

УДК 502.7:004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-29>

Геннадій ШВАЧИЧ

доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID: 0000-0002-9439-5511

Scopus Author ID: 56509642500

Павло ІЩУК

аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID: 0000-0001-6399-6771

Бібліографічний опис статті: Швачич, Г., Іщук, П. (2024). Ідентифікація динаміки довкілля: виклики та перспективи розподіленого моделювання. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 4, 235–241, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-29>

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІКИ ДОВКІЛЛЯ: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗПОДІЛЕНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Дослідження спрямовані на розв'язок коефіцієнтних задач екології методами розподіленого моделювання.

Мета роботи полягає у моделюванні процесів забруднення атмосфери, які адекватні до тих, що описують реальні процеси. При цьому виникає можливість досліджувати такі питання як детальний аналіз стану атмосфери міста або промислового району, короткостроковий прогноз якості повітря в регіоні, оцінка довгострокових програм по очищенню повітря, оптимальне управління викидами, трансграничне перенесення і т. п.

Методологія. Розглядаються обернені задачі екології, постановка яких формулюється через аналіз взаємозв'язків типу «причина-наслідок». Причинні характеристики екологічного процесу, згідно з прийнятою математичною моделлю, визначаються коефіцієнтами рівняння перенесення шкідливих домішок. У такій інтерпретації встановлення причинно-наслідкових зв'язків є метою прямих задач екології. У протилежному випадку, якщо необхідно відновити причинні характеристики за інформацією про поле забруднення атмосфери, формулюється одна з постановок зворотних задач екології, які належать до класу некоректних задач за Адамаром.

Наукова новизна проведених досліджень полягає у розробці нового підходу до обробки даних на всіх етапах екологічного експерименту із застосуванням сучасних обчислювальних засобів. Обчислювальні експерименти виконувалися із застосуванням розподілених паралельних обчислювальних систем. Це зумовлено не лише принциповими обмеженнями максимальної швидкодії звичайних послідовних ЕОМ, але й постійною наявністю задач, для розв'язування яких існуючі обчислювальні ресурси виявляються недостатніми. До таких задач належать, зокрема, задачі моделювання клімату.

Висновки. У даних дослідженнях розглянуті постановка і методи розв'язку задач ідентифікації динаміки довкілля, суть яких полягає в оцінці вхідних параметрів за фактичною інформацією про модельовану систему, відому з експерименту. Для аналізу оцінки можливості реалізації математичних моделей на засобах обчислювальної техніки був розроблений комплекс програм для розрахунку перенесення шкідливих домішок. Наведено розв'язок тестової задачі щодо ідентифікації динаміки довкілля.

Ключові слова: екологія, розподілене моделювання, обернені задачі, пакет програм, експеримент, довкілля.

Hennadii SHVACHYCH

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, sgg1@ukr.net

ORCID: 0000-0002-9439-5511

Scopus Author ID: 56509642500

Pavlo ISHCHUK

Postgraduate Student at the Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, Vinceras@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6399-6771

To cite this article: Shvachych, H., Ishchuk, P. (2024). Identyfikatsiia dynamiky dovkillia: vyklyky ta perspektyvy rozpodilenooho modeliuвання [Identification of environmental dynamics: challenges and prospects of distributed modeling]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 4, 235–241, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-29>

IDENTIFICATION OF ENVIRONMENTAL DYNAMICS: CHALLENGES AND PROSPECTS OF DISTRIBUTED MODELING

The research is of significant importance as it aims to effectively address and solve coefficient problems in ecology using distributed modeling methods.

The work aims to model atmospheric pollution processes that are not only adequate to those describing real processes but also have practical applications. This provides an opportunity to investigate and address issues such as a detailed analysis of the atmosphere state of a city or industrial area, short-term forecast of air quality in the region, assessment of long-term air purification programs, optimal emission management, transboundary transfer, etc.

Methodology. Inverse ecological problems, which involve determining the cause of an observed effect, are considered and formulated through the analysis of cause-effect relationships. According to the adopted mathematical model, the ecological process's causal characteristics are determined by the coefficients of the equation for the transfer of harmful impurities. In this interpretation, establishing cause-effect relationships is the goal of direct ecological problems, which involve determining the effect of a known cause. In the opposite case, if it is necessary to restore the causal characteristics based on information about the atmospheric pollution field, one of the formulations of inverse ecological problems is formulated, which belongs to the class of Hadamard-incorrect problems.

The scientific novelty of the conducted research is a significant breakthrough in the field. It lies in developing a new approach to data processing at all stages of an ecological experiment using modern computing resources. Computational experiments were performed using distributed parallel computing systems. This is not only due to the fundamental limitations of the maximum speed of conventional sequential computers but also to the constant presence of problems for the solution of which existing computing resources are insufficient. Such problems include, in particular, climate modeling problems.

Conclusions. These studies consider the formulation and methods of solving problems of identifying environmental dynamics, which essence is to estimate input parameters based on actual information about the modeled system known from the experiment. To analyze the assessment of the possibility of implementing mathematical models using computer technology, a set of programs was developed to calculate the transfer of harmful impurities. The solution of the test problem of identifying environmental dynamics is presented.

Key words: ecology, distributed modeling, inverse problems, software package, experiment, environment.

Актуальність проблеми. Бурхливий розвиток промисловості в усіх країнах світу поставив перед людством гостру проблему охорони довкілля з метою збереження екологічних систем, що історично сформувалися в різних регіонах нашої планети. У зв'язку з цим екологічна наука нині просто-таки вимушена займатися проблемами невідомої раніше складності. Нові завдання вимагають і нових способів їх рішення. Але вже сьогодні математичне моделювання, обчислювальний експеримент на паралельних кластерних системах з досить повним математичним наповненням тих явищ, які ми вивчаємо, утворює основу нової технології наукового пошуку, аналізу і прогнозу (Петрик, 2020; Семеренко, 2018). Реальність сьогоднішнього дня полягає в тому, що у зв'язку з розвитком паралельних обчислень і, особливо з появою обчислювальних кластерів, зникли принципи

проблеми в потенційно нескінченному збільшенні пікової продуктивності комп'ютерів (Shvachych, 2021; Shvachych, 2022). Це відкриває шлях до широкого застосування математичного моделювання, що зробить результативнішими як фундаментальні, так і прикладні дослідження (Moroz, 2020; Shvachych, 2021). Отже, проблема ідентифікації динаміки довкілля є на сьогоднішній день актуальною та першочерговою.

Постановка задачі. Важливим завданням нині є прогнозування змін екологічних систем під впливом природних процесів і антропогенного впливу (Matuziś, 2024). Теоретичне дослідження таких явищ базується на загальнодоступних моделях механіки суцільних середовищ і, зокрема, на рівняннях Нав'є-Стоксу, на рівняннях енергії і турбулентної дифузії, встановлених ще в позаминулому столітті і перевірених

в численних експериментах. У математичному вираженні це системи багатовимірних нелінійних рівнянь, що мають в лінеаризованому вигляді форму лінійних взаємозв'язаних задач з початковими даними в еволюційній векторній формі Коши-Ковалевської (Швачич, 2008):

$$\frac{Df}{Dt} = Af, \quad (1)$$

$$f|_{t=t_0} = f_{\Delta}, \quad (2)$$

де: D/Dt – субстанціональна похідна;

A – оператор, що включає просторові змінні і дисипативні функції;

f – шукана вектор-функція залежних змінних.

Суть проблем аеродинаміки довкілля полягає в тому, щоб описати поширення в природних середовищах різних забрудників, які викидаються в довкілля. При цьому перенесення забруднюючих речовин визначається двома процесами. Ці процеси включають конвективне перенесення через усереднений рух середовища та дифузію, викликану турбулентністю. Відповідно, математична модель (1), (2) повинна адекватно відображати як розподіл середніх швидкостей, так і особливості турбулентної дифузії. Зважаючи на це рівняння усередненого руху містять члени турбулентного перенесення (турбулентна напруга), то для замикання турбулентної задачі можна використовувати цілком певні моделі турбулентності (Vozna, 2021; Lienhart, 2002). У ідеальному випадку модель турбулентності має бути настільки загальною, щоб для усіх практично важливих задач її можна було застосувати без змін. Зауважимо, що моделі з двома рівняннями перенесення типу κ - ε є найбільш зручними при моделюванні подібних течій.

Мета даної роботи полягає у моделюванні процесів забруднення атмосфери на основі моделей (1), (2), які адекватно тих, що описують реальні процеси. При цьому виникає можливість досліджувати такі питання як детальний аналіз стану атмосфери міста або промислового району, короткостроковий прогноз якості повітря в регіоні, оцінка довгострокових програм по очищенню повітря, оптимальне управління викидами, трансграничне перенесення і т. п.

Основні результати досліджень. Розглянемо деяку область Ω , обмежену підстилаючою поверхнею S_0 з лінійними розмірами L , вільними бічними і верхньою S_n поверхнями в декартовій системі координат.

Поверхня S_0 в прийнятій системі координат є функцією горизонтальних змінних x, y , що

враховують рельєф місцевості, міську забудову та інші неоднорідності на поверхні Землі. Верхня межа S_n в загальному випадку може змінюватися в часі і в просторі. У окремому випадку, коли поверхні S_0 і S_n площини, простір регіону представляється у вигляді паралелепіпеда.

У багатьох завданнях математичної фізики тимчасова змінна t в (1), (2) грає особливу роль. Обчислювальний алгоритм в таких задачах складається з актів переходу системи від одного стану до іншого. Для механіки суцільних середовищ система диференціальних рівнянь (СДР) (1) є СДР у частинних похідних другого порядку. Тому до умови (2) необхідно додати граничні умови. Необхідні граничні умови і належний їх вибір залежить від фізичної постановки задачі. Для даного класу задач на поверхні S_0 задаються умови прилипання для поля швидкостей, а також граничні умови 1-3 або 4-го роду для температурних або концентраційних функцій. Верхня межа S_n розрахункової області задається або як межа атмосферного пограничного шару, або як межа інверсійного шару (Лаврик, 2010). Умови на вільних поверхнях (бічних поверхнях розрахункової області) зазвичай спирається на припущення про загасання мезо-масштабних обурень на межах розрахункової області. Проте, для при складному рельєфі місцевості обурення поширюються на дуже великі відстані. У зв'язку з цим розумніше на вільних межах задавати граничні умови 1-го роду, уточнюючи їх значення за конкретних умов шляхом порівняння з даними натурних випробувань. Окрім цього, необхідно відмітити, що місце розташування вільних меж не може бути фіксованим. Тому у ряді випадків доцільно задавати прозорі межі, т. т. умови 4-го роду, коли на розрахунковій межі області витримується умова безперервності шуканих функцій і її градієнтів, але при цьому при цьому враховується поведінка шуканих функцій на значних відстанях від вільних меж розрахункової області.

Таким чином, математична модель (1), (2) із заданою областю визначення (рис. 1) і заданими граничними умовами, визначена і достатня для реалізації у вигляді програмних засобів на скалярних або паралельних обчислювальних пристроях (Башков, 2011; Іващенко, 2011). Хід розв'язання, за якого при заданих умовах однозначності, що стосуються причинних характеристик досліджуваного процесу, буде визначати певний стан довкілля. За таких умов його можна розглядати як розв'язок прямої задачі. З точки зору співвідношень причина – наслідок

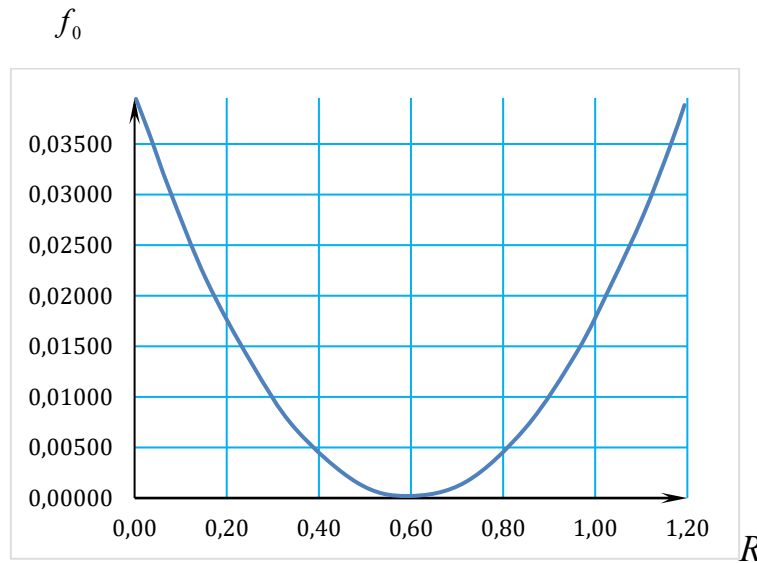


Рис. 1. Графічна інтерпретація розв'язку коефіцієнтної оберненої задачі для визначення потужності точкового джерела забруднення

кожній прямій задачі, в межах прийнятої структури (1), (2), може бути зіставлена деяка безліччю обернених задач. Отже, встановлення причинно – наслідкових зв'язків складає ланцюг прямих задач екології. І навпаки, якщо за певною інформацією про стан довкілля вимагається відновити причинні характеристики, то маємо ту або іншу постановку оберненої задачі. Таким чином, розв'язок будь-якої конкретної задачі з цього класу визначається не лише як функція просторових координат і часу, але і як функція вхідних параметрів R . Тоді розв'язок прямої задачі (1), (2) реалізує перетворення

$$f = f_R(x, y, z, t, R), \quad (3)$$

де R – вектор – функція причинних параметрів.

Розглядаючи математичну модель, де параметрами, що управляють, є компоненти R , сформулюємо мету управління. Вибиратимемо управління R з умови певної узгодженості відомої з експерименту функції $f = f_e(t)$ з розрахунковим значенням з $f = f_p(t)$, обчисленим за допомогою моделі і такою, що відповідає цьому управлінню R . Нехай окрім керованого об'єкту і поставленої мети управління задано і критерій якості, представлений у вигляді функціонала

$$J(R) = \int_{t_0}^{t_k} Y(R, f_p(t), f_e(t)) dt \quad (4)$$

де $Y(R, f_p, f_e)$ – відома скалярна функція, безперервна разом з усіма частинними похідними за всією сукупністю аргументів. Варіюючи параметрами, що управляють, набуватимемо різних

значень функціонала в просторі керованих параметрів. Таким чином, розв'язок будь-якої оберненої задачі полягатиме в тому, щоб знайти таке управління, що реалізує мету, для якої функціонал (4) на розв'язках керованої системи приймає можливе найменше значення. Для розв'язків сформульованих обернених задач застосовуються чисельні методи теорії оптимізації, що використовують принципи максимуму Понтрягіна, Белмана та інші. При цьому можливі два випадки:

- 1) оптимальне розв'язок відшукається в просторі параметрів;
- 2) задача оптимізації розв'язується у функціональному просторі.

Ці два різні підходи застосовані для розв'язку обернених задач теорії теплопровідності за допомогою одного класу ітераційних методів, відомих під назвою градієнтних. У точній екстремальній постановці визначення параметрів управління відповідає мінімізації середньоквадратичної нев'язки, що характеризує ухилення розрахункової функції від експериментальної в метриці простору вхідних даних. В цьому випадку як ухилення приймається значення функціонала (4), де $Y(t) = (f_p(t) - f_e(t))^2$. Величина функціонала з такою нев'язкою для цього випадку є функціоналом в просторі параметрів управління і його числовим значенням визначає відстань між $f_p(A, t)$ і $f_e(A, t)$ у функціональному просторі L_2 . Для одновимірних просторових задач з одним, максимум двома параметрами управління, рішення зворотних задач в такій постановці досить просто зводиться до визначення мінімуму функції багатьох змінних.

Для згладжених експериментальних даних, допустимо, процедурою сплайн – згладжування або пропустивши їх через фільтр, отримаємо функцію $I(R)$, що має достатній запас аналітичної. Тоді в околі її мінімуму допускається розкладання в ряд Тейлора:

$$J_{p+\varepsilon_{R,1}}(\varepsilon_R) = J_{p,1} + \varepsilon_R J_{p,2} + \varepsilon_R^2 J_{p,3} + \dots \quad (5)$$

де

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_R &= \frac{R - R_p}{R_{p+1} - R_p} \in [-1, 1], \\ J_{p,2} &= \frac{1}{2}(J_{p+1,1} - J_{p-1,1}) \\ J_{p,3} &= \frac{1}{2}(J_{p+1,1} + J_{p-1,1} - 2J_{p,1}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

безрозмірний нормований аргумент і значення тейлоровських компонент, представлених на вузлах рівномірної сітки $p = 1, 2m - 1$ центральними різницями. Прирівнявши частинну похідну від (5) по ε_r , отримаємо відому інтерполяційну формулу

$$R = R_p - \frac{(R_{p+1} - R_p)}{2} \frac{(J_{p+1,1} - J_{p-1,1})}{(J_{p+1,1} + J_{p-1,1} - 2J_{p,1})}, \quad (7)$$

яку можна використовувати для уточнення параметра управління.

Рішення зворотної задачі в такій постановці складається з двох етапів. Перший етап передбачає процес відокремлення мінімуму функціонала на виконання умови

$$(J_{p,1} \times J_{p+1,1}) < 0, \quad p = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

коли $J_{p,1}$ та $J_{p+1,1}$ мають різні знаки. Тут значення R_p і R_{p+1} можуть бути вибрані з апріорної інформації досить довільно. Зрозуміло, що при виконанні умови (8) іміп лежить десь між цими точками. Довизначивши значення функціонала в центральному вузлі, подальше його уточнення реалізується по формулі (7).

Для двох параметрів $R_1 = \alpha$ і $R = \beta$ будується таблиця сіткових функцій $J_{p,1}^{\alpha, \beta}$. Процедура відділення мінімуму досить просто вирішується методом простого сортування і далі уточнюється за інтерполяційними формулами типу (7).

Отже, розв'язок будь-якої оберненої задачі з цього класу полягатиме в тому, щоб знайти таке управління, що реалізовує мету, для якого відповідний функціонал на рішеннях керованої системи приймає можливе найменше значення. У такій постановці розв'язок тієї або іншої оберненої задачі може бути

реалізоване методом, розробленим в цій роботі.

Результати моделювання процесу ідентифікації динаміки доквілля. Проілюструємо запропонований в роботі підхід для розв'язку деякої прикладної задачі. У цій роботі демонструється паралельна обробка інформації та паралельний тип мислення на прикладі використання багатопроекторної обчислювальної системи (Башков, 2011; Іващенко, 2011). Завдяки цьому підходу проводилися обчислювальні експерименти.

Тестова задача. Розглянемо розв'язок оберненої задачі з метою визначення потужності джерела Q , що викидає в атмосферу шкідливі домішки. В якості додаткової вхідної інформації, відомої з експерименту, виступає функція:

$$\phi_{|x=x_*} = \phi_e,$$

де x_* – відома координата, а права частина відповідає значенню функції, відомої з експерименту.

На рис. 1 приведені результати розв'язку цієї задачі при точних значеннях функції ϕ_e , відомої з експерименту. По осі абсцис відкладалося значення параметра управління $R = Q$, по осі ординат – квадрата нев'язки $f_0 = (\phi_e - \phi_p)^2$.

Екстремум нев'язки відповідає точці мінімуму цієї функції, що має абсцису:

$$Q \approx 0.6 \text{ [кг / с]},$$

і ординату

$$f_0 \approx 0,$$

що відповідає точному розв'язку прямої задачі, представленої в цій редакції на рис. 1.

Висновки

1. У цій роботі розглянуті постановка і методи розв'язку задач ідентифікації динаміки доквілля, суть яких полягає в оцінці вхідних параметрів за фактичною інформацією про модельовану систему, відому з експерименту.

2. Для аналізу оцінки можливості реалізації математичних моделей на засобах обчислювальної техніки був розроблений комплекс програм для розрахунку перенесення шкідливих домішок. Наведено розв'язок тестової задачі щодо ідентифікації динаміки доквілля.

3. Ідентифікація процесів перенесення шкідливих домішок в атмосфері оберненими методами може бути використана для визначення за експериментальними даними коефіцієнтів рівняння, параметрів джерел забруднення, параметрів граничних функцій і т. п.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Петрик М. Р., Бойко І. В. Високопродуктивні обчислення та математичне моделювання в наукових дослідженнях. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2020. 108 с.
2. Семеренко В. П. Технології паралельних обчислень : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2018. 104 с.
3. Shvachych G. Implementation of system software of multiprocessor computing systems for solving applied tasks. *Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки* : монографія / G. G. Shvachych, D. M. Moroz. Дніпро: 2021. С. 111–136.
4. Shvachych G., Shcherbyna P., Moroz D. Aggregation of computing channels based on the Nvidia Cuda platform for control modes of components of technological systems. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2022. № 2. P. 85–92.
5. Shvachych G., Moroz B., Martynenko A., Hulina I., Busygin V., Moroz D. Model of Speed Spheroidization of Metals and Alloys Based on Multiprocessor Computing Complexes. *Machine Learning for Predictive Analysis. Networks and Systems*. Springer. 2020. P. 33–41.
6. Shvachych G., Vozna N., Ivashchenko O., Bilyi O., Moroz D. Efficient algorithms for parallelizing tridiagonal systems of equations. *System technologies*. Dnipro. 2021. № 5 (136). P. 110–119.
7. I. Mamuzić G. G. Shvachych P. O. Ishchuk Challenges of Parallel Numerical Integration of Pollution Transport Equations. *Book of abstracts of the 17th International Symposium of Croatian Metallurgical Society – SHNM '2004 Materials and metallurgy (published in Metalurgija 63 (2024) 3-4)*, P. 477–492.
8. Швачич Г. Г., Шмукин А. А. Особенности конструирования параллельных вычислительных алгоритмов для ПЭВМ в задачах тепло- и массообмена. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2004. № 3. С. 42–47.
9. Shvachych G., Vozna N., Ivashchenko O., Bilyi O., Moroz D. Method of lines in distributed problems of experimental data processing. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2021. № 2(52). P. 1–7.
10. Lienhart H., Stoots C., Becker S. Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model). *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III*. 2002. Vol. 12, p. 323–330.
11. Лаврик В. І. Моделювання і прогнозування стану доквілля : [навч. посіб]. / В. І. Лаврик. К. : ВД КМ Академія, 2010. 400 с.
12. Башков Є. О., Іващенко В. П., Швачич Г. Г. Високопродуктивна багатопроекторна система на базі персонального обчислювального кластера. *Проблеми моделювання та автоматизації проектування*. 2011. Вип. 9 (179). С. 312–324.
13. Пат. 61944 Україна, МПК С21D 1/26, G06F 15/16 (2011.01). Модуль високоефективної багатопроекторної системи підвищеної готовності / Іващенко В.П., Башков Є.О., Швачич Г.Г., Ткач М.О. ; патентовласники Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № у 2010 09341; заявл. 26.07.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.

REFERENCES:

1. Petryk, M. R. & Boiko, I. V. (2020). Vysokoproduktyvni obchyslennia ta matematychno modeliuвання v naukovykh doslidzhenniakh [High performance computing and math modeling in scientific research]. Ternopil : Ternopilskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet imeni Ivana Puliuia. 108 s.
2. Semerenko, V. P. (2018). Tekhnolohii paralelnykh obchyslen [Parallel computing technologies]. Vinnytsia : VNTU. 104 s.
3. Shvachych, G. & Moroz, D. (2021). Implementation of system software of multiprocessor computing systems for solving applied tasks. *Aktualni napriamy rozvytku tekhnichnoho ta vyrobnychoho potentsialu natsionalnoi ekonomiky : monohrafiia [Current trends in the development of the technical and production potential of the national economy: monograph]*. Dnipro. s. 111–136.
4. Shvachych, G., Shcherbyna, P. & Moroz D. (2022). Aggregation of computing channels based on the Nvidia Cuda platform for control modes of components of technological systems. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. № 2. s. 85–92.
5. Shvachych, G., Moroz, B., Martynenko, A., Hulina, I., Busygin, V. & Moroz, D. (2020). Model of Speed Spheroidization of Metals and Alloys Based on Multiprocessor Computing Complexes. *Machine Learning for Predictive Analysis. Networks and Systems*. Springer. P. 33–41.
6. Shvachych, G., Vozna, N., Ivashchenko, O., Bilyi, O. & Moroz D. (2021). Efficient algorithms for parallelizing tridiagonal systems of equations. *System technologies*. Dnipro. № 5 (136). P. 110–119.

7. I. Mamuzić, G. G. Shvachych & P. O. Ishchuk (2024). Challenges of Parallel Numerical Integration of Pollution Transport Equations. *Book of abstracts of the 17th International Symposium of Croatian Metallurgical Society – SHNM ‘2004 Materials and metallurgy (published in Metalurgija 63 (2024) 3-4)*, P. 477–492.
8. Shvachych, H. H. & Shmukyn A. A. (2004). Osobennosti konstruyrovaniya paralelnykh vychyslytelnykh alhorytmov dlia PЭVM v zadachakh teplo- y massoobmena [Peculiarities of designing parallel computational algorithms for PCs in heat and mass transfer problems]. *Vostochno-evropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnolohiy [Eastern European journal of advanced technologies]*. № 3. s. 42–47.
9. Shvachych, G., Vozna, N., Ivashchenko, O., Bilyi, O. & Moroz, D. (2021). Method of lines in distributed problems of experimental data processing. *International Academy Journal Web of Scholar*. № 2(52). P. 1–7.
10. Lienhart, H., Stoots, C. & Becker S. (2002). Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model). *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III*. Vol. 12, p. 323–330.
11. Lavryk, V. I. (2010). Modeliuvannia i prohnouzuvannia stanu dovkillia [Modeling and forecasting of the state of the environment]. K. : VD KM Akademiia. 400 s.
12. Bashkov, Ye. O., Ivashchenko, V. P. & Shvachych, H. H. (2011). Vysokoproduktyvna bahatoprotsesorna systema na bazi personalnoho obchysliuvalnoho klastera [A high-performance multiprocessor system based on a personal computing cluster]. *Problemy modeliuvannia ta avtomatyzatsii proektuvannia [Problems of modeling and design automation]*. 2. Vyp. 9 (179). S. 312–324.
13. Pat. 61944 Ukraina, MPKC21D 1/26, G06F 15/16 (2011.01). Modul vysokoefektyvnoi bahatoprotsesornoii systemy pidvyshchenoi hotovnosti [Module of a highly efficient multiprocessor system of high availability]/ Ivashchenko, V.P., Bashkov, Ye.O., Shvachych, H.H., Tkach, M.O.; patentovlasnyky Natsionalna metalurhiina akademiia Ukrainy, Donetskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. № u 2010 09341; zaiavl. 26.07.2010; opubl. 10.03.2011, Biul. № 5.