

УДК 504.054:528.8+519.23

Viacheslav Okhariev, Candidate of Engineering Science, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6270-6293> *e-mail*: okhariev.vo@gmail.com

Serhii Pidsadnii, postgraduate
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-7406-500X> *e-mail*: sepgiy.pidsadnii@gmail.com

Institute of Telecommunications and Global Information Space of National Academy of Science, Kyiv, Ukraine

INFORMATION SUPPORT OF DECISION MAKING FOR TECHNOGENIC AND ENVIRONMENTAL SAFETY USING GEOSPATIAL DATA ANALYSIS

***Abstract.** The article researches the problems of development of the environmental decision support systems, which arise due to the natural complexity of natural systems and the multidisciplinary nature of environmental safety problems. Non-linear interactions of natural processes, spatial and temporal variability of environmental phenomena, as well as issues of data quality and availability stand out among the key problems. Technological and methodological challenges are considered, such as development and validation of models, ensuring user-friendliness of the interface, integration with existing systems, and the problem of scalability and performance of the DSS. Special attention is paid to the role of geospatial data and geographic information systems (GIS) in tasks of information support for decision-making. GIS is the core of modern GIS, providing management, analysis and visualization of geospatial data, which significantly increases the capabilities of these systems. The advantages of GIS in the context of managing large volumes of geospatial data, their integration with other data sets, spatial analysis and modeling, as well as visualization and communication of results are defined. The article proposes a conceptual model that describes the infrastructure of information support for decision-making in the field of man-made and environmental safety, the central element of which is GIS. The authors propose the differentiation of geospatial data analysis tasks into two modules, one of which specializes in the analysis of regional environmental monitoring data for the ecological assessment of the territory's condition, the formation of medium- and long-term forecasts. The second module specializes in the assessment of risks from emergency situations, primarily related to military operations. The key goal is to assess the potential environmental consequences of catastrophic events at critical infrastructure facilities. The architecture includes sets of data sources such as remote sensing data and environmental statistics, blocks of statistical analysis and mathematical modeling, a block of data integration based on GIS, blocks of environmental assessment and scenario modeling. Each of these components performs critically important functions to ensure effective decision-making in the field of environmental technogenic and ecological safety and management of natural resources.*

***Keywords:** environmental decision support systems, geographic information technology, remote sensing, geospatial data analysis, environmental assessment, scenario modeling.*

В.О. Охарєв, С.Г. Підсадній

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,
м. Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА РІШЕНЬ В СФЕРІ ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТЕРИТОРІЙ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ

***Анотація.** У статті досліджуються проблеми інформаційної підтримки прийняття рішень в сфері техногенно-екологічної безпеки, які виникають через природну складність антропоєкосистем та мультидисциплінарний характер проблем екологічної безпеки. Серед ключових проблем виділяються нелінійні взаємодії природних процесів, просторова і часова мінливість екологічних явищ, а також питання якості і доступності даних. Розглядаються технологічні та методологічні виклики, такі як розробка і валідація моделей, забезпечення зручності інтерфейсу для користувачів, інтеграція з існуючими системами та проблема масштабованості і продуктивності систем підтримки прийняття рішень. Особливу увагу приділено ролі геопросторових даних і геоінформаційних систем (ГІС) у завданнях інформаційної підтримки прийняття рішень. ГІС є ядром сучасних СППР, забезпечуючи управління, аналіз і візуалізацію геопросторових даних, що значно підвищує можливості цих систем. Визначено переваги ГІС у контексті управління великими обсягами геопросторових даних, їх інтеграції з іншими наборами даних, просторового аналізу та моделювання, а також візуалізації та комунікації результатів. В статті пропонується концептуальна модель, яка описує інфраструктуру інформаційної підтримки прийняття рішень в сфері техногенно-екологічної безпеки, центральним елементом якої є ГІС. Автори пропонують диференціацію задач з аналізу геопросторових даних на два модулі, один з яких спеціалізується на аналізі регіональних даних екологічного моніторингу для екологічної оцінки стану територій, формування середньо- та довгострокових прогнозів. Другий модуль спеціалізується на оцінці ризиків від виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних в першу чергу з військовими діями. Ключовою метою є оцінка потенційних екологічних наслідків катастрофічних подій на об'єктах критичної інфраструктури. Архітектура включає набори джерел даних (дистанційне зондування, екологічна статистика), блоки статистичного аналізу та математичного моделювання, блок інтеграції даних на базі ГІС, блоки екологічної оцінки та сценарного моделювання. Кожен з цих компонентів виконує критично важливі функції для забезпечення ефективного прийняття рішень у сфері екологічної техногенно-екологічної безпеки та управління природокористуванням.*

***Ключові слова:** екологічні системи підтримки прийняття рішень, геоінформаційні технології, дистанційне зондування Землі, геопросторовий аналіз, екологічна оцінка, сценарне моделювання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.115-129>

Вступ

Виклики, що сьогодні постали перед системою управління екологічною безпекою в Україні, фактично, є безпрецедентними. Бойові дії такої інтенсивності не велися в Європі з 1945 року, а в країнах із сучасною складною економікою та структурою природокористування не велися ніколи.

Комплексний погляд на проблему дає підстави вважати військову агресію Російської Федерації проти України причиною найбільшої екологічної катастрофи в історії людства в масштабах окремої країни. Наприклад, більше 20% земель сільськогосподарського призначення на сьогодні є непридатними для використання через замінування, поточні бойові дії та окупацію, що на порядок перевищує аналогічний показник після аварії на Чорнобильській атомній електростанції, яка до цього вважалась наймасштабнішою техногенною катастрофою в історії України. Шкода від потенційної аварії на тимчасово окупованій Запорізькій АЕС також може перевищити наслідки Чорнобильської катастрофи. Руйнування дамби Каховської гідроелектростанції також є безпрецедентним в історії за масштабом техногенного об'єкта та наслідками для екосистеми регіону. Наведені ці та інші приклади дають підстави зробити висновки про те, що проблема оцінки та прогнозування екологічного стану постраждалих територій України в силу свого масштабу та комплексності є новою для світової науки. Складність проблеми посилюється через фактичну неможливість коректного прогнозування екологічного стану для тих територій, де інтенсивні військові дії все ще тривають або мають відбутися у майбутньому.

Процес управління техногенно-екологічною безпекою територій в таких умовах містить проблему прийняття оптимальних управлінських рішень в умовах невизначеності. Це, в свою чергу, посилює значення оперативного та максимально комплексного інформаційного забезпечення процесу управління [1, 2]. Актуальні досягнення науки про дані дозволяють проводити комплексний аналіз великих масивів інформації, виокремлення ключових тенденцій, побудову прогнозів та сценарне моделювання [3]. При цьому, в умовах проблеми, що розглядається, критично важливим аспектом є забезпечення отримання таких даних, його оперативність, неперервність та комплексність.

Враховуючи вищеописану актуальність задачі та перераховані фактори, що ускладнюють її вирішення, **метою** авторів є створення концептуальної моделі інформаційної підтримки прийняття рішень в сфері техногенно-екологічної безпеки, що заснована на широкому використанні інструментів аналізу масивів геопросторових даних в умовах їх неповноті. Роль геоінформаційної складової розкрита авторами нижче у теоретико-методичній частині статті.

Виклад основного матеріалу дослідження

Інформаційна підтримка прийняття рішень в сфері екологічної безпеки та природокористування представляє собою перспективний напрям для підвищення ефективності та точності екологічного управління та підвищення оперативності прийняття рішень. Однак ця інтеграція пов'язана з проблемами, які впливають із внутрішньої складності екологічних систем, міждисциплінарного характеру екологічної науки та різноманітних інтересів зацікавлених сторін. Дана стаття досліджує ці виклики, пропонуючи комплексний аналіз факторів, які ускладнюють розробку та впровадження СППР у цій критично важливій сфері.

Серед ключових з таких факторів слід виділити складність екосистем. Екосистеми характеризуються своєю динамічністю та взаємопов'язаністю. Природні екосистеми містять численні взаємодіючі компоненти, включаючи

біологічні, хімічні та фізичні елементи. На ці системи впливають не лише природні процеси, але також антропогенні чинники, такі як урбанізація, індустріалізація та сільське господарство. Складність цих взаємодій робить фактично неможливим імітаційне моделювання функціонування екосистем в цілому.

Також слід відзначити динамічність та нелінійність взаємодії в екосистемах. Процеси в навколишньому середовищі часто демонструють нелінійну поведінку та цикли зворотного зв'язку, які можуть призвести до неочікуваних результатів. Наприклад, зв'язок між забруднювачами та станом екосистеми не є лінійним; невелике збільшення певних забруднюючих речовин може призвести до непропорційно великого впливу на стан навколишнього середовища. Цю нелінійність потрібно точно врахувати в моделях систем підтримки прийняття рішень, щоб ефективно передбачати результати [4].

Іншими важливими чинниками, що ускладнюють проблему, є:

- часова та просторова мінливість. Екологічні явища змінюються в різних просторових масштабах і з часом. Наприклад, вплив зміни клімату може мати глобальний масштаб, але може проявлятися дуже по-різному на регіональному чи місцевому рівнях. СППР має бути в змозі врахувати ці варіації, щоб надати відповідні та точні вказівки.

- доступність і якість даних [5]. Надійні дані є ключовою вимогою будь-якої СППР. Проте масиви екологічних даних часто є неповними або невизначеними. Різниця в якості та доступності даних може значно перешкодити розробці надійних СППР. Технології дистанційного зондування Землі покращили можливості збору даних, але проблеми ефективної інтеграції цих джерел даних залишаються.

- мультидисциплінарність та інтеграція міждисциплінарних знань. Екологічна безпека та природокористування за своєю суттю є багатодисциплінарними галузями, що включають екологію, хімію, географію, соціологію, економіку тощо. Ця різноманітність створює кілька проблем для розробки СППР. Розробка СППР вимагає інтеграції знань з різних дисциплін для створення комплексної моделі. Ця інтеграція є складною через відмінності в термінології, методології та епістемології в різних дисциплінах. Ефективне спілкування та співпраця між експертами з різних галузей є важливими, але часто важко досягнутими.

- проблема залучення зацікавлених сторін (стейкхолдерів). Екологічні рішення впливають на широке коло зацікавлених сторін, включаючи державні установи, неурядові організації, підприємства та широку громадськість. Кожна група має свої пріоритети, цінності та інтереси. Залучення цих зацікавлених сторін до процесу розробки СППР має вирішальне значення для того, щоб система відповідала певним проблемам і була прийнята її користувачами. Однак узгодження суперечливих інтересів і досягнення консенсусу може бути серйозною проблемою.

- особливості регуляторної політики. Екологічна СППР повинна діяти в рамках існуючої політики та правил. Ці політики можуть значно відрізнитися в різних регіонах і можуть змінюватися з часом. Розробники та користувачі СППР повинні переконатися, що їхні системи є гнучкими та адаптованими до цих варіацій та оновлень. Це вимагає постійного моніторингу регуляторної політики та регулярних оновлень системи [6].

Розробка СППР для екологічної безпеки та природокористування включає кілька технологічних і методологічних перешкод:

- розробка та перевірка моделі. Створення точних моделей екологічних систем потребує складних математичних та обчислювальних методів. Ці моделі потрібно перевірити за допомогою історичних даних, що може бути складним завданням через вищезазначені проблеми з якістю та доступністю даних. Забезпечення точності та надійності моделей є критичним, але складним аспектом розробки СППР.

- інтерфейс користувача та досвід. Ефективність інформаційної підтримки рішень залежить не лише від точності її моделей, але й від зручності її використання. Система повинна представляти складні дані та результати аналізу в зрозумілій та доступній формі. Розробка зручних інтерфейсів, які можуть використовуватися неспеціалістами, є серйозною проблемою. Система повинна надавати корисну інформацію, не перевантажуючи користувачів технічними деталями.

- інтеграція з існуючими системами та реєстрами. Багато організацій уже використовують різні інформаційні системи для управління навколишнім середовищем. Інтеграція нової СППР із цими існуючими системами може бути технічно складною. Проблеми сумісності, протоколи передачі даних і забезпечення безперебійної роботи є критично важливими аспектами.

- масштабованість і продуктивність. Екологічні СППР часто потребують обробки великих обсягів даних і виконання складних обчислень. Необхідно забезпечити можливість масштабування системи для обробки зростаючих навантажень даних і надання своєчасних відповідей, що вимагає ретельного розгляду архітектури системи та оптимізації продуктивності.

- прозорість і підзвітність: СППР має бути прозорою в аспекті джерел походження даних, що означає чітке документування моделей, джерел даних і припущень, які використовуються в системі. Забезпечення підзвітності за рішення, прийняті на основі рекомендацій системи, також має вирішальне значення, особливо у випадках, коли ці рішення мають значний соціальний або екологічний вплив.

- конфіденційність і безпека: використання екологічних даних, зокрема даних, зібраних від приватних комерційних підприємств, створює виклики щодо конфіденційності та безпеки даних. СППР має включати надійні заходи для захисту конфіденційної інформації та відповідати відповідним нормам захисту даних.

Щоб проілюструвати проблеми та потенційні рішення у розробці екологічних СППР, корисно розглянути деякі тематичні приклади:

- адаптація до зміни клімату. СППР розробляється, щоб допомогти громадам адаптуватися до наслідків зміни клімату. Ці системи об'єднують кліматичні моделі, соціально-економічні дані та місцеві знання, щоб надавати рекомендації з таких питань, як боротьба з повеннями, сільське господарство та розвиток інфраструктури. Складність кліматичних моделей і потреба в локальному налаштуванні підкреслюють проблеми точності моделей і залучення зацікавлених сторін.

- збереження біорізноманіття. СППР використовуються для підтримки зусиль зі збереження біорізноманіття шляхом виявлення критичних середовищ існування, оцінки загроз і визначення пріоритетів дій щодо збереження. Ці

системи повинні інтегрувати екологічні моделі з даними про землекористування, економічні міркування та соціальні фактори. Міждисциплінарний характер збереження біорізноманіття та потреба в інтеграції даних у реальному часі є ключовими проблемами в цій програмі.

– оцінка забруднення, що включає моніторинг і прогнозування рівнів забруднюючих речовин, оцінку ризиків для здоров'я та рекомендації щодо заходів пом'якшення. Ці системи значною мірою покладаються на точні та своєчасні дані з різних джерел, включаючи датчики якості повітря та води, а також дані дистанційного моніторингу [7]. Забезпечення надійності даних і рівень ефективності інформування про ризики є серйозними перешкодами.

Геопросторові дані та геоінформаційні системи (ГІС) відіграють ключову роль у покращенні можливостей систем підтримки прийняття рішень (СППР) щодо екологічної безпеки та природокористування. Інтеграція цих технологій полегшує збір, аналіз і візуалізацію даних про навколишнє середовище з просторовою прив'язкою, забезпечуючи надійну основу для прийняття обґрунтованих рішень. У цій статті розглядається значення геопросторових даних і ГІС, досліджується їхній внесок, виклики та потенціал у сфері екологічних СППР.

Геопросторові дані стосуються інформації, яка має географічну складову, охоплюючи дані про поверхню Землі та її особливості [7, 8]. Ці дані мають вирішальне значення для управління навколишнім середовищем з кількох причин:

– просторове уявлення. Явища навколишнього середовища за своєю суттю є просторовими, змінюються в різних місцях і регіонах. Геопросторові дані надають засоби для точного представлення цих варіацій, дозволяючи краще зрозуміти просторові закономірності та зв'язки.

– контекстуальний аналіз. Враховуючи географічний контекст, геопросторові дані дозволяють більш комплексно аналізувати екологічні проблеми. Наприклад, вплив вирубки лісів можна краще зрозуміти, якщо аналізувати його в поєднанні з даними про землекористування, щільність населення та заповідні території.

– інтеграція даних: геопросторові дані служать загальною основою для інтеграції різних типів даних про навколишнє середовище. Ця інтеграція є важливою для створення цілісних моделей, які враховують численні фактори та їх взаємодію [9].

– моніторинг часової динаміки. Всі екологічні процеси є динамічними та розвиваються з часом. Геопросторові дані, зібрані за допомогою дистанційного зондування та інших технологій, можна використовувати для моніторингу змін з часом, надаючи критичне розуміння тенденцій і закономірностей.

ГІС-технології дозволяють маніпулювати, аналізувати та візуалізувати геопросторові дані, значно підвищуючи функціональність екологічних СППР. Нижче позначено ключові ролі ГІС у цьому контексті:

– керування даними та інтеграція. ГІС надає надійні інструменти для керування великими обсягами просторових даних із різних джерел. Це дозволяє інтегрувати дані із супутникових знімків, аерофотознімків, наземних датчиків та історичних записів, створюючи повний набір даних для аналізу.

– просторовий аналіз. ГІС пропонує широкий спектр можливостей просторового аналізу, включаючи аналіз накладання, буферний аналіз та просторову інтерполяцію. Ці інструменти дозволяють користувачам аналізувати просторові відносини, визначати закономірності та моделювати екологічні процеси. Наприклад, ГІС можна використовувати для оцінки придатності середовищ існування для видів, що знаходяться під загрозою зникнення, шляхом аналізу просторових даних про рослинність, клімат і діяльність людини.

– візуалізація та комунікація. Ефективна візуалізація має вирішальне значення для інтерпретації складних даних навколишнього середовища. ГІС надає розширені інструменти візуалізації, включаючи карти, 3D-моделі та інтерактивні інформаційні панелі, які допомагають донести результати до зацікавлених сторін. Візуалізація сприяє кращому розумінню та підтримує більш обґрунтоване прийняття рішень.

– моделювання сценаріїв. ГІС можна використовувати для розробки та оцінки різних сценаріїв, дозволяючи тим, хто приймає рішення, досліджувати потенційні наслідки різних дій. Наприклад, моделі на основі ГІС можуть моделювати вплив змін у землекористуванні на якість води, допомагаючи визначити найбільш стійкі стратегії розвитку.

Застосування ГІС в екологічних СППР є великими та різноманітними, що відображає різноманітний характер екологічних проблем. Деякі відомі програми включають:

– управління в надзвичайних екологічних ситуаціях: ГІС відіграє вирішальну роль у боротьбі з катастрофами, надаючи інструменти для картографування небезпек, оцінки ризиків і планування реагування на надзвичайні ситуації. Наприклад, ГІС можна використовувати для моделювання зон ризику затоплення, що дозволяє розробляти ефективні стратегії пом'якшення повеней і плани реагування на надзвичайні ситуації [10].

– адаптацію в умовах кліматичних змін: СППР на основі ГІС відіграють важливу роль у зусиллях з адаптації до зміни клімату. Ці системи об'єднують кліматичні моделі, оцінки вразливості та стратегії адаптації, щоб допомогти громадам і політикам упоратися з наслідками зміни клімату. ГІС може визначити зони, які піддаються найбільшому ризику через підвищення рівня моря, спеку та інші небезпеки, пов'язані з кліматом, інформуючи про цілеспрямовані заходи адаптації.

– раціональне природокористування. Ефективне управління природними ресурсами, такими як вода, ліси та корисні копалини, значною мірою залежить від геопросторових даних. СППР на основі ГІС підтримує стале управління ресурсами, надаючи інструменти для інвентаризації ресурсів, моніторингу та планування. Наприклад, ГІС можна використовувати для оптимізації розподілу води в річкових басейнах, забезпечуючи справедливий розподіл і стале використання [11].

– міське планування та розвиток. Урбанізація створює значні екологічні проблеми, включаючи втрату середовища проживання, забруднення та збільшення потреби в ресурсах. ГІС допомагає міським планувальникам у розробці стратегій сталого розвитку міст. Ці системи можуть аналізувати моделі землекористування, оцінювати вплив на навколишнє середовище та визначати відповідні місця для нових розробок.

Незважаючи на значні переваги використання геопросторових даних і ГІС в екологічних СППР, необхідно вирішити кілька проблем і обмежень:

- якість і точність даних. Надійність аналізу на основі ГІС залежить від якості та точності базових геопросторових даних. Неточні або застарілі дані можуть призвести до неправильних висновків і прийняття неправильних рішень. Забезпечення точності даних вимагає суворої перевірки та регулярного оновлення.

- інтеграція даних і сумісність. Інтеграція даних із різних джерел може бути складною через відмінності у форматах, масштабах і роздільній здатності. Проблеми взаємодії можуть перешкоджати бездоганній інтеграції геопросторових даних, впливаючи на загальну ефективність СППР.

- технічна складність. Розширені можливості ГІС вимагають спеціальних знань і навичок. Розробка та підтримка СППР на основі ГІС може бути технічно складною та ресурсомісткою, створюючи проблеми для організацій з обмеженим технічним досвідом або фінансовими ресурсами.

- обчислювальні потужності. СППР на основі ГІС часто потребують обробки великих наборів даних і виконання складного аналізу, що може вплинути на продуктивність системи. Забезпечення масштабованості та підтримання продуктивності в міру зростання обсягів даних є серйозною технічною проблемою.

Інтеграція геопросторових даних і ГІС у екологічну СППР є науково-прикладною задачею зі значним потенціалом для майбутніх досліджень. Наступні технологічні можливості матимуть принципове значення для сфери управління техногенно-екологічною безпекою:

- удосконалення дистанційного зондування: інновації в технологіях дистанційного зондування, таких як супутники з високою роздільною здатністю, дрони та датчики Інтернету речей, підвищують доступність і якість геопросторових даних. Ці досягнення дозволяють більш детально та своєчасно проводити моніторинг та аналіз навколишнього середовища [12, 13].

- штучний інтелект і машинне навчання: інтеграція ШІ та машинного навчання з ГІС відкриває нові можливості для екологічних СППР. Ці технології можуть покращити аналіз геопросторових даних, забезпечуючи точніші прогнози, виявлення аномалій і автоматизоване прийняття рішень.

- хмарні обчислення та великі дані: платформи хмарних обчислень і технології великих даних змінюють спосіб зберігання, обробки та аналізу геопросторових даних. Ці технології пропонують масштабовані рішення для керування великими наборами геопросторових даних і виконання комплексного аналізу, що робить СППР на основі ГІС більш доступним і потужним.

- інтеграція з іншими інструментами підтримки прийняття рішень: інтеграція СППР на основі ГІС з іншими інструментами підтримки прийняття рішень, такими як економічні моделі, оцінки соціального впливу та системи аналізу ризиків, може створити більш комплексні та надійні системи. Ця інтеграція може підтримувати більш цілісне прийняття рішень, яке враховує ширший спектр факторів і перспектив.

На основі вищеописаних теоретико-методичних особливостей функціонування СППР пропонується модель інфраструктури інформаційної підтримки рішень в сфері екологічного управління, яка буде актуальною саме

для території України, на якій в силу військових дій, що продовжуються, існує постійний високий ризик виникнення надзвичайних екологічних ситуацій. Особливістю моделі, що пропонується, є розділення процесів аналізу масивів екологічної інформації, що надходить, на два функціональних модулі. Модуль 1 спеціалізується на аналізі регіональних даних екологічного моніторингу, що мають постійно акумулюватись у відповідних базах даних відповідальних державних організацій та установ. Метою аналізу є проведення комплексної екологічної оцінки стану територій, формування середньо- та довгострокових прогнозів та видача рекомендацій, що можуть бути використані особами, що приймають рішення. Модуль 2 спеціалізується на оцінці ризиків від виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних в першу чергу з військовими діями. Ключовою метою є оцінка потенційних екологічних наслідків катастрофічних подій на об'єктах критичної інфраструктури (разових або таких, що тривають певний період часу). Концептуальна модель представлена у вигляді блок-схеми на рис. 1.

Розглянемо детальніше зміст наведеної моделі із прикладами застосування її елементів у попередніх дослідженнях. Зокрема, для аналізу даних, що відображають динаміку рівня навантаження на екосистеми територій, пропонується використовувати дані контактних вимірів фізичних, хімічних та біологічних параметрів атмосфери, ґрунтового покриву та акваторій. Приклади застосування інформаційних технологій для удосконалення даних процесів, зокрема для задач екологічної безпеки басейну р. Дністер та прилеглих природно-заповідних територій, представлені в роботах [14–17].

Вимоги до оперативності, точності та максимального покриття території екологічним моніторингом потребує комплексування контактних та дистанційних методів, зокрема доповнення наземних вимірів даними, отриманими дистанційно, а саме за допомогою технологій дистанційного зондування Землі з космосу та технологій безпілотних літальних апаратів із подальшою тематичною обробкою отриманих космічних та аерофотознімків. Для підвищення ефективності роботи системи інформаційної підтримки прийняття рішень, доцільно створити єдину базу таких зображень із доступом до постійної актуалізації за допомогою існуючої світової інфраструктури відкритих даних, наприклад, на базі проєктів COPERNICUS та NOAA. Приклади застосування актуальних технологій обробки космічних знімків для задач інформаційного забезпечення екологічного управління наведені в роботах [18, 19].

Якщо набір даних про стан довкілля є статистично коректним (дані багаторічні, отримані через рівні проміжки часу, дозволяють будувати часові ряди), доцільним є застосування при аналізі методів математичної статистики. Роботи [20, 21] присвячені застосуванню багатопараметричного кореляційного аналізу із розрахунком коефіцієнта динамічної кореляції для багаторічних даних регіонального рівня про стан навколишнього середовища. Методи математичного моделювання також активно використовуються при аналізі даних в геоінформаційному середовищі, зокрема, для задач раціонального видобутку мінеральних ресурсів. Приклади такого застосування наведені в [22, 23].

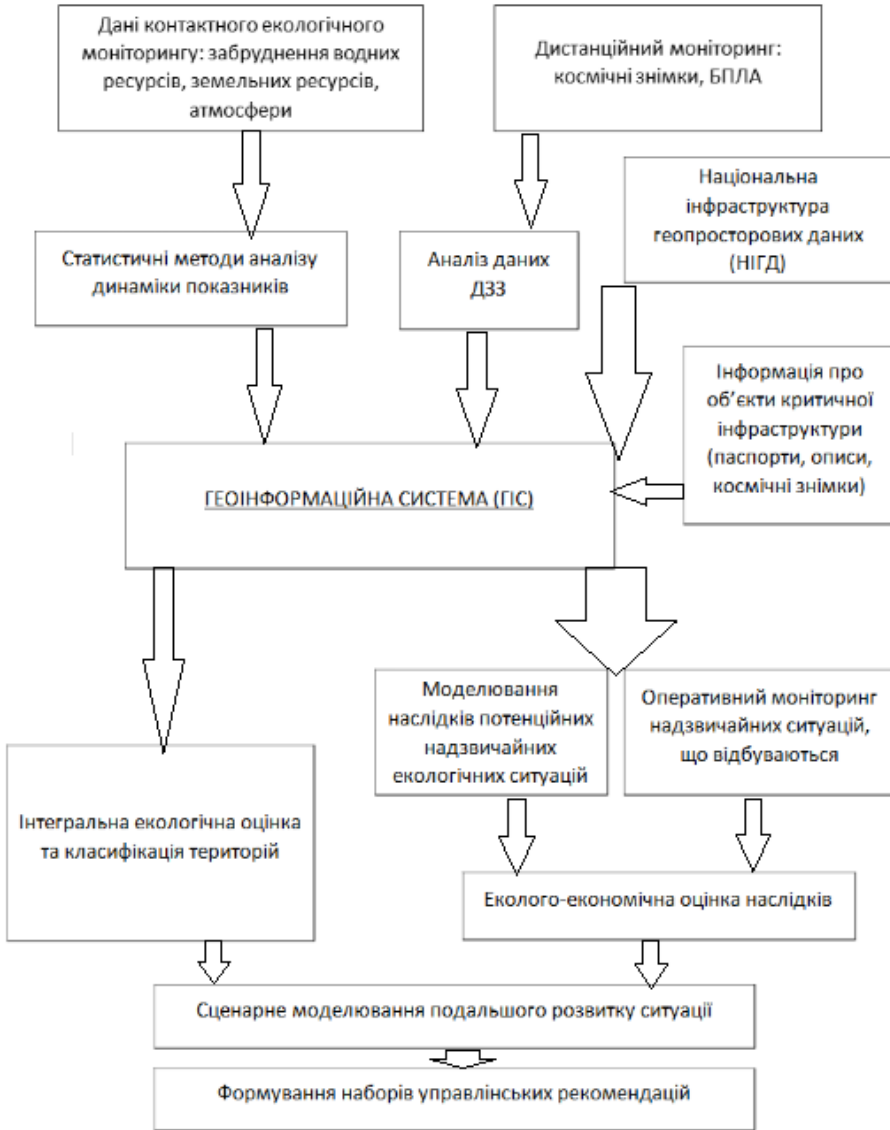


Рис. 1. Концептуальна модель системи інформаційної підтримки прийняття рішень в сфері екологічного управління на основі ГІС-технологій

Центральною складовою інфраструктури інформаційної підтримки рішень є геоінформаційна платформа. Сучасні геоінформаційні програмні продукти мають максимально широкий набір інструментів для аналітичної роботи з геопросторовими даними по більшості з необхідних користувачу СППР задач, наприклад, синтез геомоделей конкретних екосистем, як в [24–26], проведення екологічної оцінки [27], моделювання та прогнозування обстановки в морських екосистемах [28], моделювання та оцінка наслідків надзвичайних екологічних ситуацій, як, наприклад, наслідки знищення Каховської гідроелектростанції [29] або припинення видобутку мінеральних ресурсів у гірничовидобувних регіонах без належних заходів з консервації місць видобутку [30].

Висновки

Розробка систем підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки та природокористування є складною, але важливою проблемою. Виклики є багатогранними, включаючи технічні, методологічні, етичні та соціальні аспекти. Вирішення цих проблем потребує мультидисциплінарного підходу, активного залучення зацікавлених сторін і постійного вдосконалення технологій і методологій. Геопросторові дані та ГІС є незамінними компонентами сучасних екологічних систем підтримки прийняття рішень. Їхня здатність керувати, аналізувати та візуалізувати дані з просторовою прив'язкою значно підвищує здатність СППР вирішувати складні екологічні проблеми. Незважаючи на те, що розробка та впровадження СППР на основі ГІС пов'язані з кількома проблемами, поточний технологічний прогрес та інноваційні підходи обіцяють подолати ці перешкоди.

Майбутнє екологічних СППР полягає в повному використанні потенціалу геопросторових технологій, їх інтеграції з іншими передовими інструментами та залученні різноманітних зацікавлених сторін до процесу прийняття рішень. Завдяки цьому є можливість розробити більш ефективні, справедливі та стійкі рішення для управління природними ресурсами нашої планети та забезпечення екологічної безпеки для майбутніх поколінь. Незважаючи на труднощі, потенційні переваги СППР у покращенні процесу прийняття екологічних рішень є суттєвими. Надаючи керовану даними науково обґрунтовану інформацію, ці системи можуть допомогти управлінцям і практикам орієнтуватися в складнощах управління навколишнім середовищем, зрештою сприяючи більш стійкому та ефективному управлінню довкіллям. Триваюча еволюція СППР, зумовлена досягненнями в галузі обробки даних, штучного інтелекту та моделювання навколишнього середовища, обіцяє подолання поточних обмежень і відкриття нових можливостей для екологічної безпеки та природокористування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Systems Analysis & Design Methods / J.L. Whitten, L.D. Bentley, V.M. Barlow (1989). Boston: Irwin, 1989. – 797 p.
2. Довгий С.О., Бідюк П.І., Трофимчук О.М., Савенков О.І. (2011) Методи прогнозування в системах підтримки прийняття рішень. Київ. Наукова думка. 608 с.
3. Бідюк П.І. (2005) Проектування інформаційних СППР. К.: НТУУ “КПІ”. – 121 с.
4. Довгий С.О., Бідюк П.І., Трофимчук О.М. (2014) Системи підтримки прийняття рішень на основі статистично-ймовірнісних методів. Київ: Логос. 420 с.
5. Stair R.M. (1996) Principles of Information Systems. – Washington: ITPC, – 656 p.
6. Триснюк В.М. (2016) Система управління екологічною безпекою природних і антропогенно-модифікованих геосистем. Системи обробки інформації. – №12. – С. 185–188.
7. Лялько В.І., Довгий С.О., Трофимчук О.М. та ін. (2001) Інформатизація аерокосмічного землезнавства. ЦАКІЗ ІГН НАНУ. Київ, Наукова думка, – 606 с.
8. Довгий С.О., Красовський Г.Я., Радчук В.В., Трофимчук О.М., Андреев С.М. (2010). Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря: монографія. ІТГІП НАНУ. Київ, Інформ.системи, – 260 с.

9. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду / Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України; Івано-Франківський нац. тех. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ : Супрун В.П., 2021. – 343 с. // ISBN 978-617-7468-53-9.
10. Красовський Г.Я., Радчук В.В., Загородня С.А. (2016) Інформаційні ресурси інтерактивної системи підтримки рішень з питань управління екологічною безпекою українського сектору Чорного моря. *Наук. журнал Геоінформатика*, Київ, №1 (57), С. 57–65.
11. Греков Л.Д., Красовський Г.Я., Трофимчук О.М. (2007) Космічний моніторинг забруднення земель техногенним пилом. Київ. Наукова думка. 219 с.
12. Довгий С.О., Красовський Г.Я., Радчук В.В., Трофимчук О.М. та ін. (2018) Геомоделі в завданнях еколого-економічних оцінок земель. Монографія. К.: ТОВ “Видавництво “Юстон” – 256 с.
13. Пашенко Р.Е., Радчук В.В., Красовський Г.Я. та ін. (2013) Моніторинг навколишнього середовища з використанням космічних знімків супутника NOAA. Київ, ІТГП НАНУ. – 316 с.
14. Триснюк В.М., Охарев В.О., Триснюк Т.В., Сметанін К.В., Курило А.В. Створення системи мобільного екологічного моніторингу. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування: науково-технічний журнал. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (ІФНТУНГ); Івано-Франківськ: Симфонія форте. – 2018, №2 (18) – С. 120–128.
15. Trofymchuk O. M., Krasovsky, G. Y., Radchuk, V. V., Trysnyuk, V. M., Radchuk, I. V., Kreta, D. L., Zagorodnya, S. A., Sheviakina, N. A., Okhariev, V. O., Trysnyuk, T. V., Shumeiko, V. O., Atrasevych, O. V., & Vishnyakov, V. Y. (2019). Експедиційні дослідження параметрів екологічного стану затоки Бакота. *Екологічна безпека та природокористування*, 30(2), 44–55. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2019.2.44-55>
16. Т. Trysnyuk, V. Okhariev, Y. Holovan. (2020) Monitoring system of land resources pollution by oil. *Geoinformatics 2020 – XIXth International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*.
17. Триснюк В.М., Охарев В.О., Триснюк Т.В., Голован Ю.М. (2020) Система екологічного моніторингу забруднення педосфери нафтопродуктами // *Екологічна безпека та природокористування*, №2 (34), – С. 22–29.
18. V. Okhariev, V. Trysnyuk, Y. Anpilova, T. Trysnyuk. (2020) Environmental monitoring based on aerospace and terrestrial researches. XIVth International Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, 10–13 Nov. 2020, Kyiv, Ukraine.
19. Мандрик, О., Охарев, В., Триснюк, Т., & Михайлюк, Р. (2022). Моніторинг забруднення басейну Дністра внаслідок підтоплень та інших надзвичайних ситуацій. *Екологічна безпека та природокористування*, 43(3), 35–42. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.35-42>
20. Миронцов, М. Л., & Охарев, В. О. (2021). Інформаційна система підтримки управлінських рішень для завдань раціонального природокористування та екологічної безпеки. *Екологічна безпека та природокористування*, 37(1), 69–82. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.69-82>
21. V. Okhariev. (2020) Improvement of statistical method for environmental monitoring datasets interpretation. 13th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 10-13 Nov 2020, Kyiv, Ukraine.
22. М. Myrontsov, O. Karpenko, O. Trofymchuk, V. Okhariev (2021) Increasing vertical resolution in electrometry of oil and gas wells. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 101–117 ISBN 978-3-030-69188-2.

23. Myrontsov, M., Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Lebid, O., & Okhariev, V. (2022). Development and Testing of Tools for Modeling R&D Works in Geophysical Instrument-Making for Oil and Gas Well Electrometry. *Science and Innovation*, 18(3), 28–36. <https://doi.org/10.15407/scine18.03.028>
24. О.М. Трофимчук, В.М. Триснюк, Є.С. Анпілова, В.О. Охарев та ін. Геоінформаційні дослідження водних екосистем України: моніторинг та прогнозування: колективна монографія. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2022 – 212 с. ISBN 978-617-7468-53-9.
25. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS ISSN 1582-0548, №1, 2018. P. 61–67.*
26. O. Trofymchuk, V. Okhariev, M. Myrontsov, Y. Anpilova, V. Trysnyuk (2021). Transdisciplinary analytical system for support the environmental researches. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 319–331. ISBN 978-3-030-69188-2
27. Загородня, С., Новохацька, Н., Охарев, В., Попова, М., Радчук, І., Триснюк, Т., Шумейко, В., & Атрасевич, О. (2018). ГІС-оцінка антропогенного впливу в лімнологічних екосистемах Західного Полісся. *Екологічна безпека та природокористування*, 26(2), 23–33. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.2.23-33>
28. Щипцов, О., Гордєєв, А., Лебідь, О., Охарев, В., Теличко, Р., Федосєнков, С., & Шундель, О. (2023). Інформаційні технології в задачах автоматизації моделювання та прогнозування гідрфізичної обстановки в акваторії Чорного моря. *Екологічна безпека та природокористування*, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>
29. Лебідь, О., Охарев, В., Федосєнков, С., Шундель, О., Теличко, Р., & Клименков, О. (2023). Геоінформаційні технології екологічного моніторингу акваторії Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС. *Екологічна безпека та природокористування*, 48(4), 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144>
30. O. Trofymchuk, Y. Yakovliev, Y. Anpilova, V. Okhariev, M. Myrontsov (2021). Ecological situation of post-mining regions in Ukraine. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 293–306. ISBN 978-3-030-69188-2.

Стаття надійшла до редакції 16.01.2024 і прийнята до друку після рецензування 29.03.2024

REFERENCES

1. Whitten, J.L., Bentley, L.D., & Barlow V.M. (1989). *Systems Analysis & Design Methods*. Boston: Irwin.
2. Dovhyi, S.O., Bidyuk, P.I., Trofymchuk, O.M., & Savenkov. O.I. (2011). *Methods of forecasting in decision making support systems*. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
3. Bidyuk, P.I. (2005). *Development of information systems*. Kyiv: NTUU KPI [in Ukrainian].
4. Dovhyi, S.O., Bidyuk, P.I., & Trofymchuk, O.M. (2014). *Decision making support systems based on statistic and probabilistic methods*. Kyiv: Logos [in Ukrainian].
5. Stair, R.M. (1996). *Principles of Information Systems*. Washington: ITPC.
6. Trysnyuk, V.M. (2016). Environmental safety management system of natural and anthropogenically modified geosystems. *Information processing systems*, 12, 185-188 [in Ukrainian].
7. Lyalko, V.I., Dovgyi, S.O., & Trofymchuk, O.M. (2001). *Informatization of aerospace earth science*. NASU Aerospace Research Center. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
8. Dovgyi, S.O., Krasovskyi, G.Y., Radchuk, V.V., Trofymchuk, O.M., & Andreev, S.M. (2010). *Modern information technologies of environmental monitoring of the Black Sea: monograph*. ITGIS NASU. Kyiv, Inform.sistemy [in Ukrainian]

9. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., & Trysnyuk, V.M. (2021). Geoinformation technologies for environmental protection of the nature reserve fund. Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine; Ivano-Frankivsk national technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. ISBN 978-617-7468-53-9 [in Ukrainian].
10. Krasovskyi, G.Y., Radchuk, V.V., & Zarorodnia, S.A. (2016). Information resources of the interactive decision support system on environmental safety management of the Ukrainian sector of the Black Sea. *Sciences Journal of Geoinformatics*, 1 (57), 57-65 [in Ukrainian].
11. Grekov, L.D., Krasovsky, G.Y., & Trofymchuk, O.M. (2007). Space monitoring of land pollution by man-made dust. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
12. Dovgyi, S.O., Krasovskyi, G.Y., Radchuk, V.V., & Trofymchuk, O.M. (2018). Geomodels in tasks of ecological and economic assessments of lands. Monograph. Kyiv: LLC "Yuston Publishing House" [in Ukrainian].
13. Pashchenko, R.E., Radchuk, V.V., Krasovskyi, G.Y. et al. (2013). Environmental monitoring using NOAA satellite space-based images. Kyiv, ITGIS NASU [in Ukrainian]
14. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Smetanin, K.V., & Kurylo, A.V. (2018). Development of the mobile environmental monitoring system. *Environmental Safety and Sustainable Natural Resource Management: scientific and technical journal*, 2(18), 120-128 [in Ukrainian].
15. Trofymchuk, O.M., Krasovsky, G.Y., Radchuk, V.V., Trysnyuk, V.M., Radchuk, I.V., Kreta, D.L., Zagorodnya, S.A., Sheviakina, N.A., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Shumeiko, V.O., Atrasevych, O.V., & Vishnyakov, V.Y. (2019). Expeditionary studies of parameters of the ecological state of Bakota Bay. *Environmental Safety and Sustainable Natural Resource Management: scientific and technical journal*, 30(2), 44–55. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2019.2.44-55> [in Ukrainian].
16. Trysnyuk, T., Okhariev, V., & Holovan, Y. (2020). Monitoring system of land resources pollution by oil. In *Geoinformatics 2020 – XIXth International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*.
17. Trysnyuk, V.M., Okharev, V.O., Trysnyuk, T.V., & Holovan, Y.M. (2020). System of ecological monitoring of pedosphere pollution by petroleum products. *Environmental Safety and Natural Resources*, 34(2), 22–29. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.2.22-29> [in Ukrainian].
18. Okhariev, V., Trysnyuk, V., Anpilova, Y., & Trysnyuk, T. (2020). Environmental monitoring based on aerospace and terrestrial researches. In *XIVth International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 10–13 Nov. 2020, Kyiv, Ukraine.
19. Mandryk, O.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., & Mykhailyuk, R.Y. (2022). Monitoring of Dniester watershed pollution by reason of flooding and other environmental disasters. *Environmental Safety and Natural Resources*, 43(3), 35–42. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.35-42> [in Ukrainian].
20. Myrontsov, M.L., & Okhariev, V.O. (2021). Information system of decision making support for sustainable natural resource management and environmental safety. *Environmental Safety and Natural Resources*, 37(1), 69–82. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.69-82> [in Ukrainian].
21. Okhariev, V. (2020). Improvement of statistical method for environmental monitoring datasets interpretation. In *13th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 10-13 Nov 2020, Kyiv, Ukraine.
22. M. Myrontsov, O. Karpenko, O. Trofymchuk, V. Okhariev (2021). Increasing vertical resolution in electrometry of oil and gas wells. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 101-117. ISBN 978-3-030-69188-2.

23. Myrontsov, M., Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Lebid, O., & Okhariev, V. (2022). Development and Testing of Tools for Modeling R&D Works in Geophysical Instrument-Making for Oil and Gas Well Electrometry. *Science and Innovation*, 18(3), 28–36. <https://doi.org/10.15407/scine18.03.028>
24. Trofymchuk, O.M., Trysnyuk, V.M., Anpilova, E.S., Okhariev, V.O. et al. (2022). Geoinformational research of water ecosystems of Ukraine: monitoring and forecasting: collective monograph. Ivano-Frankivsk: V.P. Suprun. ISBN 978-617-7468-53-9 [in Ukrainian].
25. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V. & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare, UTPRESS ISSN 1582-0548*, 1, 2018, 61–67.
26. O. Trofymchuk, V. Okhariev, M. Myrontsov, Y. Anpilova, V. Trysnyuk (2021). Transdisciplinary analytical system for support the environmental researches. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 319-331. ISBN 978-3-030-69188-2.
27. Zagorodnya, S., Novokhatska, N., Okhariev, V., Popova, M., Radchuk, I., Trysnyuk, T., Shumeiko, V., & Atrasevych, O. (2018). GIS assessment of anthropogenic impact in the limnological ecosystems of the Western Polissia. *Environmental Safety and Natural Resource*, 26(2), 23–33. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.2.23-33> [in Ukrainian].
28. Shchyptsov, O., Gordeev, A., Lebid, O., Okharev, V., Telichko, R., Fedoseyenko, S., & Shundel, O. (2023). Information technologies in the tasks of automation of modeling and forecasting of the hydrophysical situation in the Black Sea water area. *Environmental Safety and Natural Resource*, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103> [in Ukrainian].
29. Lebid, O., Okhariev, V., Fedoseyenko, S., Shundel, O., Telychko, R., & Klymenkov, O. (2023). Geoinformation technologies for environmental monitoring of the Black Sea water area after the destruction of the Kakhovska HPP. *Environmental Safety and Natural Resource*, 48(4), 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144> [in Ukrainian].
30. O. Trofymchuk, Y. Yakovliev, Y. Anpilova, V. Okhariev, M. Myrontsov (2021). Ecological situation of post-mining regions in Ukraine. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 293-306. ISBN 978-3-030-69188-2.

The article was received 16.01.2024 and was accepted after revision 29.03.2024

Охарев Вячеслав Александрович

кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу природних ресурсів Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6270-6293> **e-mail:** okhariev.vo@gmail.com

Підсадній Сергій Григорович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-7406-500X> **e-mail:** sepgiy.pidsadny@gmail.com