

ТЕОРІЯ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ

Розроблено математичні моделі для оцінки ефективності системи природокористування за умов змін клімату та підвищеної невизначеності. Для розрахунку ризиків використовуються методи теорії катастроф. Здійснено оцінку ризиків природокористування на регіональному рівні.

© К.Л. Атоєв, П.С. Кнопов, Т.В. Пепеляєва, 2017

УДК 519.711.3

К.Л. АТОЄВ, П.С. КНОПОВ, Т.В. ПЕПЕЛЯЄВА

РОЗРОБКА НОВИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ЗА УМОВ ЗМІН КЛІМАТУ ТА ЗРОСТАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Вступ. Оптимізація природокористування та його адаптація до нових кліматичних умов набуває пріоритетного значення на сучасному етапі світового розвитку. Кліматичні зміни впливають на ефективність сільського господарства та загострюють проблему захисту довкілля як вагомого фактора загальної безпеки. Вважається, що генераторами змін клімату є збільшення викидів в атмосферу парникових газів (ПГ), внаслідок інтенсифікації антропогенної діяльності, та нерівномірне отримання Землею потоків сонячної радіації. Дослідження механізмів формування цих змін потребує не тільки застосування сучасних космічних та інформаційних технологій, для оперативного моніторингу стану довкілля, але і створення нових методів оцінювання ризиків необоротних змін довкілля та розробки рекомендацій щодо мінімізації їх руйнівних наслідків. Дійсно, ефективність існуючих методів прогнозування значно знижується в умовах підвищеної невизначеності. Це пов'язано з тим, що для систем, які знаходяться поблизу нестійкого стану рівноваги в зоні біфуркації (саме такою системою є сучасне суспільство), більшість сучасних методів прогнозування в умовах неповноти даних не є ефективними. Тому створення математичного апарату для прогнозування поведінки системи природокористування (СП) в умовах підвищеної невизначеності та вирішення комплексних завдань керування

аграрним бізнесом стає дуже актуальним. Саме створення нових методів оцінки ризику, які дозволяють за допомогою використання матеріалів космічних і полігонних спектро- і газометричних зйомок, розширити горизонт прогнозування в умовах підвищеної невизначеності, пов'язаної з неповнотою даних та існуванням стрибкоподібних змін поведінки системи, є метою даної роботи.

Моделі оцінки ризику в умовах підвищеної невизначеності. Для дослідження різних аспектів стійкого розвитку складних динамічних систем використовуються різні індекси (екологічних і техногенних загроз, сталого розвитку, людського виміру, глобалізації та інші), які мають на меті визначити ступінь збалансованості змін у різних областях розвитку. Одним з підходів до вирішення цих проблем є метод комплексної оцінки ризиків, що базується на теорії гладких відображень [1 – 3]. Мірою ризику виступає міра наближеності параметрів системи до їх критичних (біфуркаційних) значень, досягнення яких викликає стрибкоподібну зміну траєкторії розвитку.

Керування СП з точки зору математичної теорії управління полягає у визначенні таких траєкторій дій, які переводили б систему із поточного стану у бажаний, наприклад, у стаціонарний стан, відповідний нормі, який характеризується низьким рівнем уразливості. При цьому об'єктом керування є параметри, що впливають на зміну поточного стану СП.

Забезпечення безпеки СП розглядається в просторі обмеженої кількості параметрів керування, кожен з яких є функцією змінних, що визначають поведінку системи. Будемо вважати, що СП задовольняє основним властивостям потенційних систем, описується деякою потенційною функцією $U(x)$ поведінкової змінної x , неперервна, має локальні екстремуми, в яких похідна за часом змінної x дорівнює нулю, тобто існує певна кількість стійких та нестійких стаціонарних станів. Введемо функцію $F(x)$, яка пов'язана з $U(x)$ наступним чином:

$$U(x) = - \int F(x) dx. \quad (1)$$

Щоб дослідити поведінку системи поблизу локальних екстремумів $U(x)$, функцію $F(x)$ розкладають у ряд в околі стаціонарних точок і обмежуються кількома малими членами розкладання. Для дослідження широкого кола систем найбільш часто використовують катастрофу типу «збірка», для якої функції $F(x)$ та $U(x)$ мають наступний вигляд [4]:

$$F(x) = x^3 + A_1 x + A_2, \quad U(x) = -x^4 / 4 - A_1 x^2 / 2 - A_2 x, \quad (2)$$

де A_1 та A_2 – параметри керування, що характеризують впливи на СП відповідно повільно діючих факторів, дія яких проявляється з великим запізненням, та швидкодіючих факторів, які мають високу руйнівну силу. Відповідно до теореми Штурма кубічний поліном має три або один дійсний корінь. Кількість коренів залежить від дискримінанту $\Delta = 4A_1^3 + 27A_2^2$. При виконанні умови $\Delta < 0$ маємо три дійсних корені. Система має три стаціонарні стани, з яких два –

стійкі. Перший стійкий стаціонарний стан характеризує норму (достатній рівень безпеки СП), другий – кризу (низький рівень безпеки СП). При $\Delta > 0$ маємо один дійсний корінь та два уявних. $\Delta(A_1, A_2) = 0$ є кривою біфуркаційних значень.

Для комплексної оцінки рівня безпеки СП будемо використовувати модель (2). Параметри керування A_1 та A_2 є узагальненими, тобто, для їх розрахунку необхідні дані про широкий спектр динамічних змінних, які описують СП.

Знаючи поточне значення параметра A_1 , з рівняння $\Delta(A_1, A_2) = 0$ отримуємо біфуркаційне значення параметра A_2 . Різниця між біфуркаційним і поточним значенням параметра A_2 є мірою ризику. Чим далі знаходиться поточне значення параметра від його біфуркаційного значення, тим менша вразливість СП. Чим вищий рівень резервів, тим при більшому значенні навантаження на систему ззовні відбуватиметься деформація простору безпеки СП.

Визначення параметрів керування. Впливи повільно діючих факторів на СП пов'язані з ендегенними генераторами кліматичних змін, до яких відносяться фактори, обумовлені інтенсифікацією світового промислового виробництва, наслідком якої є підвищення викидів в атмосферу ПГ (вуглекислого газу, метану, аміаку та інших), або скорочення абсорбції рослинами CO_2 , внаслідок скорочення лісових площ [5].

Індекс цих впливів будемо розраховувати за допомогою показників W_{Sj} , які характеризують: обсяги викидів CO_2 в атмосферу внаслідок спалювання вуглецевмісних видів палива, його видобування, обробки, зберігання, транспортування та споживання ($j = 1$); обсяги викидів CH_4 внаслідок видобування вугілля, транспортування та переробки нафти й природного газу, внутрішньої ферментації і відходів тваринництва, полігонів твердих побутових відходів та спалювання біомаси ($j = 2$); обсяги резервуарів поглинання CO_2 в таких резервуарах: жива біомаса, мертва органіка; ґрунти ($j = 3$).

Впливи швидкодіючих факторів на СП пов'язані з наслідками техногенних катастроф, великих пожеж (лісових, на сміттєзвалищах, місцях видобутку нафти та газу), коли в атмосферу раптово викидається велика кількість ПГ [5]. Індекс цих впливів будемо розраховувати за допомогою показників W_{Fi} , які характеризують: уразливість систем поводження зі вуглецевмісними видами палива ($i = 1$); ймовірності великих пожеж з руйнівними наслідками для довкілля ($i = 2$), стихійних лих, які супроводжуються викидами великих обсягів парникових газів ($i = 3$).

Параметри керування розраховуються наступним чином:

$$A_1 = \sum_{i=1}^3 \beta_{Si} W_{Si}, \quad A_2 = \sum_{j=1}^3 \beta_{Fj} W_{Fj},$$

де вагові коефіцієнти β відповідають наступним умовам:

$$\sum_{i=1}^3 \beta_{Si} = 1, \quad \sum_{j=1}^3 \beta_{Fj} = 1.$$

За допомогою даних [5] було здійснено оцінку стану СП на регіональному рівні. Результати тестового обчислення показали, що регіони України діляться на дві групи. До першої групи відносяться регіони підвищеного рівня загроз системи СП: Вінницька, Донецька, Дніпропетровська, Запорізька, Київська, Луганська, Львівська, Одеська та Харківська області. Решта регіонів відносяться до групи відносно низького рівня загроз СП. Проекцію поверхні стану СП для регіонів України на площину параметрів керування A_1 і A_2 показано на рис. 1.

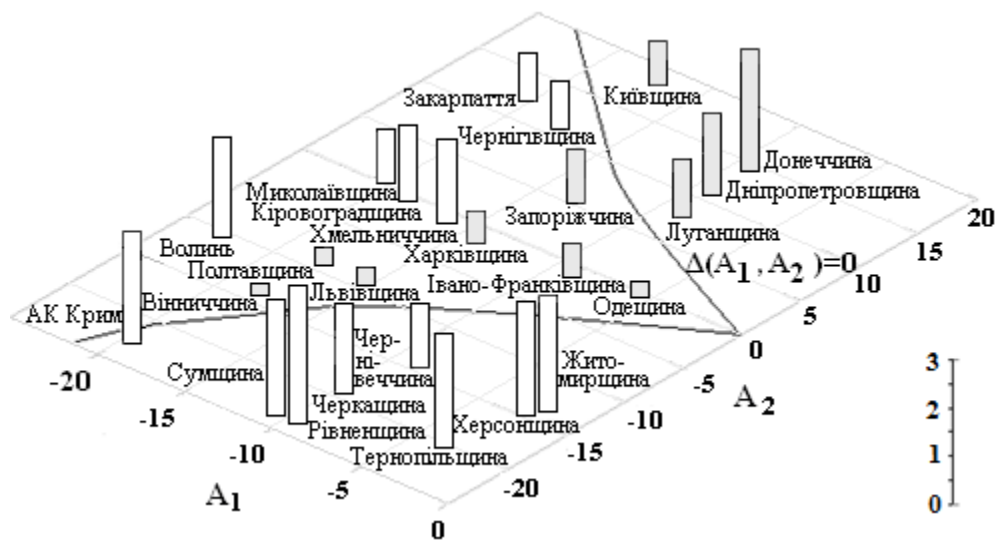


РИС. 1. Проекція поверхні стану системи на площину параметрів керування

Світлі стовпці відображають величину ризику переходу регіону з групи відносно низького рівня загроз у групу підвищеного рівня загроз. Темні – відображають можливість зниження рівня загроз для регіонів першої групи. Розмір стовпця відповідає від'ємній величині натурального логарифму ризику.

Стохастичний підхід до оцінки ризиків. Для градієнтних систем існують однозначні зв'язки між якісним їх поведінкою при детерміністичному і стохастичному описах. Використання стохастичних диференціальних рівнянь Іто дозволяє встановити зв'язок між потенційною функцією детермінованої системи катастроф та стаціонарною функцією щільності ймовірності (ФЩЙ) відповідного стохастичного процесу [6]. Це призводить до визначення стохастичного рівноважного стану і стохастичної бифуркації, які є сумісними з відповідними визначеннями детер-

рмінованої теорії катастроф. ФЩЙ $f(x)$ розраховується за допомогою рівняння Фоккера – Планка наступним чином [6]:

$$f(x) = N_a \exp[-V_{sto}(x)],$$

де N_a константа, а стохастична потенціальна функція V_{sto} визначається наступним чином:

$$V_{sto}(x) = -2 \int_a^x \frac{dz \{ \mu(z) - (1/2)[\sigma^2(z)]' \}}{[\sigma^2(z)]},$$

де $\mu(z)$ – функція дрейфу, $\sigma(z)$ – функція дифузії, a – довільна внутрішня точка простору станів, штрих означає диференціювання.

Відповідність між детермінованою потенційною функцією $V(x)$ і функції щільності ймовірності $F(X)$ для постійної функції дифузії $\sigma(x)$ показано на рис. 2. Стабільні стани відповідають мінімумам потенційної функції і модам ФЩЙ, водночас як нестійкі стани відповідають максимумам потенційної функції і антимодам ФЩЙ.

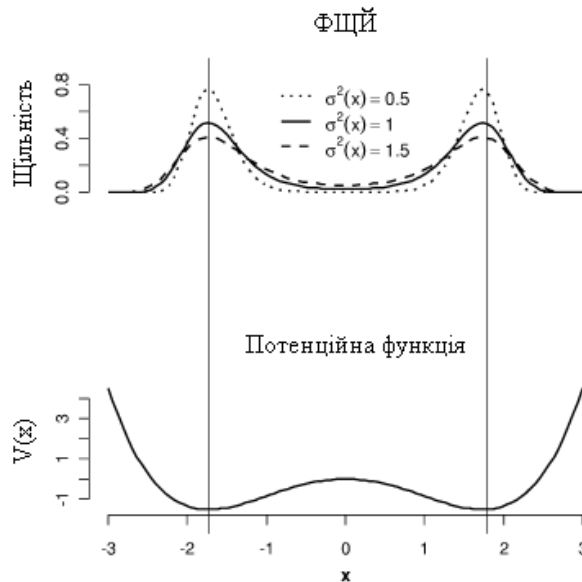


РИС. 2. Відповідність між стохастичним та детермінованим описом катастрофи «збірка» ([6], с. 266, рис. 1)

Висновок. Таким чином, для градієнтних систем при детерміністичному і стохастичному описі збігається безліч переходів (катастроф), що складається з усіх точок простору керування, в яких змінюється число і тип екстремальних точок. Тому існує можливість використовувати методи оцінювання ризику, що ба-

зуються на теорії гладких відображень, для випадків, коли параметри керування задаються за допомогою стохастичних моделей.

Робота проводиться в рамках проекту УНТЦ 6165 «Інформаційно-технологічне забезпечення оцінювання впливу парникового ефекту на регіональний клімат за матеріалами дистанційного зондування».

К.Л. Атоев, П.С. Кнопов, Т.В. Пепеляева

СОЗДАНИЕ НОВЫХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И РОСТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Разработаны математические модели для оценки эффективности природопользования в условиях климатических изменений и роста неопределенности. Для расчета рисков используются методы теории катастроф. Проведена оценка рисков природопользования на региональном уровне.

К.Л. Атоев, П.С. Кнопов, Т.В. Пепеляева

DEVELOPMENT OF NEW MODELS FOR ESTIMATION OF NATURAL RESOURCES MANAGEMENT EFFICACY UNDER CLIMATE CHANGES AND INCREASED UNCERTAINTY

The mathematical models are developed for estimation of natural resources management use efficacy under climate changes and increased uncertainty. The methods of catastrophe theory are used for risk calculation. The regional level estimation of natural resources management risks is carry out.

1. *Сергиенко И.В., Яненко В.М., Атоев К.Л.* Общая концепция управления риском экологических, техногенных и социогенных катастроф. *Кибернетика и системный анализ*. 1997. № 2. С. 65 – 86.
2. *Атоев К.Л., Пепеляев В.А.* Моделирование механизмов возникновения нестабильности сложных систем. *Теория оптимальных решений*. 2007. № 6. С. 51 – 58.
3. *Атоев К.Л., Пепеляев В.А.* Моделирование влияния системных рисков на устойчивое развитие общества. *Компьютерная математика*. 2009. № 1. С. 37 – 48.
4. *Постон Т., Стюарт И.* Теория катастроф и ее приложения. М.: Мир, 1980. 607 с.
5. *Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки. Оцінка розбіжностей у визначенні емісій та стоку (абсорбції рослинами) CO₂ для України, виконаних за методикою національного кадастру, в порівнянні з даними супутникових вимірів (розділ 3) В.І. Лялько, Д.М. Мовчан, Ю.В. Захарчук, І. Артеменко. Український журнал дистанційного зондування Землі. 2015. № 5. С. 37 – 56.*
6. *Wagenmakers E.J., Molenaar P.C.M., Grasman R.P.P. et al.* Transformation invariant stochastic catastrophe theory. *Physica D*. 211. 2005. **211**. P. 263 – 276.

Одержано 17.02.2017