



КАЛЕНЧУК-ПОРХАНОВА
Анжеліна Олексіївна —
кандидат фізико-математичних
наук, провідний науковий
співробітник відділу
автоматизації програмування
Інституту кібернетики
ім. В.М. Глушкова НАН України



ТУЛЬЧИНСЬКИЙ
Вадим Григорович —
доктор фізико-математичних
наук, завідувач відділу
автоматизації програмування
Інституту кібернетики
ім. В.М. Глушкова НАН України

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПРИРОДНИХ ОБ'ЄКТІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Статтю присвячено фундаментальним і прикладним напрямкам робіт Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, пов'язаним з вирішенням проблем аналізу ризиків виникнення надзвичайних ситуацій, забезпечення безпеки функціонування екологічних систем, дослідженням та прогнозуванням складних динамічних процесів у неоднорідних середовищах, розробленням методів математичного моделювання і комплексів їх чисельної реалізації, створенням високонадійних систем захисту інформації та автоматизованих систем математичного моделювання станів об'єктів навколишнього середовища. Наявність в Інституті кібернетики фахівців високої кваліфікації та потужного обчислювального ресурсу дозволяє гарантувати достовірність результатів при вирішенні складних наукових проблем. У статті також згадуються деякі пов'язані з Чорнобильською катастрофою події, які мають безпосередній зв'язок з обговорюваними напрямками робіт.

Ключові слова: математичне моделювання, екологічні проблеми, неоднорідне середовище, складні процеси, навколишнє природне середовище, автоматизовані системи.

В Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України традиційно ведуться фундаментальні дослідження з широкого спектра наукових проблем з використанням методів математичного та імітаційного моделювання процесів і явищ у складних системах, пов'язаних з різними сферами розвитку суспільства, зокрема з охороною навколишнього середовища та суміжними галузями. Аварія на Чорнобильській АЕС свого часу стала поштовхом для подальшого розвитку в Інституті робіт екологічного спрямування. У перші дні після аварії з огляду на реальну загрозу радіаційного забруднення природних вод держава і керівництво Академії поставили перед Інститутом складне завдання щодо організації оперативного отримання даних про поточну екологічну обстановку та прогнозування стану вод Київського водосховища й річок Дніпровського басейну.

Під керівництвом тодішнього директора Інституту кібернетики академіка В.С. Михалевича на початку травня 1986 р.

співробітники установи разом з колегами з лєнінградських інститутів озерознавства і соціально-економічних проблем адаптували для умов Київського водосховища типову модель струмових станів водойм. В Обчислювальному центрі Інституту кібернетики відразу розпочалися масштабні роботи з розрахунку на ЕОМ БЕСМ-6 гідродинамічних станів водосховища залежно від усіх можливих напрямків вітру. Отримані результати негайно передавали в центральні органи влади України і Союзу, і вони відігравали ключову роль у прийнятті оперативних рішень. У Спеціальному конструкторському бюро (СКБ) Інституту терміново було створено ситуаційну кімнату, де на екрані демонструвалися графічні зображення результатів розрахунків. Разом зі співробітниками СКБ науковці Інституту організували численні пункти спостережень, за даними з яких складали узагальнену картину забруднення атмосфери і водозбору Дніпра для прогнозування міграції радіонуклідів. Ці результати передавали в інші установи Академії, які були задіяні у виконанні робіт з ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи.

Слід зазначити, що це важливе і складне завдання вдалося виконати оперативно і високопрофесійно завдяки тому, що Обчислювальний центр Інституту кібернетики був одним з чотирьох найпотужніших у Радянському Союзі, а також провідною організацією з впровадження всіх нових авторських розробок з технічного та програмного забезпечення ЕОМ БЕСМ-6.

Колективи співробітників з різних академічних інститутів на чолі з провідними вченими і особисто академіком Б.Є. Патонем працювали в тісному контакті з вищим керівництвом України та щойно створеним Міністерством надзвичайних ситуацій. В Академії було створено Оперативну комісію під керівництвом академіка В.І. Трефілова для організації робіт з різних проблемно-орієнтованих напрямів з метою з'ясування поточної обстановки, прогнозування ризиків та ступеня забруднення вод Дніпровського басейну, ґрунтових вод, ґрунту, рослин і загалом середовища проживання людей.

В Інституті кібернетики було також розроблено математичні моделі, на основі яких в Обчислювальному центрі проведено розрахунки пошарових струмових станів за різних гідрометеорологічних умов каскаду всіх дніпровських водойм, водосховищ і чотирьох лиманів Північно-Західного Причорномор'я. Ці результати у вигляді лістингів, креслень, ізольованих функцій струму і векторів швидкостей було передано в Інститут гідробіології НАН України та профільні установи різних міністерств і відомств (Укрдніпровдгосп, Укрпівденьдніпровдгосп та ін.) для використання їх у роботах з оцінювання якості води, біопродуктивності водойм та прогнозування їх гідробіологічних показників, а також для розроблення нових методичних підходів до вирішення конкретних завдань, пов'язаних з інтенсивними антропогенними впливами на водні екосистеми України. Результати цих робіт регулярно заслуховувалися на засіданнях Президії НАН України, Міжвідомчої комісії з економіко-екологічних проблем, а також на численних всесоюзних нарадах. Подальше розширення цих робіт планувалося в рамках виконання розробленої тоді комплексної республіканської наукової програми «Економіко-екологічні проблеми створення водогосподарського комплексу Дунай—Дніпро на 1986—1990 рр.». Незважаючи на те, що цю програму так і не було реалізовано, отримані в Інституті результати самі по собі мали велике значення.

Згодом роботи, пов'язані з першочерговими заходами з ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС, стали основою для створення і розвитку в Інституті наведених нижче наукових напрямів з екологічної тематики.

Створення методів і програмних засобів для дослідження та ранжування ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру. Під керівництвом академіків НАН України В.С. Михалевича та І.В. Сергієнка виконувалися такі фундаментальні роботи:

- розроблення математичного забезпечення, інформаційних технологій для оцінки ризику виникнення екологічних і техногенних

катастроф, прогнозування ефективності заходів щодо ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС;

- створення теоретичної основи математичного моделювання ієрархічно пов'язаних процесів типу «джерело забруднення — навколишнє середовище — продукти харчування — захисні й імунологічні функції організму — імунний статус організму»;

- розроблення концептуальних моделей і деяких алгоритмів формування імунодефіцитів в організмі під впливом стресу і на тлі скомпрометованої імунної системи з метою захисту та реабілітації імунної системи населення України;

- створення методів і програмних засобів для дослідження та ранжування ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру на потенційно небезпечних об'єктах та ризиків виникнення захворювань у ліквідаторів надзвичайних ситуацій.

У рамках виконання цих робіт було отримано важливі результати:

1) створено методи для оцінки ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру на потенційно небезпечних об'єктах на основі моделювання нелінійних систем, поведінка яких залежить від раптових, стрибкоподібних змін або фазових переходів, які є наслідком малих безперервних змін у показниках, що впливають на систему, а також вирішено низку завдань оптимального управління з класу мінімаксних завдань;

2) розроблено програмне забезпечення для розрахунку і ранжування ризиків виникнення нештатних ситуацій і моделювання динаміки співвідношень вигод/витрат при ліквідації наслідків аварій на потенційно небезпечних об'єктах (на прикладі ЧАЕС);

3) розроблено програмне забезпечення для оцінки і ранжування ризиків виникнення захворювань у ліквідаторів надзвичайних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах (на прикладі ЧАЕС) з метою проведення інтегральної оцінки функціонального стану організму, резервних можливостей його життєво важливих систем (імунної, ендокринної, енер-

гетичної та ін.), а також для розрахунку ризику виникнення захворювань і проведення оцінки якості терапії та її корекції;

4) отримано результати моделювання розподілу радіоактивного забруднення при викиді радіоактивних речовин у результаті аварії з метою оцінки відповідних ризиків (п. 1, 2, 3) (на прикладі 10-кілометрової Чорнобильської зони відчуження).

Наукова новизна отриманих результатів полягає у створенні методів оцінки ризику рідкісних подій в умовах зростаючої невизначеності, зумовленої неповнотою або недостовірністю наявних даних, визначається унікальністю досліджуваного явища і загальною залежністю системи від раптових змін при малих впливах на систему [1–3].

Актуальність розроблених методів і програмних засобів пов'язана з істотним підвищенням ефективності управління ризиками надзвичайних ситуацій техногенного, природного та медико-біологічного характеру на потенційно небезпечних об'єктах і оптимізації заходів з ліквідації їх наслідків, а також з розширенням горизонту прогнозування виникнення захворювань і виробленням оптимальної терапії для ліквідаторів надзвичайних ситуацій.

Методологія імовірнісного аналізу безпеки. Метою цих робіт є генерування сценаріїв аварій на АЕС і отримання кількісних оцінок ризику, що дозволяє виявляти можливі слабкі місця в конструкції АЕС. Оскільки результати аналізу безпеки використовуються при ліцензуванні станції, однією з основних вимог до імовірнісного аналізу безпеки є забезпечення високого рівня точності отриманих оцінок.

Ці роботи під керівництвом академіка НАН України І.М. Коваленка і члена-кореспондента НАН України П.С. Кнопова виконувалися відповідно до Керівництва з безпеки МАГАТЕ [4] на трьох рівнях: 1) аналіз послідовності подій, які можуть призвести до пошкодження активної зони, і оцінка ймовірності її пошкодження; 2) визначення шляху можливих радіоактивних викидів зі станції і оцінка їх величини і частоти реалізації; 3) оцінка впливу аварії на

здоров'я людей і оцінки таких громадських ризиків, як забруднення території або продовольства.

Відправною точкою аналізу безпеки є формування набору вихідних подій, які або безпосередньо викликають пошкодження активної зони, або можуть призвести до таких подій у разі невиконання функцій, призначених для запобігання таким пошкодженням або обмеження їх розмірів. До основних функцій безпеки, згідно з [4], належать визначення вихідної події, зупинка реактора, відведення залишкових тепловиділень, захист захисної оболонки.

Центральною ланкою в імовірнісному аналізі безпеки є розроблення моделей надійності систем безпеки АЕС, для яких характерні два режими роботи: режим очікування і режим виконання заданих функцій безпеки. Показником, що характеризує надійність системи безпеки відносно вихідної події, є ймовірність невиконання системою заданих функцій безпеки при надходженні вимоги на її спрацювання.

З оцінки надійності АЕС було виконано такі роботи:

- розроблення принципово нового підходу до оцінювання показників надійності систем з урахуванням таких особливостей їх функціонування, як залежність ефективності виконання системою функцій безпеки від набору одиниць відмови обладнання; залежність процесу відмови обладнання не лише від часу, а й від стану середовища; недосконалість індикації відмови та ін. Ці роботи ґрунтуються на використанні методу малого параметра і методів прискореного моделювання;

- розроблення методів аналізу чутливості баєсових оцінок параметрів надійності обладнання АЕС до вибору апріорної функції.

Практичну реалізацію методології імовірнісного аналізу безпеки і методів отримання оцінок надійності АЕС було проведено на основі реальних даних функціонування АЕС в Новоукраїнці.

Під керівництвом П.С. Кнопова і М.І. Залізняка було також проведено роботи з аналізу і прогнозування ступеня ризику повеней для гірських річок України і Грузії.

Результати імовірнісного аналізу безпеки використовують при розробленні процедур для запобігання аваріям і ліквідації їх наслідків, як вихідну інформацію для планування технологічного регламенту станції, який виконується з метою контролю працездатності одиниць обладнання та усунення виявлених несправностей [5–11].

Математичне моделювання та дослідження процесів у неоднорідних середовищах. Науковою базою цього напрямку робіт і основою для їх подальшого розвитку є фундаментальні дослідження академіків НАН України І.В. Сергієнка і В.С. Дейнеки та члена-кореспондента НАН України В.В. Скопечького. Напрямок охоплює широкий спектр наукових проблем, що передбачають розв'язання великої кількості складних задач моделювання процесів у середовищах з неоднорідними умовами спряження. До них належать проблеми математичного моделювання стаціонарних і динамічних процесів теплопровідності, фільтрації, дифузії, вологосолепереносу, пружного деформування в багатокомпонентних середовищах [12–16].

У сучасному світі неможливо створити нову конкурентоспроможну продукцію без застосування новітніх інформаційних технологій на основі досягнень у галузі кібернетики, які й визначають рівень науково-технічного розвитку держави. Використання методів математичного моделювання комп'ютерних технологій дозволяє на порядок (а іноді й більше) підвищити ефективність вирішення різних завдань, що потребують розв'язання великорозмірних надскладних обчислювальних задач і використання потужного обчислювального ресурсу.

В Україні створено інфраструктуру для математичного моделювання на основі високоефективних обчислень на базі ресурсних центрів, ядром якої є суперкомп'ютер Інституту кібернетики – СКІТ-4. Це одна з найпотужніших в Україні кластерних систем, що має десятки технологій, які дозволяють з високою ефективністю вирішувати найскладніші завдання економіки, екології, захисту інформації, захисту навколишнього середовища, космічних досліджень тощо. Зусиллями Інститу-

ту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України такі центри було об'єднано в грид-мережу — Український національний грид, що забезпечує широкому колу академічних інститутів та інших організацій доступ до необхідного обчислювального ресурсу [17].

Напрацювання Інституту кібернетики з цього напрямку застосовуються для вирішення проблеми забезпечення питною водою, яка є дуже актуальною у всьому світі. Математичне моделювання процесу фільтрації води використовується в багатьох галузях, пов'язаних з управлінням водними ресурсами, наприклад для оцінки запасів підземних вод або планування водозаборів.

Підземні води є природним ресурсом, значення якого важко переоцінити, зокрема в Україні 30 % населення залежить від використання підземних вод як питних. Також підземні води є джерелом технічних промислових вод. Їх використовують для зрошення, причому потреби у водних ресурсах часто перевищують обсяги, які можна добувати без негативних наслідків для водоносних горизонтів. Для вирішення цієї проблеми співробітники Інституту спільно з колегами з Інституту геологічних наук НАН України виконують роботи зі створення інформаційної технології моделювання режиму фільтрації підземних вод у складних геологічних середовищах, на основі якої було створено систему САРПОК [18]. За допомогою цієї системи з використанням математичного методу скінченних елементів проведено чисельне моделювання впливу неоднорідностей середовища і режимів зовнішнього впливу на фільтраційні процеси в ґрунтових середовищах зон басейнів-відстійників. Ці результати використано при визначенні забруднення ґрунтових вод і вод річки Прип'ять фільтраційним виносом радіоактивного ізотопу ^{90}Sr зі ставка-охолоджувача Чорнобильської АЕС. Виконано також роботи з моделювання напружено-деформованого стану греблі Карлівського водосховища каналу Дніпро—Донбас і напружено-деформованого стану схилу Канівської ГАЕС в районі напірного водоводу.

З цією тематикою в Інституті тісно пов'язаний напрям, очолюваний академіком НАН України О.М. Хімічем, щодо інформаційних технологій створення інтелектуальних систем для математичного моделювання і розв'язання надскладних великорозмірних обчислювальних задач на основі високопродуктивних паралельних обчислень з оцінками достовірності результатів [20].

При чисельному моделюванні різних фізичних процесів на основі методу скінченних елементів використовують системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), від ефективності розв'язання яких залежить ефективність чисельного моделювання. В Інституті розроблено новий унікальний паралельний гібридний алгоритм і програмне забезпечення для розв'язання СЛАР з матрицями великих розмірностей [21–23].

З використанням розрахункових схем методу скінченних елементів створено скінченноелементний програмний каркас Nadra-3D і на його основі розроблено скінченноелементний розв'язувач для математичного моделювання процесів масопереносу. Вирішення цієї проблеми зводиться до побудови тривимірної моделі і розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь з матрицею дуже великих розмірів, для чого використовують паралельні обчислення. Такі задачі потребують потужного обчислювального ресурсу, який в Інституті забезпечується кластерним комплексом сімейства СКІТ та інтелектуальними комплексами сімейства «Інпарком» [24].

Спільно з Інститутом геологічних наук НАН України створюються програмно-інформаційні технології для моделювання режимів фільтрації підземних вод у складних геологічних середовищах на великих територіях і для оцінки запасів підземних вод регіонів України з метою прийняття стратегічних рішень у сфері природокористування та будівництва важливих споруд. Ця технологія використовувалася також для моделювання нестационарних режимів фільтрації Київського і Чернігівського родовищ підземних вод з урахуванням розгалуженої мережі поверхневих водотоків [25, 26].

Розроблено ефективні методи для вирішення широкого класу завдань, пов'язаних з аналізом надійності складних технічних систем, оцінкою ризику екологічно небезпечних виробництв, створенням високонадійних систем захисту інформації. Цей напрям розвивався під керівництвом академіків НАН України І.М. Коваленка [27] і В.К. Задираки [28].

Автоматизовані системи моделювання станів об'єктів навколишнього середовища. Науковою основою розроблення і впровадження автоматизованих систем управління (АСУ) стали запропоновані В.М. Глушковым у 1960-ті роки 10 принципів створення і функціонування АСУ [29]. На початку 1950-х років в Україні було створено одну з перших у континентальній Європі Малу електронну лічильну машину (МЕСМ), а в 1961 р. – першу ЕОМ широкого призначення «Дніпро». Ці здобутки мали велике значення для початку розвитку АСУ і їх застосування в народному господарстві, зокрема першими з них, впровадженими у виробничі процеси, були розроблені в Україні промислові системи управління «Львів» і «Гальванік».

Тривалий час такі системи створювали в інтересах економіки, без урахування важливого екологічного чинника. Нині людство опинилося на порозі глобальної екологічної катастрофи, і наслідком розуміння цього стало прийняття в 1992 р. на Саміті ООН у Ріо-де-Жанейро концепції сталого розвитку на планеті Земля для забезпечення безпечного існування нинішнього і майбутніх поколінь. Тому виникла необхідність у створенні екологічно орієнтованих АСУ, і важливим напрямом робіт в Інституті кібернетики стало вирішення екологічних проблем з урахуванням принципів сталого розвитку, причому на основі розроблених академіком В.М. Глушковым принципів і встановлених академіком І.В. Сергієнком властивостей автоматизованих ієрархічних багаторівневих проблемно-орієнтованих систем [31, 32].

Вагомі здобутки Інституту зі створення методів математичного моделювання процесів у складних системах ґрунтуються на рішеннях завдань з моделювання водних об'єктів, які

були поставлені перед ученими відразу після аварії на ЧАЕС. Як уже зазначалося, результати перших робіт з моделювання і розрахунку струмових станів Київського водосховища використовували для оперативного прийняття управлінських рішень щодо якості води у водосховищі. Потім було проведено аналогічні розрахунки для всього каскаду дніпровських водосховищ і всіх лиманів Північно-Західного Причорномор'я [33, 34]. Розроблені моделі лягли в основу першої в Україні автоматизованої системи імітаційного моделювання водних об'єктів (СІМВО).

Метою створення СІМВО є отримання комплексних оцінок екологічних станів конкретних водойм і водотоків на основі системного підходу до розроблення методів математичного та імітаційного моделювання і використання апаратно-програмних комплексів автоматизації цих досліджень. До складу СІМВО входять проблемно-орієнтовані підсистеми моделювання змін кисневого режиму і перенесення забруднень у водотоках, процесів у підземних водоносних горизонтах і стаціонарних стоко-вітрових течій у водоймах «дрібної» води на окремих глибинних горизонтах. Крім того, СІМВО містить підсистему інтелектуалізованого способу обробки, стиснення і відновлення з гарантованою точністю масивів числових даних з використанням апарату найкращої чебишовської апроксимації, яка є інваріантною складовою в усіх підсистемах і використовується для попередньої обробки числових масивів вхідних даних з метою їх заміни з високою точністю різними аналітичними виразами.

Слід зауважити, що особливістю всіх моделей гідродинамічних станів водних об'єктів є те, що вони орієнтовані тільки на конкретні гідрооб'єкти і не придатні для використання на інших об'єктах. Тому новизна і актуальність розроблених в Інституті підсистем, що входять у СІМВО, пов'язана з тим, що їх створено для дослідження станів водойм і водотоків України. Ефективність цих моделей забезпечується системним підходом до організації обчислювальних схем гідродинамічних моделей, отри-

мання інформаційних масивів характеристик конкретних водойм, створення баз даних, розроблення методичних рекомендацій та підходів до моделювання водних об'єктів з метою забезпечення оперативного прогнозування їх станів в умовах антропогенних впливів.

Розроблена система дає можливість фахівцям різного профілю виконувати роботи з вивчення різних внутрішньоводоймових процесів і оперативного прогнозування їх станів в умовах антропогенних впливів. Це дозволяє не лише оцінювати й прогнозувати поточний стан природних процесів, а й імітувати ті чи інші дії, навантаження, надавати рекомендації з управління цими процесами [35].

Важливо наголосити, що до початку робіт Інституту кібернетики в Україні взагалі не проводили математичне моделювання гідродинамічних станів водойм і водотоків. Тому результати моделювання зазначених вище водних об'єктів було отримано вперше, що й визначає їх унікальність, особливо з огляду на міжнародне значення цих об'єктів.

Зважаючи на те, що основні проблеми сталого розвитку держави проявляються і вирішуються на рівні регіонів, екологічний стан яких визначається переважно впливом мегаполісів, та з урахуванням підвищеної екологічної небезпеки в м. Київ в Інституті було створено першу в Україні типову автоматизовану регіональну систему екологічного моніторингу (СЕМ) для української столиці. Ця система є автоматизованою ієрархічною дворівневою системою і відповідає вимогам до функціонування ієрархічних багаторівневих проблемно-орієнтованих систем, розробленим під керівництвом академіка І.В. Сергієнка. Метою створення СЕМ для Києва було поліпшення його іміджу як європейської столиці. Подальшим розвитком цієї системи став прийнятий проєкт автоматизованої системи комплексного екологічного моніторингу (АСКЕМ), розроблений спільно з деякими іншими установами НАН України. Проєкт АСКЕМ розглядався як типовий у складі загальнодержавної системи екологічного моніторингу України, однак його реалізацію було припинено.

Отже, СІМВО і СЕМ стали першими впровадженими в Україні автоматизованими системами в екології.

Сьогодні в Інституті кібернетики спільно з Інститутом космічних досліджень НАН України і ДКА України проводяться роботи в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України, яка є частиною загальноєвропейського проєкту ERA-PLANET програми ЄС «Горизонт-2020» [36]. Проєкт ERA-PLANET присвячено реалізації принципів Європейського дослідницького простору (ERA) у сфері досліджень Землі з метою посилення ролі Європи в Групі спостережень за Землею (GEO) і програмі Copernicus. Учасниками проєкту є 35 дослідницьких центрів з 15 європейських країн. Проєкт об'єднує робочі пакети за чотирма кластерами: «Розумні міста і стійкі суспільства» (пакет SMURBS), «Ефективність використання ресурсів та управління навколишнім середовищем», «Глобальні зміни і екологічні угоди», «Полярні області та природні ресурси». Україна бере участь у робочих пакетах перших трьох кластерів, а Інститут кібернетики — в роботах за пакетом SMURBS [37]. Пакет SMURBS охоплює роботи з інтеграції даних від локальних пунктів контролю, інтелектуальних сенсорів, супутників, систем моделювання, інтернет-джерел відкритих даних і окремих спостерігачів для інформування цільових робочих груп, осіб, які приймають рішення, і звичайних громадян. Метою цих робіт є координація через загальні дані національних і регіональних програм екологічного моніторингу міст за трьома основними напрямками: зростання міста, якість повітря, боротьба з екологічними лихами (в тому числі торф'яними пожежами, горінням звалищ, техногенними катастрофами тощо).

Щодо зростання міст завдання SMURBS полягає в розробленні із застосуванням методів машинного навчання і картобудування технології для розрахунку і щорічного оновлення карт для всіх великих міст на основі безкоштовних даних багатоканального зондування від супутників, безкоштовних карт дорожньої мережі з прилеглою забудовою, рівня заселе-

ності, інформації систем моніторингу стану атмосфери та ін. На сьогодні дані представлено лише для міст Євросоюзу з населенням понад 100 тис. осіб.

Щодо якості повітря пакет SMURBS передбачає розрахунок аналогічних карт забрудненості на основі супутникових даних, наземного моніторингу забруднення повітря «великими» частинками пилу від доріг і промислових підприємств та «дрібними» частинками від диму; аналіз хімічного складу повітря в стаціонарних і мобільних пунктах контролю з використанням індексу якості повітря і непрямих даних аналізу стану рослин, водойм, а також масових медичних обстежень населення.

Щодо боротьби з екологічними лихами завданнями SMURBS є виявлення джерел пожеж за температурними даними від супутників, узагальнення оцінок складу і щільності домішок, прогнозування забруднення з урахуванням супутникових даних, даних про температуру, хмарність, силу й напрямок вітрів, метеорологічних зведень і прогнозів, результатів аеродинамічного моделювання.

Для вирішення таких складних комплексних проблем потрібно створити інформаційну систему «розумного» міста у складі інфраструктури ERA-PLANET/UA на основі інтеграції даних різного походження та природи, різних форматів, масштабів і систем координат із забезпеченням двосторонньої інтероперабельності (відкритості для легкої інтеграції з наявними і майбутніми джерелами даних та інформаційними системами) [38, 39]. Аналогічні завдання Інституту вже доводилося вирішувати в рамках робіт зі створення АСУ, зокрема СІМВО і СЕМ. Особливістю нової системи є реалізація європейських принципів відкритих даних для результатів досліджень. На прикладах систем СІМВО, СЕМ та проєкту ERA-PLANET можна простежити, як протягом досить тривалого періоду трансформувалися загальні принципи побудови АСУ для комплексного моніторингу навколишнього середовища.

Основним результатом цих робіт є розроблення загальної архітектури підсистеми ERA-PLANET/UA і реалізація остаточної версії робочого прототипу системи для картографічної інформації. Надалі заплановано роботи з вибору одного з варіантів представлення інформації загального вигляду (семантичні довідники, інформаційні панелі).

Автоматизована інтероперабельна система «розумного міста», яку розробляють у складі інфраструктури української частини проєкту ERA-PLANET, поєднує національні та міжнародні цілі досягнення сталого розвитку і збільшує внесок Європи в Глобальну систему спостереження Землі (GEOSS) [40].

Досвід виконання робіт зі створення і впровадження АСУ забезпечив Інституту статус базової організації для подальшого розвитку робіт зі створення регіональних екологічних АСУ з метою створення державної автоматизованої системи екологічного моніторингу, що повністю відповідає ідеям академіка В.М. Глушкова, академіка І.В. Сергієнка та принципам сталого розвитку [41, 42].

Висновки. Отже, Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України має великий досвід з проведення фундаментальних наукових досліджень, створення важливих прикладних розробок при вирішенні складних завдань, пов'язаних з екологією. Крім того, в Інституті є потужний обчислювальний ресурс на базі суперкомп'ютера СКІТ-4 і сімейства комп'ютерів «Інпарком». Тому колектив Інституту доцільно залучати для ефективного продовження робіт з комплексного вирішення найважливішої для України багатофакторної екологічної проблеми — відновлення і збереження природного навколишнього середовища з метою забезпечення необхідних умов для життєдіяльності суспільства. Важливість і актуальність цього напрямку визначається тим, що, відповідно до концепції сталого розвитку, він є одним з пріоритетних при вирішенні комплексної проблеми сталого розвитку України.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Mikhalevich V.S., Janenko V.M., Atoev K.L. System analysis of mechanisms of organism's defensive functions regulation. In: Mohler R., Asahenkov A. (eds) *Selected Topics on Mathematical Models in Immunology and Medicine*. Laxenburg: IASA, 1990. P. 137–145.
2. Sergienko I.V., Yanenko V.M., Atoev K.L. Optimal control of the immune response synchronizing the various regulatory compartments of the immune system. II. Identification of model parameters and missing data recovery. *Cybernetics and Systems Analysis*. 1997. **33**(1): 131–144. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02665951>
[Сергиенко І.В., Яненко В.М., Атоєв К.Л. Оптимальне управління імунним відповіддю, синхронізуюче окремі регуляторні ланки імунної системи. II. Ідентифікація параметрів моделі та відновлення пропущених даних. *Кибернетика і системний аналіз*. 1997. Т. 33, № 1. С. 146–164.]
3. Sergienko I.V., Yanenko V.M., Atoev K.L. A conceptual framework for managing the risk of ecological, technogenic, and sociogenic disasters. *Cybernetics and Systems Analysis*. 1997. **33**(2): 203–219. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02665894>
[Сергиенко І.В., Яненко В.М., Атоєв К.Л. Обща концепція управління ризиком екологічних, техногенних і соціогенних катастроф. *Кибернетика і системний аналіз*. 1997. Т. 33, № 2. С. 65–86.]
4. International Atomic Energy Agency, Safety of Nuclear Power Plants: Design, Safety. Standards Series No. NS-G-1.2, IAEA, Vienna, 2000.
[Оцінка безпеки та незалежна перевірка для атомних електростанцій. Руководство по безпеці NS-G-1.2. МАГАТЕ, 2004.]
5. Kovalenko I.N. *Approximation of Queues via Small-Parameter Method. Advances in Queueing*. CRC Press, Boca Raton, 1995. P. 481–506.
6. Kovalenko I.N., Kuznetsov N.Yu., Pegg Ph.A. *Mathematical Theory of Reliability of Time Dependent Systems with Practical Applications*. Wiley, Chichester, 1997.
7. Kovalenko I.N. Light-traffic analysis of some queueing models with losses. In: *Simulation and Optimization Methods in Risk and Reliability Theory*. Nova Science Publishers, Inc, 2009, P. 19–44.
8. Golodnikov A.N., Knopov P.S., Pepelyaev V.A. Estimation of Reliability Parameters Under Incomplete Primary Information. *Theory and Decision*. 2004. **57**(4): 331–344. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11238-005-3217-9>
9. Knopov P.S., Pardalos P.M. *Simulation and Optimization Methods in Risk and Reliability Theory*. Nova Science Publishers, Inc., 2009.
10. Golodnikov A., Knopov P., Pepelyaev V. Investigation of Bayesian Estimates for Binomial Failure Models. In: *Simulation and Optimization Methods in Risk and Reliability Theory*. Nova Science Publishers Inc., 2009. P. 173–220.
11. Golodnikov A.N., Ermoliev Y.M., Knopov P.S. Estimating reliability parameters under insufficient information. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2010. **46**(3): 443–459. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-010-9219-9>
[Голодников А.Н., Ермольєв Ю.М., Кнопов П.С. Оцінювання параметрів надійності в умовах недостаточної інформації. *Кибернетика і системний аналіз*. 2010. № 3. С. 109–125.]
12. Sergienko I.V., Skopetsky V.V., Deineka V.S. *Matematicheskoye modelirovaniye i issledovaniye fizicheskikh protsessov v neodnorodnykh sredakh*. Kyiv: Naukova Dumka, 1991 (in Russian).
[Сергиенко І.В., Скопєцький В.В., Дейнека В.С. *Математическое моделювання та дослідження фізических процесов в неоднородних середках*. Київ: Наук. думка, 1991.]
13. Deineka V.S., Sergienko I.V., Skopetsky V.V. *Modeli i metody resheniya zadach s usloviyami sopryazheniya*. Kyiv: Naukova Dumka, 1998 (in Russian).
[Дейнека В.С., Сергиенко І.В., Скопєцький В.В. *Моделі та методи рішення задач з умовами сопряження*. Київ: Наук. думка, 1998.]
14. Deineka V.S., Sergienko I.V. *Modeli i metody resheniya zadach v neodnorodnykh sredakh*. Kyiv: Naukova Dumka, 2001 (in Russian).
[Дейнека В.С., Сергиенко І.В. *Моделі та методи рішення задач в неоднородних середках*. Київ: Наук. думка, 2001.]
15. Sergienko I.V., Deineka V.S. *Optimal Control of Distributed Systems with Conjugation Conditions*. N. Y.: Kluwer Academic Publishers, 2005.
16. Sergienko I.V. *Methods of optimization and systems analysis for problems of transcomputational complexity*. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer, 2012.

17. Sergienko I.V. Mathematical and program modelling of complicated systems using supercomputer technologies. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2018. (3): 39–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2018.03.039>
[Сергієнко І.В. Математичне та програмне моделювання складних систем з використанням суперкомп'ютерних технологій. *Вісник НАН України*. 2018. № 3. С. 39–48.]
18. Deineka V.S., Sergienko I.V., Skoropetsky V.V. *Matematicheskiye modeli i metody rascheta zadach z razryvnyimi resheniyami*. Kyiv: Naukova Dumka, 1995 (in Russian).
[Дейнека В.С., Сергієнко І.В., Скопєцький В.В. *Математические модели и методы расчета задач с разрывными решениями*. Киев: Наук. думка, 1995.]
19. Khimich A.N., Molchanov I.N., Popov A.V., Chistyakova T.V., Yakovlev M.F. *Parallel'nyye algoritmy resheniya zadach vychislitel'noy matematiki*. Kyiv: Naukova Dumka, 2008 (in Russian).
[Химич А.Н., Молчанов И.Н., Попов А.В., Чистьякова Т.В., Яковлев М.Ф. *Параллельные алгоритмы решения задач вычислительной математики*. Киев: Наук. думка, 2008.]
20. Khimich A., Nikolaevskaya E., Chistyakova T. *Programming with Multiple Precision. Studies in Computational Intelligence*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012.
21. Sergienko I.V., Khimich O.M., Petryk M.R., Kane D., Mykhalyk D.M., Leklerk S., Fresar Zh. *Matematychni modeliuvannya masoperenosu v seredovyshchakh chastynok nanoporystoi struktury*. Kyiv, 2014 (in Ukrainian).
[Сергієнко І.В., Хімич О.М., Петрик М.Р., Кане Д., Михалик Д.М., Леклерк С., Фресар Ж. *Математичне моделювання масопереносу в середовищах частинок нанопористої структури*. Київ, 2014.]
22. Baranov A.Y., Bilous M.V., Sergienko I.V., Khimich A.N. Hybrid Algorithms to Solve Linear Systems for Finite-Element Modeling of Filtration Processes. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2015. **51**(4): 594–602. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-015-9750-9>
[Баранов А.Ю., Белоус М.В., Сергієнко І.В., Химич А.Н. Гибридные алгоритмы решения линейных систем для конечно-элементного моделирования процессов фильтрации. *Кибернетика и системный анализ*. 2015. Т. 51, № 4. С. 112–120.]
23. Khimich A.N., Popov A.V., Chistyakov O.V. Hybrid Algorithms for Solving the Algebraic Eigenvalue Problem with Sparse Matrices. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2017. **53**(6): 937–949. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-017-9996-5>
[Химич А.Н., Попов А.В., Чистьяков А.В. Гибридные алгоритмы решения алгебраической проблемы собственных значений с разреженными матрицами. *Кибернетика и системный анализ*. 2017. Т. 53, № 6. С. 132–146.]
24. Bilous M.V. Finite element solver Nadra-3D. *Cluster Computing: Proc. II Int. Conf. (3-5 June 2013, Lviv, Ukraine)*. P. 40–47.
[Белоус М.В. Конечно-элементный решатель Надра-3D. *Кластерные вычисления: матер. II междунар. конф. (3–5 июня 2013, Львов)*. С. 40–47.]
25. Sergienko I.V., Deineka V.S., Shestopalov V.M. et al. In: Zagorodniy A.G., Yermolyev Yu.M., Bogdanov V.L. (eds) *Integrated Management, Security, and Robustness*. Kyiv: Akadempriodyka, 2015. P. 114–125 (in Ukrainian).
[Сергієнко І.В., Дейнека В.С., Шестопалов В.М. та ін. Побудова цифрової моделі геологічного середовища Чернігівського родовища підземних вод. У кн.: *Комплексне управління, безпека і робастність*. За ред. А.Г. Загороднього, Ю.М. Єрмольєва, В.Л. Богданова. Київ: Академперіодика, 2014. С. 114–125.]
26. Bilous M.V. Information technology for simulation of spatial dynamics of groundwater in naturally complex geological environments. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2015. (6): 68–73. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2015.06.068>
[Білоус М.В. Інформаційна технологія аналізу просторової динаміки підземних вод у природно складних геологічних середовищах. *Вісник НАН України*. 2015. № 6. С. 68–73.]
27. Kovalenko I.N., Kochubinskii A.I. Asymmetric Cryptographic Algorithms. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2003. **39**(4): 549–554. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:CASA.0000003504.91987.d9>
[Коваленко І.Н., Кочубинський А.І. Ассимметрические криптографические алгоритмы. *Кибернетика и системный анализ*. 2003. Т. 39, № 4. С. 95–100.]
28. Zadiraka V.K., Oleksyuk O.S. *Kompyuterna aryfmetyka bahatorozryadnykh chysel*. Kyiv, 2003 (in Ukrainian).
[Задірака В.К., Олексюк О.С. *Комп'ютерна арифметика багаторозрядних чисел*. Київ: Економічна думка, 2003.]
29. Glushkov V.M. *Vvedeniye v ASU*. Kyiv: Tekhnika, 1972 (in Russian).
[Глушков В.М. *Введение в АСУ*. Киев: Техника, 1972.]
30. Sergienko I.V., Deineka V.S. *Sistemnyy analiz mnogokomponentnykh raspredelennykh sistem*. Kyiv: Naukova Dumka, 2009 (in Russian).

- [Сергиенко И.В., Дейнека В.С. *Системный анализ многокомпонентных распределенных систем*. Киев: Наукова думка, 2009.]
31. Lavrik V.I., Kalenchuk-Porkhanova A.A. In: *Diagnosis of the state of the ecosystem of the Black Sea and the zone of conjugation of land and sea*: Proc. Sci. Conf. (1997, Sevastopol, Ukraine). P. 88–89 (in Russian).
[Лаврик В.И., Каленчук-Порханова А.А. Имитационная система моделирования экологического состояния устьев рек, лиманов и озер северо-западного Причерноморья. В кн.: *Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суши и моря*: сб. трудов науч. конф. (Севастополь, 1997). С. 88–89.]
 32. Kalenchuk-Porkhanova A.A. In: *50 years of V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. (2008, Kyiv, Ukraine). P. 354–361 (in Russian).
[Каленчук-Порханова А.А. Аппарат аппроксимации для анализа и синтеза сложных систем. В кн.: *50 років Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України*: матер. міжнар. конф. (Київ, 2008). С. 354–361.]
 33. Glushkov V.M. *Osnovnyye printsipy postroyeniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya*. Moscow, 1969 (in Russian).
[Глушков В.М. *Основные принципы построения автоматизированных систем управления*. Москва, 1969.]
 34. Sergienko I.V., Shilo V.P. *Zadachi diskretnoy optimizatsii: problemy, metody resheniya, issledovaniya*. Kyiv: Naukova Dumka, 2003 (in Russian).
[Сергиенко И.В., Шило В.П. *Задачи дискретной оптимизации: проблемы, методы решения, исследования*. Киев: Наукова думка, 2003.]
 35. Kalenchuk-Porkhanova A.A. Modeling Flow States in Water Bodies. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. **55**(4): 683–691. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00178-9>
[Каленчук-Порханова А.А. Математическое моделирование токовых состояний водных объектов. *Кибернетика и системный анализ*. 2019. Т. 55, № 4. С. 189–193.]
 36. Fedorov O.P. On the target complex program of NAS of Ukraine “Aerospace environmental surveillance for sustainable development and security as a national segment of Horizon-2020 ERA-PLANET project”. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr*. 2017. (12): 35–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2017.12.035>
[Федоров О.П. Про цільову програму наукових досліджень НАН України «Аерокосмічні спостереження довкілля в інтересах сталого розвитку та безпеки як національний сегмент проекту «Горизонт-2020» ERA-PLANET». *Вісник НАН України*. 2017. № 12. С. 35–41.]
 37. Kussul N., Lavreniuk M., Kolotii A., Skakun S., Rakoid O., Shumilo L. A workflow for Sustainable Development Goals indicators assessment based on high-resolution satellite data. *International Journal of Digital Earth*. 2020. **13**(2): 309–321. DOI: <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1610807>
 38. The Urban Atlas. https://data.europa.eu/data/datasets/data_urban-atlas
 39. Atmosphere Monitoring Service. Implemented by ECMWF as part of The Copernicus Programme. <https://atmosphere.copernicus.eu/>
 40. Tulchinsky V.G., Lavrenyuk S.I., Roganov V.Y., Tulchinsky P.G. In: *GEO-UA*: Proc. VI conf. (September 18-19, 2018, Kyiv). P. 5–27 (in Ukrainian).
[Тульчинський В.Г., Лавренюк С.І., Роганов В.Ю., Тульчинський П.Г. Проблема забезпечення інтероперабельності інфраструктури SMURBS та шляхи її розв'язку. *GEO-UA*: праці VI всеукр. конф. (18–19 вересня 2018, Київ). С. 5–27.]
 41. Kalenchuk-Porkhanova A., Tulchinsky V. Solving Environmental Problems According to the Concept of Sustainable Development of the Earth. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. **57**(4): 638–646. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00389-z>
[Каленчук-Порханова А.А., Тульчинський В.Г. Решение экологических проблем в соответствии с Концепцией устойчивого развития планеты Земля. *Кибернетика и системный анализ*. 2021. Т. 57, № 4. С. 155–160.]
 42. Sergienko I.V., Khimich A.N. Mathematical modeling: from MESM to exaflops. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr*. 2019. (8): 37–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2019.08.037>
[Сергиенко І.В., Хіміч О.М. Математичне моделювання від МЕЛМ до ексафлопсів. *Вісник НАН України*. 2019. № 8. С. 37–50.]

Anzhelina O. Kalenchuk-Porkhanova

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3054-1492>

Vadim G. Tulchinsky

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0280-223X>

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODELING OF ECOLOGICAL CONDITIONS OF NATURAL OBJECTS OF THE ENVIRONMENT

The paper is devoted to fundamental and applied research of the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine in solving the problems of risk analysis of emergencies and safety of ecological systems, studying and forecasting the complex dynamic processes in heterogeneous media, development of mathematical modeling methods and numerical algorithms, implementation of highly reliable systems for information protection and automated systems for mathematical modeling of the states of natural objects. The Institute's highly qualified staff and powerful computing resources provide conditions for reliable solving of complex scientific problems. Brief historical information on events of the Chernobyl accident directly related to the described research works is also presented.

Keywords: mathematical modeling, ecological problems, heterogeneous media, complex processes, natural environment, automated systems.