

УДК. 528.8.04

О. М. Боднар, З. В. Козлов, О. Д. Федоровський

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

## Системне моделювання природних процесів на основі космічної інформації ДЗЗ і наземних спостережень

Надійшла до редакції 25.02.08

Виконано системне моделювання техногенного навантаження в Нікопольському гірничо-промисловому вузлі і нафтопродуктивності ділянок території Дніпровсько-Донецької западини на основі даних космічної інформації ДЗЗ і наземних спостережень.

Розглядатимемо природне середовище як складну геосистему, структурні складові якої генетично об'єднані взаємозалежними геологічними, геофізичними і біологічними процесами та ландшафтними особливостями регіону. На основі даних космічного дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і наземних спостережень, статистичних та архівних даних попередніх досліджень отримаємо інформацію про адаптивний баланс взаємного впливу цих процесів у складних природно-техногенних системах (ПТС) — природних і антропогенно змінених ландшафтах. Системне моделювання дає можливість формалізувати причинно-наслідкові зв'язки у ПТС, обґрунтувати найраціональніші методи побудови динамічних моделей для моделювання сценаріїв розвитку процесів, що відбуваються у ПТС, і адаптувати моделі ПТС до поточних спостережень.

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Динамічні моделі ПТС є вагомою складовою ДЗЗ- і ГІС-технологій природокористування, створюваних відповідно до принципів системно-

го аналізу [6]. Останній дозволяє розглянути природне середовище геосистем як єдине ціле, вивчати динаміку екзогенних і антропогенних процесів, що відбуваються у природному середовищі, для оцінки екологічного стану і природних ресурсів досліджуваного регіону [5].

За окремими складовими компонентами геосистеми, що дешифруються на космічних знімках, розкриваються взаємозв'язки між видимими і прихованими характеристиками природного середовища [1]. Це дозволяє при створенні динамічних моделей природного середовища використовувати принципи адаптивного балансу впливів. Реалізація цих принципів приводить до системного методу адаптивного балансу впливів (Adaptive Balance Causes, ABC-метод). Методика полягає в розробці концептуальної моделі і формуванні схеми причинно-наслідкових зв'язків між елементами системи, на підставі якої створюється системна діаграма моделі. Причинно-наслідкові зв'язки в моделі зображуються за допомогою функцій впливу через відповідні потоки, які забезпечують взаємний вплив компонентів вектора стану системи (модулів  $X_i$ ) і динамічну рівновагу системи. Формалізація моделі полягає в отриманні математичних рівнянь,

що виражають адаптивний баланс впливів усередині системи. Рівняння АВС-моделі має вигляд [8]

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i \left[ 1 - 2 \left( x_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \right) \right], \quad (1)$$

де  $x_1, x_2, \dots$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) — процеси в досліджуваній системі,  $a_{ij}$  — коефіцієнти рівнянь АВС-моделі, що визначають вплив процесу  $x_j$  на процес  $x_i$  та зберігають постійні значення на вибраному інтервалі часу.

Для визначення коефіцієнтів АВС-моделі  $a_{ij}$  використовуються архівні і статистичні дані попередніх досліджень. Рівняння отримано з умови, що кожен процес у досліджуваній системі можна виразити лінійною комбінацією решти процесів [7]:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{is}x_s + \dots + a_{in}x_n - x_i, \quad (2)$$

де  $x_i$  — досліджуваний процес;  $x_1, x_2, \dots, x_s, \dots, x_n$  — взаємозв'язані процеси, які впливають на  $x_i$ .

Коефіцієнти  $a_{ij}$  знаходяться з умови рівноваги системи рівнянь АВС-моделі, складеної на основі рівняння (2), шляхом прирівнювання до нуля правих частин рівнянь всіх взаємопов'язаних процесів. При цьому кожний з процесів представляється у вигляді суми впливів на нього з боку решти процесів. Рівень впливу процесів визначається з кореляційних зв'язків, які відображають статистичні зв'язки між процесами. Остаточно отримуємо систему однорідних лінійних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів  $a_{ij}$ . Після визначення коефіцієнтів впливу  $a_{ij}$  на основі системи рівнянь АВС-моделі (1) з'являється можливість виконати моделювання сценаріїв розвитку процесів, що відбуваються в ПТС.

#### МОДЕЛЬ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИХ СИСТЕМ

Системне моделювання на основі АВС-методу ми використали для прогнозування змін геоecологічного стану території Нікопольського гірничопромислового вузла під впливом промислового виробництва. Розвиток геоecологічних про-

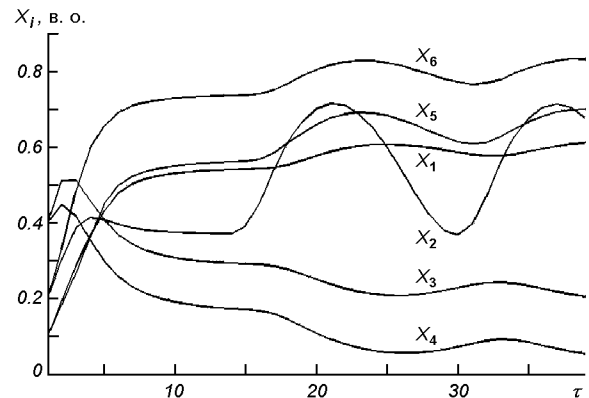


Рис. 1. Значення модельних параметрів при періодичній зміні об'ємів виробництва:  $X_1$  — техногенне навантаження на навколишнє середовище,  $X_2$  — об'єм промислового виробництва,  $X_3$  — площа зайнята природними процесами,  $X_4$  — площа під антропогенно-модифікованими процесами,  $X_5$  — площа під антропогенними процесами,  $X_6$  — площа під техногенно-індустріальними процесами,  $\tau$  — інтервал часу

цесів розглядався як набір взаємозв'язаних ландшафтно-функціональних процесів, що змінюються в часі та охоплюють всі можливі стани ландшафтів на території Нікопольського гірничопромислового району: природні, антропогенно-модифіковані, антропогенні і техногенно-індустріальні [4].

Концептуальна модель ПТС є схемою цільових установок з основними модулями (підсистемами) системи. На основі концептуальної моделі формуються основні причинно-наслідкові зв'язки між модулями (рівнями) моделі, що відображають характер функціонування ПТС:  $X_1$  — техногенне навантаження на навколишнє середовище,  $X_2$  — об'єм промислового виробництва,  $X_3$  — площа під природними процесами,  $X_4$  — площа під антропогенно-модифікованими процесами,  $X_5$  — площа під антропогенними процесами,  $X_6$  — площа під техногенно-індустріальними процесами (рис. 1).

Для моделювання геоecологічних змін ПТС було вибрано інтервал часу, протягом якого значення функцій впливу можна вважати постійним. Тоді після формалізації динамічної моделі на основі рівняння (1) отримуємо систему рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= \\ &= x_1 [1 - 2(x_1 - (-a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 + a_{16}x_6))], \\ \frac{dx_2}{dt} &= x_2 [1 - 2(x_2 - (-a_{21}x_1))], \\ \frac{dx_3}{dt} &= \\ &= x_3 [1 - 2(x_3 - (-a_{32}x_2 - a_{34}x_4 - a_{35}x_5 - a_{36}x_6))], \\ \frac{dx_4}{dt} &= \\ &= x_4 [1 - 2(x_4 - (a_{42}x_2 - a_{43}x_3 + a_{45}x_5 + a_{46}x_6))], \\ \frac{dx_5}{dt} &= \\ &= x_5 [1 - 2(x_5 - (a_{52}x_2 - a_{53}x_3 + a_{54}x_4 + a_{56}x_6))], \\ \frac{dx_6}{dt} &= \\ &= x_6 [1 - 2(x_6 - (a_{62}x_2 - a_{63}x_3 + a_{64}x_4 + a_{65}x_5))]. \end{aligned}$$

Для визначення коефіцієнтів впливу  $a_{ij}$  в системі рівнянь (3) використовувалася процедура, що була розглянута раніше. Прирівнюючи до нуля праві частини рівнянь системи, сформованої на основі рівняння (2), одержуємо систему однорідних лінійних рівнянь (4) відносно невідомих коефіцієнтів  $a_{ij}$ :

$$\begin{aligned} a_{13}X_3 + a_{14}X_4 + a_{15}X_5 + a_{16}X_6 &= X_1, \\ a_{34}X_4 + a_{35}X_5 + a_{36}X_6 &= X_3, \\ a_{43}X_3 + a_{45}X_5 + a_{46}X_6 &= X_4, \\ a_{53}X_3 + a_{54}X_4 + a_{56}X_6 &= X_5, \\ a_{63}X_3 + a_{64}X_4 + a_{65}X_5 &= X_6. \end{aligned} \quad (4)$$

Для визначення коефіцієнтів функцій впливу, які входять у перше рівняння системи (4), в результаті нескладних перетворень була сформована система рівнянь

$$\begin{aligned} a_{13}R_{33} + a_{14}R_{43} + a_{15}R_{53} + a_{16}R_{63} &= R_{13}, \\ a_{13}R_{34} + a_{14}R_{44} + a_{15}R_{54} + a_{16}R_{64} &= R_{14}, \\ a_{13}R_{35} + a_{14}R_{45} + a_{15}R_{55} + a_{16}R_{65} &= R_{15}, \\ a_{13}R_{36} + a_{14}R_{46} + a_{15}R_{56} + a_{16}R_{66} &= R_{16}. \end{aligned} \quad (5)$$

Система рівнянь (5) дозволяє знаходити необхідні коефіцієнти  $a_{ij}$  для ідентифікації функцій впливу, що діють на модуль системи  $X_1$ . Аналогічним чином отримуємо системи рівнянь для коефіцієнтів функцій впливу, що належать до решти модулів. Для знаходження коефіцієнтів  $a_{ij}$  із системи рівнянь (5) достатньо скористатися формулами Крамера [3]. Взаємний вплив процесів за досліджуваний період визначався з кореляційних зв'язків між техногенним навантаженням на навколишнє середовище  $X_1$  і розмірами площ  $X_3, X_4, X_5, X_6$  ландшафтних комплексів на території Нікопольського гірничопромислового району. При цьому використовувалися матеріали багаторічних наземних спостережень, а також космічна інформація, отримана за останні 15 років із супутників «Ресурс-Ф», «Landsat-ТМ», «Океан-О», «Метеор-3М» в Нікопольському гірничопромисловому регіоні [4].

Розраховані за архівними і статистичними даними коефіцієнти кореляції  $R_{ij}$  досліджуваних процесів наведені в табл. 1.

Для всіх модулів (окрім  $X_2$ ) коефіцієнти впливу рівнянь АВС-моделі ПТС, що відображають ступінь взаємозв'язку між процесами, визначалися на основі кореляційних зв'язків між цими процесами. У зв'язку з відсутністю архівних

Таблиця 1. Коефіцієнти кореляції  $R_{is}$  між геоекологічним станом  $X_1$  і геопроцесами в Нікопольському гірничопромисловому вузлі

	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_1$
$X_3$	1	-0.91	-0.95	-0.82	-0.95
$X_4$	-0.91	1	0.76	0.54	0.77
$X_5$	-0.95	0.76	1	0.95	0.96
$X_6$	-0.82	0.54	0.95	1	0.91
$X_1$	-0.95	0.77	0.96	0.91	1

Таблиця 2. Коефіцієнти впливу  $a_{ij}$

$a_{ij}$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_1$	$X_2$
$X_3$	1	-0.18	-0.13	-0.27	0	-0.2
$X_4$	-0.18	1	0.09	0.19	0	0.2
$X_5$	-0.13	0.09	1	0.21	0	0.2
$X_6$	-0.27	0.19	0.21	1	0	0.2
$X_1$	-0.15	0.17	0.13	0.18	1	0
$X_2$	0	0	0	0	-0.2	1

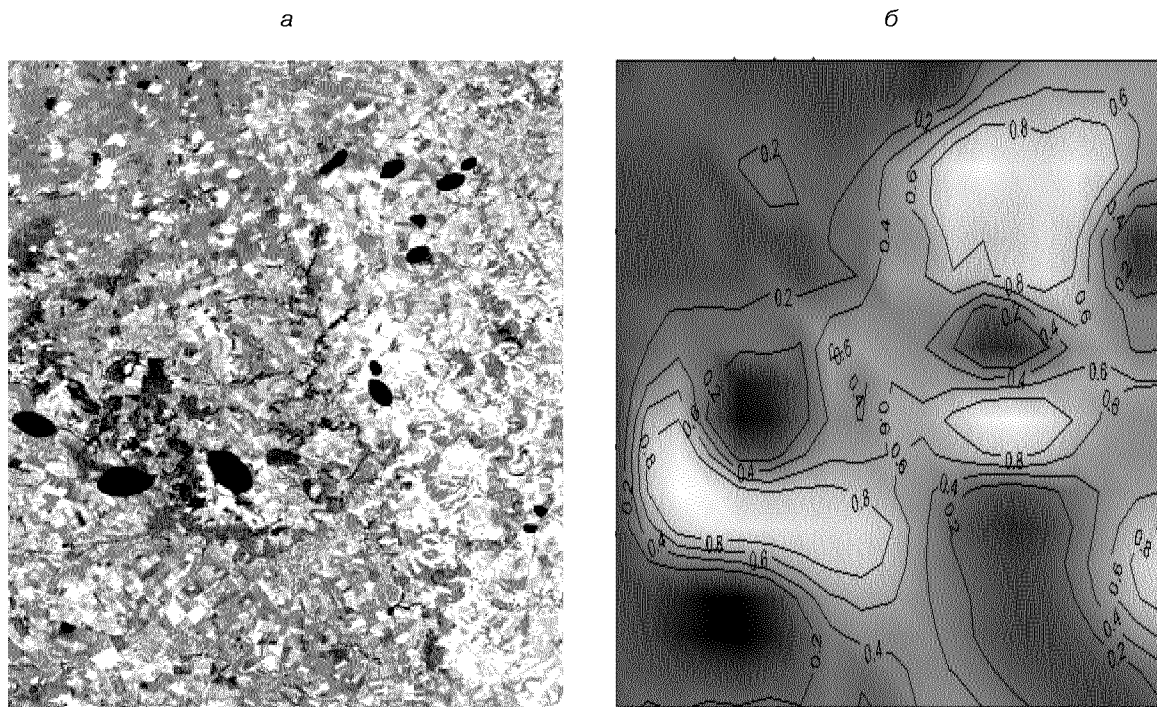


Рис. 2, *a* — космічний знімок «Landsat-7» ( $\lambda\lambda = 0.53\text{—}0.61$  мкм) експериментальної ділянки території Дніпровсько-Донецької западини (овалами чорного кольору позначені нафтопродуктивні ділянки — еталони), *б* — результати класифікації досліджуваної території (рівень нафтоперспективності ділянок пропорційний яскравості зображення)

даних про об'єми промислового виробництва (модуль  $X_2$ ) за пошуковий період відповідні коефіцієнти впливу були визначені на основі експертних оцінок. Коефіцієнти впливу рівнянь АВС-моделі наведені в табл. 2.

#### РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

На основі сформованої системи рівнянь (3) були проведені числові експерименти. Була поставлена задача отримати сценарії розвитку техногенного навантаження в Нікопольському гірничо-промисловому регіоні при змінному об'ємі виробництва продукції. При цьому всі модельовані процеси були представлені у безрозмірному вигляді в одній шкалі вимірів. На рис. 1 приведені результати моделювання розвитку техногенного навантаження в залежності від зміни об'єму виробництва. Видно, що модель адекватно реагує на зміну об'єму виробництва, яке приводить до відповідної зміни техногенного навантаження

та до зміни площ ділянок території, зайнятих природними, антропогенно-модифікованими, антропогенними і техногенно-індустріальними процесами.

#### ПРОГНОЗУВАННЯ НАФТОПЕРСПЕКТИВНОСТІ

Системне моделювання і прогноз нафтоперспективності ділянок території було виконано на фрагменті території (розміром  $60 \times 80$  км) Дніпровсько-Донецької западини (рис. 2). Досліджувана площа була розділена на 270 ділянок розміром  $4 \times 4$  км. Ці ділянки були прокалібровані за інформативними ознаками, які отримані в результаті дослідження відомих нафтопродуктивних ділянок, що були прийняті за еталон. За вихідну інформацію ми взяли параметри Хараліка, отримані при дешифруванні космічного знімка «Landsat-7» спектрального діапазону  $\lambda\lambda = 0.53\text{—}0.61$  мкм з просторовим розрізненням 30 м (рис. 2, *a*), і геологічні характеристики,

одержані за допомогою тематичних геологічних карт [2].

Для моделювання нафтопродуктивності коефіцієнти впливу для динамічної моделі визначалися на основі інформації, одержаної з еталонних ділянок. Для цього формувались рівняння динамічної моделі еталону, обчислювались кореляційні зв'язки та визначались коефіцієнти рівнянь АВС-моделі. Далі на основі космічної інформації ДЗЗ і наземних спостережень та отриманих на еталонах значеннях коефіцієнтів впливу оцінювалась наявність покладів нафти на досліджуваних ділянках шляхом моделювання процесу пошуку нафти за розв'язками рівнянь динамічної моделі (2).

Результати системного моделювання прогнозу покладів вуглеводнів у Дніпровсько-Донецькій западині (рис. 2, б) на основі АВС-методу підтверджують можливість побудови динамічних моделей природного середовища для прогнозування розвитку техногенного навантаження і оцінки нафтоперспективності окремих ділянок нафтогазоносної території. Метод адаптивного балансу впливів простіший в реалізації, ніж метод системної динаміки, і допускає використання спостережень для уточнення модельних сценаріїв розвитку, а це підвищує якість системного моделювання. Наявність архівних і статистичних даних для обчислення кореляційних зв'язків між процесами, що відбуваються в ПТС, дозволила об'єктивно визначити більшість коефіцієнтів рівнянь АВС-моделі без залучення суб'єктивних оцінок експертів.

Виконано моделювання сценаріїв змін техногенного навантаження в залежності від змін об'ємів промислового виробництва в Нікопольському гірничопромисловому районі і дана оцінка нафтоперспективності ділянок території Дніпровсько-Донецької западини на основі да-

них космічної інформації ДЗЗ і наземних спостережень.

1. Дьяконов К. Н., Касимов Н. С., Тикунов В. С. Современные методы географических исследований. — М.: Просвещение, 1996.—204 с.
2. Козлов З. В., Лукин А. Е., Федоровский А. Д. Прогноз залежей углеводородов в Днепро-Донецкой впадине на основе комплексной оценки космической информации ДЗЗ и наземных наблюдений // Доклады Национальной академии наук Украины.—2007.—№ 2.—С. 111—115.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1973.—832 с.
4. Ліщенко Л. П. Особливості вивчення ландшафтів на основі матеріалів дистанційних зйомок на прикладі Нікопольського промислового вузла // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. — Київ: ЦАКДЗ, 1999.—С. 162—164.
5. Лялько В. І., Маринич О. М., Федоровський О. Д. Аерокосмічні дослідження ландшафтних комплексів України // Укр. географ. журн.—1994.—№ 4.—С. 3—8.
6. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981.—487 с.
7. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М. Прогнозирование природных процессов методом адаптивного баланса влияния // Мор. гидрофиз. журн.—2004.—№ 5.—С. 53—63.
8. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.—225 с.

---

#### SYSTEM MODELLING OF THE NATURAL PROCESSES ON THE BASIS OF REMOTE SENSING DATA AND GROUND-BASED OBSERVATIONS

*E. N. Bodnar, Z. V. Kozlov, A. D. Fedorovsky*

System modelling for the ecological influence in the Nikopol mining region and for the oil productivity of the same parts of Dnieper-Donetsk Petroleum Bearing Province was performed on the basis of remote sensing data and ground-based observations.