

УДК 004.94:504.064.2

Єлісєєв В.В.

## Можливості комплексного моделювання і прогнозування стану довкілля за допомогою системи GRASS

*Автор аналізує проблему програмного забезпечення комплексного екологічного моделювання та обґрунтовує можливість і потенційно високу ефективність використання системи підтримки аналізу географічних ресурсів (GRASS) як середовища для створення комплексних моделей в галузі екології, природокористування та охорони навколишнього середовища.*

*The author considers the problem of complex environmental modeling software support and proves the possibility and potentially high efficiency of 'Geographical resources analysis support system' (GRASS) as an environment for creation of complex models in the field of environmental science, natural resources use and nature protection.*

**Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково-практичними задачами.** Аналіз сучасної ситуації в галузі програмного забезпечення моделювання стану довкілля характеризується декількома суперечливими тенденціями.

По-перше, існує актуальна потреба в надійних, перевірених та апробованих системах комплексного моделювання й прогнозування стану довкілля (в т.ч. його зміни внаслідок антропогенного навантаження) з метою підтримки прийняття рішень в галузі господарського управління.

По-друге, роботи в напрямку екологічного імітаційного моделювання ведуться численними колективами й окремими розробниками, які використовують різні методологічні й теоретичні підґрунтя, математичні апарати, а отримані часткові моделі характеризуються, як правило, такою програмною реалізацією, яка не дозволяє інтегрувати їх до комплексних моделей. І, хоча існують достатньо обнадійливі винятки, (див., зокрема, [6]), часткові моделі все ж таки не можуть ефективно використовуватись для комплексного екосистемного аналізу через їх неповноту щодо адекватного опису екосистемних процесів.

Ще одним проблемним аспектом є слабкий розвиток і формалізація теоретичних засад комплексного екологічного аналізу і моделювання. Існуючі загальні методики, такі як причинно-наслідкова схема DPSIR (Європейське бюро з охорони довкілля) або Total Risk Integrated Methodology (Агенція з охорони довкілля США), на думку автора, незважаючи на всю їх методологічну корисність при виконанні прикладного аналізу, не складають достатньої бази для відтворення екосистемних процесів у вигляді імітаційних моделей.

Указана суперечливість примушує вдатись до пошуку або розробки певного програмного середовища, яке б дозволяло з підсиленням методологічної бази поступово нарощувати потужність і комплексність екосистемних імітаційних моделей завдяки інтеграції до них часткових моделей та надавало б можливість перевіряти їх та калібрувати.

**Огляд публікацій і аналіз невирішених проблем.** Вивчення публікацій і онлайн-матеріалів, аналіз поточної ситуації й тенденцій на ринку програмного забезпечення, особистий досвід автора дозволяють зробити такі висновки.

В українських та російських джерелах використання спеціалізованих систем імітаційного моделювання (в т.ч. основаних на ГІС) в екологічній галузі розглядається, як правило, з точки зору розв'язання конкретних типових задач достатньо вузького плану або груп таких задач. Найчастішими прикладами є моделювання розповсюдження атмосферних забруднень та гідроекологічних процесів.

Комплексні моделі не розглядаються, прикладні програмні засоби виконання комплексного аналізу впливу на довкілля або імітаційного моделювання не описані.

У закордонних джерелах ця проблема, навпаки, активно обговорюється, пропонуються конкретні шляхи її вирішення [7], [16], [8]. У [8], зокрема, є відомості про спробу поєднання функціональності ГІС з апаратом імітаційного моделювання в межах програми Європейської комісії BRITE/Euram (Industrial and Materials Technologies) з метою отримання платформи для масштабованого комплексного екологічного імітаційного моделювання.

У [12] описуються основи використання многокритеріального аналізу в екологічному управлінні та плануванні, що методологічно є достатньо наближеним до комплексного екологічного аналізу.

Загальний висновок, зроблений автором після аналізу публікацій, полягає в тому, що прикладні спеціалізовані програмні засоби, придатні для описаних цілей, на сьогодні фактично відсутні.

У більшості випадків екологічна інформація має відношення до конкретних об'єктів або територій, які мають певну локалізацію і структуровані відповідно до місцевих фізико-географічних та кліматичних умов і господарської практики. Це примушує звертати увагу на можливість більш інтенсивного використання географічних інформаційних систем, і особливо останніх досягнень у цій галузі, для виконання комплексного екологічного аналізу. У свою чергу, ринкові особливості і достатньо жорстка конкуренція серед виробників ПЗ в секторі аналітичних та універсальних ГІС-додатків обумовлюють закритість архітектури і використання специфічних форматів даних, що є суттєвою перешкодою для поступового нарощування аналітичного потенціалу, про яке йшлося вище.

**Метою даної роботи** є виявлення такого програмного додатку, який би дозволяв ефективно вирішувати вказані проблеми (здійснення автоматизованого комплексного екологічного аналізу та створення комплексних імітаційних моделей) або закладав би підґрунтя для їх вирішення.

**Результати досліджень.** Як аналіз першоджерел, так і практичне використання автором програмних додатків різних класів (ГІС, систем моделювання, спеціалізованих і неспеціалізованих аналітичних додатків) протягом останніх декількох років дозволяють зробити висновок про те, що найбільш оптимальною платформою для розв'язання поставлених задач є GRASS (Система підтримки аналізу географічних ресурсів). Вона відповідає наступним умовам, які, очевидно, є важливими для цього: відкритість для змін; модульна архітектура; відсутність перешкод, пов'язаних з використанням алгоритмів і програмних елементів, захищених авторськими правами; розвинуті аналітичні можливості; доступність; наявність технічної і соціальної інфраструктури для колективної розробки різними групами й окремими розробниками, централізованого збереження версій наявного програмного коду [15].

Ця система 13 років розроблялась Дослідницькими лабораторіями будівельної промисловості (CERL) інженерних військ США. З 1995 р. CERL припинили роботи в цьому напрямку та розмістили програмний код GRASS для вільного доступу в Інтернет. З цього моменту розробку системи продовжували фахівці Університету Ганновера (Інститут фізичної географії та екології ландшафтів, Німеччина) та Університету Бейлор (США), а також міжнародна група незалежних розробників.

Сьогодні GRASS є безкоштовною системою, яка розповсюджується у відкритих програмних кодах за умовами універсальної громадської ліцензії GPL, що, зокрема, означає надання користувачеві прав на вільну модифікацію програмного коду та його використання, у т.ч. комерційне (раніше автор уже звертався до теми використання відкритого програмного забезпечення, див. [1]). Це сприяло достатньо широкому поширенню і застосуванню GRASS в університетському середовищі, науково-дослідних та інших організаціях, як альтернативи комерційним географічним інформаційним системам.

Важливою особливістю GRASS є її орієнтація на використання на платформах під управлінням ОС Linux.

За типом GRASS відноситься до гібридних растрово-векторних ГІС (див. [4]). Завдяки відкритості кодів вона є необмежено гнучкою та такою, що легко масштабується й модифікується.

За архітектурою це – модульна система. Модулі можуть розроблятися у вигляді бінарних та текстових пакетних командних файлів. Мова програмування архітектурою системи не лімітується – головною умовою є здатність операційної системи виконувати бінарні або текстові файли даного типу. Завдяки цьому модулі можуть бути виготовлені особами з різним ступенем володіння комп'ютерними навичками, що особливо корисно для фахівців-прикладників, які здатні виробляти складні алгоритми й методи, але не мають достатньої підготовки для безпосередньої їх реалізації у вигляді закінченого програмного продукту. Такі програми, якщо вони є відкритими, як правило, у подальшому обговорюються, піддаються критиці, модифікуються й удосконалюються ініціативними розробниками зі складу зацікавлених осіб.

Штатний інструментарій системи включає більше 300 модулів, зокрема, для роботи з растровими й векторними даними, оцифрування картографічного матеріалу, обробки мультиспектральних зображень тощо. Ще певна кількість додаткових модулів доступна в Інтернет.

GRASS має два типи інтерфейсів користувача – графічний інтерфейс та інтерфейс командного рядка. Графічний інтерфейс розширюється за рахунок можливості інтеграції з Quantum GIS – іншою відкритою, дружньою до користувача ГІС класу переглядачів. Користувач може легко створювати елементи графічного інтерфейсу для управління власними модулями засобами самої GRASS.

Результат виконання одного модуля можливо передавати на вхід наступного модуля в пакетному режимі, причому довжина такого конвеєра команд не обмежена. Саме це й закладає підґрунтя для легкої інтеграції часткових моделей та нарощування комплексності.

GRASS вже багаторазово застосовувався для реалізації часткових екологічних моделей з просторовою прив'язкою. Далі перелічено найбільш цікаві з розроблених моделей, які увійшли до репертуару засобів цієї системи (у дужках указані розробники). Це, зокрема:

- **AGNPS** – імітаційна модель для оцінки ґрунтової ерозії та руху споживних речовин із сільськогосподарських басейнів під впливом злив (Дослідницька служба Міністерства сільського господарства США) [17], [18];

- **ANSWERS** – система імітаційного моделювання поведінки басейну з переважаючим сільськогосподарським землекористуванням. Використовується для прогнозування ерозійних процесів, накопичення забруднюючих речовин у донних відкладеннях та оцінки якості вод (Університет Пурду, США).
- **CASC2D** – засіб створення імітаційних моделей з розподіленими параметрами для відтворення відгуку басейну водозбору на зливи. Алгоритм включає підмоделі перехоплення водних мас, інфільтрації та поверхневого стоку (Університет Колорадо, США) [11].
- **LE** – система ландшафтно-екологічного аналізу на основі даних супутникової зйомки (Університет Вайомінга, США) [5].
- **ROS** – система імітаційного моделювання поширення пожеж (Університет Рутгерс, США) [21].
- **SWAT** – прогнозна модель для оцінки впливу практики землеустрою на водні об'єкти, процеси накопичення відкладень і рух агрохімікатів у великих складних басейнах з різними типами ґрунтів і землекористування протягом тривалого періоду часу. SWAT побудований на основі ще декількох відомих сільськогосподарських моделей (Д. Арнольд, Дослідницька служба Міністерства сільського господарства США) [14].
- **TRIBS** – програма для визначення топології гідрологічної мережі (Дж. Ф. Стамм).
- **TOPMODEL** – програма імітаційного моделювання системи “опади-стік” на основі аналізу топографічних особливостей басейну водозбору.

GRASS також включає й інші моделі, але для демонстрації обмежимося лише вищезгаданими.

Автор має певний досвід використання GRASS в галузі екологічного моделювання. Зокрема, під його керівництвом у 2006 р. були захищені дві магістерські роботи, виконані з використанням цієї системи. Перша з них була присвячена моделюванню ерозійних процесів на схилах, спричинених зливовими опадами, у зв'язку з властивостями ґрунтів, метеорологічними умовами та агротехнічними заходами в межах певної ділянки Миколаївської області. У цій роботі для побудови моделі були адаптовані й використані класичне рівняння USLE [20] та інші алгоритми моделювання ерозійних процесів [13].

Друга робота була присвячена розробці методики автоматизованого оперативного планування зрошування на основі вологозберігаючих режимів з урахуванням комплексу супутніх чинників з використанням і вдосконаленням існуючої методики [2].

З метою підтвердження тези про придатність GRASS для інтеграції часткових моделей продемонструємо можливість реалізації окремого алгоритму природоохоронного моделювання на прикладі часто вживаної в задачах екологічного аналізу методики ОНД-86 (у розділі розрахунку приземних концентрацій для окремого точкового стаціонарного джерела промислових викидів) [3].

Коміркова модель цього процесу може бути створена в GRASS з використанням модулів картографічної алгебри (*r.mapcalc* та *r3.mapcalc*).

Зіставимо алгебру методики ОНД-86, утворену множиною параметрів і операцій над ними, з картографічною алгеброю, доступною в GRASS.

Алгебра алгоритму ОНД-86 включає множину операцій: порівняння ( $>$ ,  $\geq$ ,  $\leq$ ,  $<$ ,  $=$ ),  $+$ ,  $-$ ,  $\times$ ,  $*$ ,  $/$ , зведення у цілий і дрібний ступінь, витягнення квадратного й кубічного коренів, оператор розгалуження (умовне виконання гілок алгоритму), а також множину

параметрів, до складу представлених іменованими константами та змінними. Всі ці елементи входять також і до картографічної алгебри модулів `r*.mapcalc`.

Процес поширення забруднюючої речовини в повітрі характеризується її розсіянням в усіх напрямках, завдяки чому утворюється газоповітряний конус. Через це масив значень розрахункових концентрацій забруднюючої речовини не може бути адекватно переданий двовимірним картографічним зображенням.

Тривимірна картографічна алгебра модуля `GRASS r3.mapcalc` дозволяє генерувати растрові картографічні шари у трьох просторових координатах (т.зв. воксельні шари, від англ. *voxel* – об'ємний елемент зображення). Цей підхід суттєво відрізняється від уживаного в більшості сучасних ГІС, при якому замість реально тривимірних об'єктів генеруються та піддаються аналізу лише їх поверхні, тобто операції виконуються лише з альтиметричною інформацією (докладніше про це див. у [19]).

Дискретність моделей на основі воксельних шарів визначається роздільною здатністю растру, встановленою при створенні картографічного регіону чи при виконанні операції зміни роздільної здатності, і є довільною. Дискретність моделей на основі двовимірних піксельних шарів визначається в горизонтальній площині роздільною здатністю растру, а по вертикальній осі – довільним кроком.

Модуль `r.mapcalc` дозволяє встановлювати значення параметрів, які вводяться користувачем через графічний інтерфейс або як параметри командного рядку, тимчасові змінні, використовувати ці значення і будь-які доступні картографічні шари як операнди математичних виразів, застосовуючи до них множину математичних операцій, в т.ч.:  $\times$ ,  $/$ , операцію зведення до ступеня – функцію  $\exp(x,y)$ , операцію витягнення кореня – функцію  $\sqrt{x}$ , операцію розгалуження – функцію  $\text{if}(x,y,z,n)$ .

Процедура розрахунку приземної концентрації шкідливої речовини при викиді газоповітряної суміші з окремого точкового джерела з круглим гирлом на відстані  $x$  від джерела залежно від максимальної концентрації  $C_M$  на відстані  $x_M$  та від коефіцієнту швидкості осідання шкідливих речовин в атмосфері  $F$ :  $C = s_1 C_M$ , де  $C$  – шукана концентрація,  $s_1$  – безрозмірний коефіцієнт,  $C_M$  – максимальна приземна концентрація, причому:

$$s_1 = 3(x/x_M)^4 - 8(x/x_M)^3 - 6(x/x_M)^2 \text{ при } x/x_M < 1,$$

$$s_1 = \frac{1.13}{0.13(x/x_M)^2 + 1} \text{ при } 1 < x/x_M \leq 8,$$

$$s_1 = \frac{x/x_M}{3.58(x/x_M)^2 - 35.2(x/x_M) + 120} \text{ при } x/x_M > 8 \text{ и } F \leq 1.5,$$

$$s_1 = \frac{1}{0.1(x/x_M)^2 + 2.47(x/x_M) - 17.8} \text{ при } x/x_M > 8 \text{ и } F > 1.5,$$

може бути описана єдиним виразом – параметром командного рядка модуля `r.mapcalc`:

```
r.mapcalc "C=(if(xrel<1,3*exp(xrel,4)-8*exp(xrel,3)-
6*exp(xrel,2)+if(xrel>1 && xrel <=8,
1.13/(0.13*exp(xrel,2)+1)+if(xrel>8 &&
F<=1.5,xrel/(3.58*exp(xrel,2)-35.2*xrel+120)*Cmax"
```

де `xrel` – ім'я растрового картографічного шару, на якому розрахована матриця значень відношення відстані кожного пікселя  $x$  до чисельного значення змінної  $x_{\max}$ ,  $C_{\max}$  – змінна для значення максимальної концентрації.

Як правило, для проведення подібних розрахунків додатково використовують мови програмування, що інтерпретуються. Зокрема, одним зі зручних шляхів структурованої

легко читаної реалізації алгоритмів є сполучення можливостей мови одного з командних інтерпретаторів – `bash`, `sh` (присвоєння значень змінним, виклик команд – модулів GRASS), і засобів GRASS (визначення параметрів модулів, у т.ч. виразів – операцій картографічної алгебри, препроцесор описів графічного інтерфейсу).

У цілому ж картографічна алгебра модулів `r.mapcalc` і `r3.mapcalc` є набагато складнішою і дозволяє вживати набагато ширший діапазон картографічних операцій.

Розташування стаціонарних джерел забруднення атмосферного повітря може бути вказано безпосередньо в графічному вікні на одному з картографічних шарів через створення векторних або растрових об'єктів з визначенням їх властивостей у базі даних атрибутивної інформації.

Виведення результатів моделювання можливо здійснювати декількома шляхами: у вигляді двовимірних растрових зображень, тривимірних растрових зображень та текстової інформації.

Растрова функціональність цієї системи разом з можливістю створення анімованих 3-вимірних картографічних зображень з тематичним кольоровим кодуванням робить її ідеальним середовищем для побудови імітаційних коміркових моделей з просторовою прив'язкою.

Викладені положення, а також досвід інших дослідників дозволяють зробити висновок про можливість і потенційно високу ефективність використання GRASS як середовища для створення комплексних моделей у галузі екології, природокористування та охорони навколишнього середовища.

## Література

1. Єлісеєв В.В. Використання вільно доступного програмного забезпечення в цілях підвищення екологічної безпеки // Наукові праці МДГУ: Науково-методичний журнал. – Т. 41. – Вип. 28. – Техногенна безпека. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2005. – С. 108-110.
2. Лысогоров С.Д., Ушкаренко В.А. Практикум по орошаемому земледелию. – М.: Агропромиздат, 1985. – 128 с.
3. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 112 с.
4. Светличный А.А. Географические информационные системы: технология и приложения / А.А. Светличный, В.Н. Андерсон, С.В. Плотницкий. – Одесса: Астропринт, 1997. – 196 с.
5. Baker, W. L., Cai Y. The r.le programs for multiscale analysis of landscape structure using the GRASS geographical information system // Landscape Ecology. – No 7. – 1992. – pp. 291-302.
6. Bicknell B.R. etc. Hydrological Simulation Program – Fortran (HSPF). User's Manual for Release 12. / U.S. EPA National Exposure Research Laboratory, Athens; U.S. Geological Survey, Water Resources Division, Reston, VA. – 2001.
7. Computer Inteligent Processing Technologies (CIPTs): Tools for Analysing Environmental Data: Technical Report 2 / European Environmental Agency; Earth Observation Sciences Ltd. – Copenhagen: EEA, 1998. – 134 p.
8. Fatta D., Moll St. Assessment of Information Related to Waste and Material Flows: A catalogue of Methods and Tools: Technical Report 96 / European Environmental Agency. – Copenhagen: EEA, 2003. – 63 p.
9. GRASS GIS 6.0 Tutorial. Version 1.2. – 2005. – 149 p.
10. Holl S., Mitasova H. and Neteler M. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS): More Than a Mapping Tool. – 2006. – URL: <http://www.oracle.com/technology/pub/articles/mitasova-grass.html>
11. Julien, P., Saghafian, B., Ogden F. Raster-Based Hydrologic Modeling of Spatially-Variied Surface Runoff // Water Resources Bulletin. – No 31(3). – 1994. – pp. 523-536.
12. Lahdelma R., Salminen P., Hokkanen J. Profile using multi-criteria methods in environmental planning and management // Environmental management. – Vol. 26, No 6. – 2000. – pp. 595-605.
13. Mitasova, H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R., Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS // Int. Journal of Geographical Information Science. – No 10(5). – pp. 629-641.
14. Neitsch S.L., Arnold J.G., Williams J.R. Soil and water assessment tool. User's manual. Version 98.1 / Grassland, Soil and Water Research Laboratory ARS. Blackland Research Center. – 1999. – 195 p.
15. Neteler M., Mitasova H. Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. Second Edition Kluwer Academic Publishers / Springer. – Boston, 2004. – 424 p.
16. Peirce M. Computer-Based Models in Integrated Environmental Assessment: Technical Report 14 / European Environmental Agency; AEA Technology, UK. – Copenhagen: EEA, 1998. – 60 p.
17. Srinivasan R., Engel B.A. A Knowledge Based Approach to Extract Input Data From GIS // American Society of Agriculatural Engineers Paper No. 91-7045. – 1991.
18. Young R.A., Onstad C.A., Bosch D.D., Anderson W.P. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds // Jour. of Soil and Water Conservation. – 1989. – Vol. 44. – No 2.

19. Vitti A., 3d phenomena modeling in GRASS: implementation and applications. Geomatics workbooks, 2004, v. 3, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Trento, URL: <http://geomatrica.como.polimi.it/workbooks/n3/articoli/av.pdf>
20. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning // U.S. Dept. Agric. Handbook No. 537. – 1978.
21. Xu J. Simulating the spread of wildfires using a geographic information system and remote sensing, Ph. D. Dissertation /Rutgers University. – New Jersey. – 1994.