Рассматривается математическая модель, позволяющая описать слоистую структуру горного массива с учетом наличия геологических нарушений и техногенных воздействий. Исследование ее устойчивости базируется на анализе энергетического баланса внешнего и внутреннего потенциалов, комплексно воздействующих на горный массив, на котором расположен рассматриваемый регион. Выведены критерии (на основании дисбаланса потенциалов), позволяющие делать пространственно-временной прогноз возможных чрезвычайных горно-геологических процессов. Достоверность критериев устойчивости усиливается коэффициентом системности, который может рассчитываться как для всей природно-промышленной системы, так и для отдельных ее компонентов.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях быстро меняющихся экономических, политических и других факторов значительно возросла цена ошибок в управлении организационными системами (административными образованиями, крупными предприятиями и т.д.). Все подобные системы включают как природные, так и технические объекты, а параметры их функционирования существенно зависят от пространственного расположения, а также от времени. Такие системы называются промышленно-природными системами (ППС). Экспериментальные воздействия на ППС по многим причинам (ограниченные временные рамки, опасность необратимых изменений, высокая стоимость и др.) обычно невозможны или нежелательны, поэтому основным методом изучения и прогнозирования поведения ППС служит моделирование. Моделирование таких объектов с достаточной для получения практически значимых результатов, многосторонностью заставляет рассматривать их как сложные пространственные динамические системы с переменной структурой, множественными внешними и внутренними связями, а также учитывать разнообразные информационные, финансовые, материальные, энергетические потоки и предусматривать анализ последствий изменения структуры объекта, критических ситуаций и т.д.

Анализ исследований проводимых в данном направлении [1–2] показал, что математические модели рассматриваемых систем дают в основном качественные характеристики. В случаях количественной оценки математические модели носят локальный характер и не могут давать количественную оценку динамики процессов в сложных системах, например таких, как региональные ППС. Системный анализ сложных структур в основном проводится без выделения наиболее весомых компонентов, определяющих динамику и устойчивость других компонентов системы и всей системы в целом. Весовые значения компонентов могут изменяться во времени и это тоже не учитывается в методиках исследований.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предлагаемая методика исследований заключается в системном подходе решения вопроса, который состоит в выделении рассматриваемой системы, определении составляющих ее компонентов, определении связей между компонентами и на каждом исследуемом временном интервале весовой оценке рассматриваемых факторов влияния на систему в объеме (как внутренних, так и внешних). Определяющим моментом методики исследования является наличие базы данных по факторам влияния [3–8].

В региональных ППС определяющим компонентом является горный массив, от устойчивого состояния которого зависит комплексная устойчивость всей региональной ППС. Разработанная объемная математическая модель горного массива позволяет прогнозировать его динамику и динамику всей региональной ППС.

Цель работы. Предложена математическая модель, описывающая поведение горного массива при воздействии на него массовых сил. Найдены условия параметров задачи при которых возможны геотектонические нарушения.

ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА И РЕЗУЛЬТАТЫ

В любой из геотектонических гипотез должны быть четко определены силы, участвующие в перемещениях или преобразованиях масс в земной коре, и источник энергии, поддерживающий эти силы в течении определенного периода времени. Модели горного массива, рассматриваемые при прогнозировании газодинамических явлений, основаны на детерминистическом причинном описании. Однако такое описание не всегда является адекватным. Главная причина этого состоит в том, что в макроскопических системах существование многих степеней свободы часто приводит к возникновению флуктуаций. После возникновения макроскопической флуктуации система ведет себя в соответствии с определенными феноменологическими законами. Флуктуации, хотя и являются измеримыми величинами, должны оставаться малыми по сравнению с макроскопическими величинами. Малые флуктуации при наличии критической точки усиливаются, достигают макроскопического уровня и переводят систему в новое состояние, т.е. приводят к возникновению новой фазы в системе [6].

В работах [3–5] для описания качественного поведения амплитуды вертикального смещения локальной области земной поверхности использовалась модель колебания упругой тонкой пластины под действием внешних массовых сил. Учитывая относительную локальность области, в которой рассматривается модель, можно пренебречь вращением Земли. В качестве внешних сил V_e рассматривается воздействие на земную поверхность комплекса экзогенных процессов и эрозионных волн [4], влияние долговременных тенденций изменения атмосферного давления, результаты гравитационного взаимодействия Земли с другими космическими телами (например, Солнцем, Луной) и т.д. В качестве внутренних сил V_i учитывается влияние вертикальных тектонических движений, возникающих как вследствие движения тектонических плит, так и в результате процессов физико-химической дифференциации вещества в недрах Земли. Получено модельное уравнение, которое учитывает зависимость амплитуды вертикального смещения, а, следовательно напряжений на земной поверхности, от взаимодействия внешнего и внутреннего суммарных потенциалов [3–5]. В работе [3] была рассмотрена модель упругих деформаций земной коры, которая при условии сохранения объёма в нутационной системе координат (нутационная система координат — система отчёта, определенным образом связанная с инерциальной системой отчёта) для амплитуды вертикального смещения принимает следующий вид:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \Delta h + \frac{\partial f}{\partial h}, \quad (1)$$

где $h = h(t, x, y)$ — вертикальное смещение, зависящее от времени t и декартовых координат x, y ; $f = f(h) := V_e + V_i$ — сумма внешнего (V_e) и внутреннего (V_i) потенциалов, действующих на горный массив; μ — параметр Ламе (Па); ρ — плотность (кг/м³); $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ — оператор Лапласа.

Основной целью исследования является определение значений некоторого положительного параметра β , который определяет динамику взаимодействия внешних и внутренних сил в безразмерной математической модели, при которых в системе возможно нарушение энергетического баланса. Для этого необходимо выполнить:

- переход к безразмерной форме в модели;
- построение энергетической диаграммы для задачи;
- анализ энергетической диаграммы.

В безразмерном виде уравнение (1) запишется:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = c_0 \Delta h + c_1 h^\beta - c_2 h^{\beta-1}, \quad (2)$$

где

$$c_0 = \frac{t_0^2 \mu}{l^2 \rho}, \quad c_1 = \frac{t_0^2 f_0}{h_0^2 (1-\alpha)} \left(\frac{h_0 g_0}{f_0} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}}, \quad c_2 = \frac{t_0^2 \alpha a_S g_0}{h_0^2 (1-\alpha)} \left(\frac{h_0 g_0}{f_0} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}, \quad \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}.$$

Не нарушая общности, будем рассматривать уравнение (2) в некоторой фиксированной области Ω с границей $\partial\Omega$ и полагать $c_0 = 1$. Вместе с (2) рассматриваем следующие граничные и начальные условия:

$$h|_{\partial\Omega} = 0, \quad h|_{t=0} = h_0(x), \quad h_t|_{t=0} = h_1(x), \quad (3)$$

где $h_0(x)$ — некоторая начальная геометрия горного массива, а $h_1(x)$ — его начальная скорость изменения.

Полная энергия открытой системы:

$$E(h(t)) := \frac{1}{2} \int \left(h_t^2 + |\nabla h|^2 - \frac{2c_1}{\beta+1} h^{\beta+1} + \frac{2c_2}{\beta} h^\beta \right) dx. \quad (4)$$

Из теории бинарных систем, хорошо известно, что знак начальной энергии системы существенно влияет на ее поведение, например, если начальная энергия отрицательна, то это приводит к фазовому переходу. Применительно к нашей ситуации, это означает следующее: если $E(h(0)) < 0$, то в системе, при определенных значениях параметров, возможен быстрый рост градиента амплитуды инверсионного подъема.

Для градиента мы получили следующее неравенство:

$$\frac{c_1 C_0^{\beta+1}}{\beta+1} \left(\frac{\beta+1}{2c_1 C_0^{\beta+1}} - \left(\int |\nabla h|^2 dx \right)^{\frac{\beta-1}{2}} \right) \int |\nabla h|^2 dx \leq E(h(0)). \quad (5)$$

В зависимости от значений начальной энергии, для случая $0 < \beta < 1$, возможны пять различных ситуаций:

- если $E(h(0)) < E^* = -\frac{(1-\beta)(c_1 C_0^{\beta+1})^{\frac{2}{1-\beta}}}{2(\beta+1)} < 0$, то не существует универсальной (независящей от времени) оценки градиента решения;
- если $E(h(0)) = E^*$, то градиент решения в точности равен $\int |\nabla h|^2 dx = (c_1 C_0^{\beta+1})^{\frac{2}{1-\beta}}$ в любой момент времени $t > 0$;
- если $E^* < E(h(0)) < 0$, то градиент решения имеет двухстороннюю оценку при любом $t > 0$, а именно,

$$a_1 \leq \int |\nabla h|^2 dx \leq a_2,$$

где постоянные $0 < a_1 < a_2 < \left(\frac{2c_1 C_0^{\beta+1}}{\beta+1} \right)^{\frac{2}{1-\beta}}$ зависят от значения начальной энергии $E(h(0))$;

- если $E(h(0)) = 0$, то имеет место оценка градиента решения сверху $\int |\nabla h|^2 dx \leq \left(\frac{2c_1 C_0^{\beta+1}}{\beta+1} \right)^{\frac{2}{1-\beta}}$ при любом $t > 0$;

- если $E(h(0)) > 0$, то градиент решения ограничен сверху

$$\int |\nabla h|^2 dx \leq a_3, \text{ при любом } t > 0, \text{ и постоянная } a_3 > \left(\frac{2c_1 C_0^{\beta+1}}{\beta+1} \right)^{\frac{2}{1-\beta}} \text{ зависит}$$

от $E(h(0))$.

Для случая $\beta > 1$ в зависимости от значений начальной энергии возможны три ситуации:

- если $E(h(0)) > 0$, то градиент решения в любой момент времени $t > 0$ не имеет универсальной оценки сверху;
- если $E(h(0)) = 0$, то градиент решения ограничен снизу

$$\int |\nabla h|^2 dx \geq \left(\frac{\beta+1}{2c_1 C_0^{\beta+1}} \right)^{\frac{2}{\beta-1}} \text{ при любом } t > 0;$$

- если $E(h(0)) < 0$, то градиент решения имеет оценку снизу $\int |\nabla h|^2 dx \geq a_4$ при любом $t > 0$, где постоянная $a_4 > \left(\frac{\beta+1}{2c_1 C_0^{\beta+1}} \right)^{\frac{2}{\beta-1}}$ зависит от $E(h(0))$.

Итак, в случае $\beta > 1$ и $E(h(0)) \leq 0$, мы получим, что градиент всегда ограничен снизу, т.е.

$$\int |\nabla h|^2 dx \geq C > 0.$$

Для случая $\beta = 1$ из оценки (5) мы получим, что

$$\chi \int |\nabla h|^2 dx \leq E(h(0)),$$

где $\chi = \frac{1}{2} - \frac{c_1 C_0^{\beta+1}}{\beta+1}$. Отсюда, в свою очередь, мы устанавливаем, что:

- если $\chi > 0$ и $E(h(0)) < 0$, то $\int |\nabla h|^2 dx$ не имеет универсальной верхней оценки;
- если $\chi > 0$ и $E(h(0)) = 0$, то $\int |\nabla h|^2 dx = 0$, откуда следует, что $h = \text{const}$;
- если $\chi > 0$ и $E(h(0)) > 0$, то $\int |\nabla h|^2 dx \leq \frac{2(\beta+1)}{\beta+1-2c_1 C_0^{\beta+1}} E(h(0))$;
- если $\chi < 0$ и $E(h(0)) < 0$, то $\int |\nabla h|^2 dx \geq -\frac{2(\beta+1)}{2c_1 C_0^{\beta+1} - \beta - 1} E(h(0))$;
- если $\chi < 0$ и $E(h(0)) \geq 0$, то $\int |\nabla h|^2 dx$ не имеет универсальной верхней оценки.

Определяя поведение градиента вертикального смещения, который связан с тензором деформаций, мы тем самым определяем поведение соответ-

ствующих напряжений в горном массиве. Найденная зависимость между значением начальной энергии системы и поведением градиента вертикального смещения, а как следствие и самого вертикального смещения, позволяет получать информацию о поведении напряжений внутри горного массива.

ВЫВОДЫ

Математическая модель позволяет описать слоистую структуру горного массива с учетом наличия геологических нарушений и техногенных воздействий. Исследование ее устойчивости базируется на анализе энергетического баланса внешнего и внутреннего потенциалов, комплексно воздействующих на горный массив, на котором расположен рассматриваемый регион. Выведены критерии (на основании дисбаланса потенциалов), позволяющие делать пространственно-временной прогноз возможных чрезвычайных горно-геологических процессов. Достоверность критериев устойчивости усиливается коэффициентом системности, который может рассчитываться как для всей ППС, так и для отдельных ее компонентов. При наличии соответствующей базы данных, модель позволяет исследовать устойчивость региональных ППС в любой точке Земного шара.

Любая исследуемая система имеет 2 граничных состояния: 0 — система полностью неупорядочена, хаос; 1 — система полностью упорядочена, гармония. Метод главных компонент позволяет на любом временном интервале исследования выделять наиболее весомые факторы комплексного воздействия на систему и по их значениям рассчитывается коэффициент системности, значение которого находится в интервале от 0 до 1. Эмпирически определяются критерии, по которым программа информирует пользователя о сильной неустойчивости системы в целом (или компонентов системы) и на выделяемых временных интервалах показывает факторы, наиболее сильно влияющие на устойчивость. Это позволяет (при возможности) воздействовать на эти факторы, для восстановления устойчивости.

Предлагаемая методика исследования устойчивости систем позволяет работать с базами данных в различных сферах общественной деятельности:

- производственно-технической (горно-металлургическая промышленность, химическая промышленность, гражданское и промышленное строительство и т.д.);
- политической (международные отношения);
- социальной (чрезвычайные ситуации, сферы услуг: ЖКХ, снабжение населения различной продукцией, медицина и т.д.);
- экономической (экономика города, региона, государства).

Алгоритм методики исследований позволяет при работе с базами данных вносить в программу соответствующие дополнения для более точного определения критериев, оценивающих устойчивость исследуемых систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелова Г.В. Исследование слабоструктурированных проблем социально-экономических систем: когнитивный подход / Г.В. Горелова, Е.Н. Захарова, С.А. Радченко. Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2006. — 323 с.

2. Булавин И.В. Анализ качества программно-целевого планирования в условиях реализации социально-экономической стратегии региона // Региональная экономика: теория и практика. — 2008. — № 6. — С. 17–28.
3. Таранец Р.М., Привалов В.А., Приходько С.Ю. Новый подход к оценке влияния внешних и внутренних сил на поведение горного массива // Проблемы экологии. — 2007. — № 1–2. — С. 46–50.
4. Таранец Р.М., Привалов В.А., Приходько С.Ю. Об одном из аспектов нелинейной геодинамики: влияние массовых сил на тектоническое поведение земной поверхности на примере Донецкого бассейна // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна». — 2007. — № 6 (125) — С. 205–210.
5. Приходько С.Ю., Приходько С.Ю., Таранец Р.М. Исследование влияния внешних и внутренних сил на поведение горного массива // Материалы 11-й международной конференции «Геоинформационные технологии в управлении территориальным развитием», Ялта, 2008. — С. 125–126.
6. Приходько С.Ю., Панов Б.С. Новый подход к описанию геодинамической модели горного массива // Доповіді і повідомлення 4-ї Міжнародної наукової конференції 21–25 квітня 2005 р. у м. Донецьку. — С. 139–141.
7. Приходько С.Ю., Поляков П.И. К теории устойчивости региональных природно-промышленных систем // Проблемы экологии. — 2009. — № 1–2. — С. 70–74.
8. Приходько С.Ю., Скаженник Б., Полякова Л.П. Перспективы применения ГИС-технологий в региональном управлении Донбасса // Збірник наукових праць Донецького державного університету управління. — Донецьк–2010, т. XI: серія «Технічні науки», В. 158 — С. 178–187.

Поступила 01.06.2011