

<https://doi.org/10.15407/knit2024.02.069>

УДК 528.83/.88:[550.8.05:(55:004)]:504:(627/.628.8:624.1)](477.41)

**О. Т. АЗИМОВ**<sup>1</sup>, голов. наук. співроб., д-р геол. наук, старш. наук. співроб.

ORCID 0000-0002-5210-3920

E-mail: azimov@casre.kiev.ua

**О. В. ТОМЧЕНКО**<sup>1</sup>, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

ORCID 0000-0001-6975-9099

E-mail: tomch@i.ua

**О. Л. ШЕВЧЕНКО**<sup>2</sup>, голов. наук. співроб., д-р геол. наук, старш. наук. співроб.

ORCID 0000-0002-5791-5354

E-mail: shevch62@gmail.com

**С. І. КІРЕЄВ**<sup>3</sup>, ген. дир.

ORCID 0000-0001-7059-3655

E-mail: kireev@ecocentre.kiev.ua

<sup>1</sup> Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі

Інституту геологічних наук Національної академії наук України»

вул. Олеся Гончара 55-6, Київ, Україна, 01054

<sup>2</sup> Український гідрометеорологічний інститут Державної служби України

з надзвичайних ситуацій та Національна академія наук України

Проспект Науки 37, Київ, Україна, 03028

<sup>3</sup> Державне спеціалізоване підприємство «Екоцентр»

вул. Шкільна 6, Чорнобиль, Київська обл., Україна, 07270

## МОНІТОРИНГ ГІДРОРЕСУРСІВ РАДІАЦІЙНО ЗАБРУДНЕНИХ ОСУШУВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗА КОМПЛЕКСОМ ДАНИХ КОСМІЧНИХ ЗНІМАНЬ І НАЗЕМНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ (У КОНТЕКСТІ РЕГІОНАЛЬНИХ ЗМІН КЛІМАТУ)

*На прикладі території Прип'ятської лівобережної осушувальної системи Чорнобильської зони відчуження для регіону українського Полісся було обґрунтовано прогноз настання наприкінці 2022 р. багатоводної фази (11 років) в межах повного гідрологічного циклу (22 роки), який згодом виправдався. Ознаками перебігу такого процесу є: 1) відносне збільшення сумарної кількості атмосферних опадів за період вересень — грудень у 2022 р. порівняно з аналогічним періодом попередніх років у межах усієї лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять (за даними платформи ERA5); 2) зростання ступеня обводнення території осушувальної системи — як міждамбової ділянки, так і району, що розташований північно-східніше старої дамби (це засвідчує аналітичне порівняння результатів тематичного дешифрування матеріалів, отриманих з супутника «Sentinel-2» від 02.05.2023 р., та даних космічного знімання різними апаратами за квітень-травень попередніх років); 3) встановлені факти рясних дощів, що пройшли у квітні 2023 р. у досліджуваному регіоні, затоплення, підтоплення значних площ, наводок на його території у квітні-травні цього ж року.*

Цитування: Азімов О. Т., Томченко О. В., Шевченко О. Л., Кіреєв С. І. Моніторинг гідроресурсів радіаційно забруднених осушувальних систем за комплексом даних космічних зніманих і наземних спостережень (у контексті регіональних змін клімату). *Космічна наука і технологія*. 2024. **30**, № 2 (147). С. 69—92. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.069>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Як наслідок, порівняно з періодом 2015—2021 рр., тобто вже після припинення постійного функціонування польдерної насосної станції в районі лівобережного польдера, у 2022 р. значно зросли обсяги активності  $^{90}\text{Sr}$ , що за розрахунками могли бути винесеними зі стоком з цієї території: у 4 рази порівняно з 2021 р., у 20 разів — порівняно з 2020 р. Отже, зважаючи на зазначені вище гідрометеорологічні фактори, обґрунтованим є прогноз щодо зростання обсягів активності  $^{90}\text{Sr}$ , винесених зі стоком з басейну лівобережного польдера до р. Прип'ять як у 2023 р., так і в наступні 2–3 роки.

**Ключові слова:** Чорнобильська зона відчуження, лівобережна осушувальна система, гідроресурси, моніторинг, дистанційні методи, поверхневий стік, винесення радіонуклідів.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ, МЕТИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Радіаційно-екологічний моніторинг довкілля у межах забруднених радіонуклідами територій передбачає створення відповідної інформаційно-технологічної системи для оцінювання радіаційної обстановки, виявлення тенденцій в її змінах та для подальшого прогнозування на основі регулярних спостережень. Для удосконалення структури і методичних основ моніторингу як одну з важливих його складових необхідно залучати й аерокосмічний сегмент. На сьогоднішній день в Україні є реальна можливість регулярно отримувати аерокосмічну інформацію у вигляді багатоспектральних зображень місцевості у видимому, інфрачервоному (ІЧ) та радіодіапазонах електромагнітних хвиль (ЕМХ) з просторовим розрізненням від одиниць метрів до одиниць кілометрів. За останні роки отримали подальший розвиток науково-методичні основи інтерпретації даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і вирішення на їхній основі різноманітних тематичних завдань природокористування і геоекології (зокрема, у сфері кліматології, гідрометеорології, водного, лісового, сільського господарств, геології тощо). Розроблено і стало доступним широкому колу користувачів високорозвинуте програмне забезпечення, яке дозволяє ефективно здійснювати оброблення та аналіз даних дистанційних знімків і документувати їхні результати. Отримали широкий розвиток геоінформаційні системи і технології, навігаційні системи, зокрема Глобальна система позиціонування (Global Positioning System — GPS), інтернет-, телематичні (доступ і передача інформаційних ресурсів на відстані) і краудсорсингові (з застосуванням можливостей мобільного зв'язку) технології тощо.

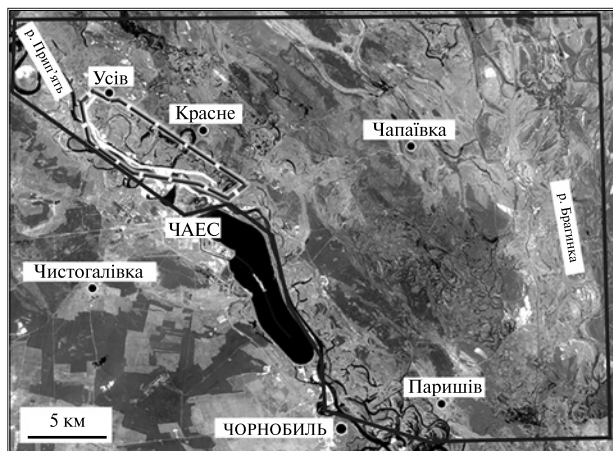
У межах Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) одним з головних завдань системи контролю радіаційної обстановки і раннього попередження пов'язаної з нею небезпеки є вивчення просторово-часових змін та визначення на цій основі районів з тенденцією до погіршення радіаційного стану, а також імовірних джерел забруднення. Повною мірою це стосується й гідрологічних систем і водних ресурсів території Зони. Таким чином, роботи із використанням даних ДЗЗ провадилися за напрямом експериментальних моніторингових досліджень та оцінювання впливу кліматичних змін на водні ресурси ЧЗВ. Для дистанційної оцінки у межах Зони обрано територію (полігон), яку наразі неможливо досліджувати польовими методами, оскільки, по-перше, вона має високий рівень радіаційного забруднення, по-друге — як прикордонну її закрито для доступу цивільним особам після початку повномасштабної російської агресії. Крім того, вона була хаотично замінована під час тимчасової окупації рашистами.

Отже, головною **метою роботи** є виявлення проявів впливу антропогенної діяльності та глобальних кліматичних змін на поширення водної поверхні, річного розподілу, обсягів поверхневого стоку і винесення з ним радіонуклідів на території, недоступній для інших, крім дистанційних, методів досліджень. **Об'єктом досліджень** є дослідний полігон, що у межах ЧЗВ належить до лівобережної Прип'ятської осушувальної системи. Зважаючи на наявність об'єктів природного й антропогенного походження, район цієї системи є своєрідним, досить складно побудованим природно-територіальним комплексом з переважанням елементів водно-болотної екосистеми. При цьому міждамбова площа Прип'ятської системи (між «старою» та «новою» лівобережними дамбами) є основною ділянкою великомасштабних досліджень (рис. 1).

Актуальність і постановка проблеми досліджень просторово-часових змін у чутливій до них системі «поверхневі води — суходіл» аргументується необхідністю розробки ефективних підходів до захисту відкритих водних об'єктів території від вторинного забруднення техногенними радіонуклідами. Отож, з-поміж **комплексу завдань** у вирішенні проблеми важливим є виконання ретроспективного аналізу стану поширення водної поверхні на лівобережній Прип'ятській системі за матеріалами дистанційних знімків минулих років, за наявними актуальними даними — поточного стану, а також оцінювання ефективності експлуатації водоохоронного комплексу в її межах, зокрема після припинення у 2015 р. постійного функціонування розташованої тут польдерної насосної станції (ПНС). Здійснення відповідних розвідок для позитивного досягнення головної мети роботи, отримання конкретних результатів і є завданням цього дослідження.

## ВИХІДНІ МАТЕРІАЛИ

Стосовно отримання важливої вихідної інформації з багатоспектральних космічних знімків (КЗ) високої й навіть середньої просторової розрізненності вкажемо, що в ідеалі з їхнім використанням можна виявляти характер просторового розподілу та площу водної поверхні (дзеркало води) на час певного гідрологічного явища (повінь, паводок, межінь тощо), визначати температуру поверхневого шару води, глибину та об'єм водойми (з обов'язковою завіркою глибини на місцевості або за наявності цифрової моделі рельєфу земної поверхні), встановлювати області (площі) тривалого накопичення води, можливого підтоплення, місця розмиву водоохоронних дамб, досліджувати відповідні супутні процеси, оцінювати характер заростання затопленої частини заплави та широких русел водотоків [1—5, 7, 9—13, 15—19, 22—24, 26—28, 32—38]. Останнє дуже важливо для визначення коефіцієнтів шорсткості і проточності русел. Шорсткість поверхні заплави значною мірою зумовлює швидкість проходження паводкових вод, а ступінь проточності русел річок та каналів визначає гідрохімічний режим та режим рівня, а



**Рис. 1.** Територія лівобережної Прип'ятської осушувальної системи у межах досліджуваної ЧЗВ (окреслено контуром чорного кольору), та міждамбова ділянка детального вивчення (пунктирний контур). Виділяються гідрографічна мережа і заболочені площі, ерозійна мережа та площі відкритих ґрунтів і поверхневих відкладів різного мінералогічного складу [3]. (Знімок з супутника IRS-1D від 29.04.1997 р., 1-й канал, панхроматичний, 0.50... 0.75 мкм)

також впливає на співвідношення поверхневої та підземної балансових складових, а головне — на темпи водообміну та інтенсивність самоочищення вод від радіонуклідів (без урахування їхнього природного розпаду). Зниження ступеня проточності викликає збільшення рівнів води у багатоводні періоди гідрологічного циклу, подальше заростання русла, евтрофікацію та сапробність водотоків.

Тобто, дані ДЗЗ, представлені багатоспектральними КЗ, стають в нагоді при вирішенні завдань оцінювання та прогнозування водного вносу радіонуклідів із затоплених заплави під час повеней різної водозабезпеченості, оцінювання об'ємів води у водоймах, їхнього балансу, а також при визначеннях ефективності таких водоохоронних споруд, як протиповеневі дамби тощо. Для цього достатньо мати дистанційні знімки на календарні дати максимальних рівнів води в річці для повеней різної забезпеченості.

Таким чином, для досягнення поставленого й означеного вище завдання у роботі використовувалися багатоспектральні КЗ, отримані протягом тривалого часового періоду (переважно

у квітні-травні) із супутників «Landsat-4/7» (від 16.04.1984 р., 20.04.2003 р. і 14.04.2004 р.), SPOT-3/4 (від 06.05.1986 р., 18.04.1994 р., 23.08.1995 р. і 14.07.1998 р.), «WorldView-2» (від 26.05.2018 р. і 06.04.2022 р.) та «Sentinel-2» (від 02.05.2023 р.). Територія лівобережної Прип'ятської осушувальної системи у межах ЧЗВ, а також прилеглі до неї ділянки вказаними КЗ охоплені повністю. Зональні знімки космічних апаратів (КА) «Landsat-4/7» мають просторову розрізненність 30 м/пкл (за винятком зображень у дальній ІЧ-зоні спектру ЕМХ, знімки SPOT-3/4 — 20 м/пкл, а знімки «Sentinel-2» — 10 м/пкл (зображення у видимому й одному з ближніх ІЧ-діапазонів, канал В8). Залучені до роботи багатоспектральні КЗ супутника «WorldView-2» в оригіналі мають просторову розрізненність 0.5 м/пкл. Проте задля отримання порівнянних результатів з матеріалами космічного знімання іншими КА, здійсненого у попередні роки, її було цілеспрямовано генералізовано до 6 м/пкл.

Для створення дистанційної основи території Прип'ятської лівобережної осушувальної системи оглядового масштабного рівня, проте високої просторової (у панхроматичного зображення — 10 м/пкл, у надирі — 5.6 м/пкл) і радіометричної розрізненності, використано КЗ IRS-1D від 29.04.1997 р. (див. рис. 1).

Результати, отримані на основі використання даних космічних зніманих земної поверхні, є інформативними для вирішення завдань з оцінювання ступеня перезволоження території та об'ємів води у наявних водоймах (особливо за останній період часу — під час функціонування та після виведення з режиму постійної роботи ПНС на лівобережній Прип'ятській системі), а також з визначення ефективності таких водоохоронних споруд, як протиповеневі дамби тощо. Для цього є теоретичне підґрунтя, що базується на відомостях про специфіку взаємодії електромагнітних хвиль різного діапазону з водною поверхнею. І насамперед це стосується оптичного випромінювання. Як відомо [12, 29], поглинання світлового потоку чистою водою мінімальне у видимій частині спектру (близько 0.47 мкм). Натомість у діапазоні понад 0.6 мкм це поглинання дуже істотно зростає.

Вже у ближньому інфрачервоному діапазоні спектру води озер, річок і морів (особливо чисті) майже повністю поглинають світловий потік. Розсіювання ж зі збільшенням довжини ЕМХ значно зменшується, при цьому зменшується й глибина проникнення сонячних променів. У дальньому ІЧ- (тепловому) діапазоні (8...14 мкм) поведінка води аналогічна до поведінки абсолютно чорного тіла, яке поглинає всю енергію потоку випромінювання, що падає на нього, і виділяє її залежно від власної температури. Таким чином, на даних ДЗЗ, зроблених в ІЧ-зоні ЕМХ, непрогріта водна поверхня чітко виділяється, і на вузькоспектральних знімках виглядає чорною.

Разом з тим наявні у воді різноманітні домішки (органічні та неорганічні речовини) впливають на відбитий потік випромінювання. Їх об'єднують у три основні групи [30]. Наявність у воді завислої речовини (твердий стік) зумовлює дуже сильне розсіювання в ній світла, що загалом не залежить від довжини хвилі випромінювання. Проте у видимій частині спектру зі збільшенням концентрації у водному середовищі завислої твердої фракції відзначається збільшення її яскравості [28]. Однак стосовно цієї групи домішок потрібно зазначити таке. На території досліджень ймовірна наявність частинок глинистих мінералів, піску лише у потоках, що проходять через проран в одній з дамб та ПНС, або ж у воді безпосередньо прилеглих до них локальних ділянок водойм. Переважна ж більшість поверхневих водних об'єктів є або замкненими, або швидкість потоків у їхніх межах не призводить до видимих змудень.

Розчинні у воді органічні сполуки (гелі) сильно поглинають ультрафіолетові та блакитні промені. Фітопланктон утворює третю, особливу групу завислої речовини. Необхідний в його складі для фотосинтезу пігмент завдяки хлорофілу дає дуже інтенсивні смуги поглинання у блакитній і червоній зонах спектру ЕМХ, за якими й визначається наявність власне фітопланктону у воді [6, 22]. Проте у весняний період року для досліджуваної нами території зазвичай притаманним є відсутність у її поверхневих водах органічних речовин.



Зазначені вище особливості взаємодії ЕМХ з водою та наявними в ній речовинами і сполуками враховано нами при виборі інформативних для вирішення поставлених завдань багатоспектральних КЗ у певних спектральних каналах та при застосуванні відповідної методики.

Для вибірки, збору та накопичення даних про кількість атмосферних опадів, що випадали на територію досліджень, використано можливості платформи ERA5 [31]. Просторова розрізненість даних ERA5 для регіону досліджень — лівобережній частині водозбору басейну р. Прип'ять — становить  $11.132 \times 11.132$  км. За допомогою ERA5 отримано таку інформацію про опади: це накопичена рідка і замерзла вода, зокрема, вода дощів та снігу, що випадають на поверхню Землі. Загалом це сума масштабних опадів (total precipitation, тобто тих опадів, що генеруються масштабними погодними умовами, такими як області низького тиску та холодні фронти) та конвективних опадів (генеруються конвекцією, що виникає, коли повітря на нижніх рівнях атмосфери виявляється теплішим і менш щільним за повітря вгорі, внаслідок чого воно і піднімається). Величина кількості опадів не включає туман, росу або опади, які випаровуються в атмосфері до того, як потраплять на поверхню Землі. Ця величина є накопичувальною у період від початку часу прогнозу до кінця кроку прогнозу.

Одиницями вимірювання опадів є товщина у метрах. Це товщина, яку мав би шар води у центрі комірки двовимірної сітки, якщо б усю кількість води, що випала в межах комірки за умови рівномірного розподілу випадіння, сумувати й віднести до цього центру. Загалом у перспективі досліджень слід бути обережним, порівнюючи змінні величини моделі з результатами конкретних наземних спостережень кількості атмосферних опадів, оскільки останні часто є локальними для певної точки у просторі та часі, і не є середніми значеннями для комірки сітки моделі чи часового кроку моделі.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

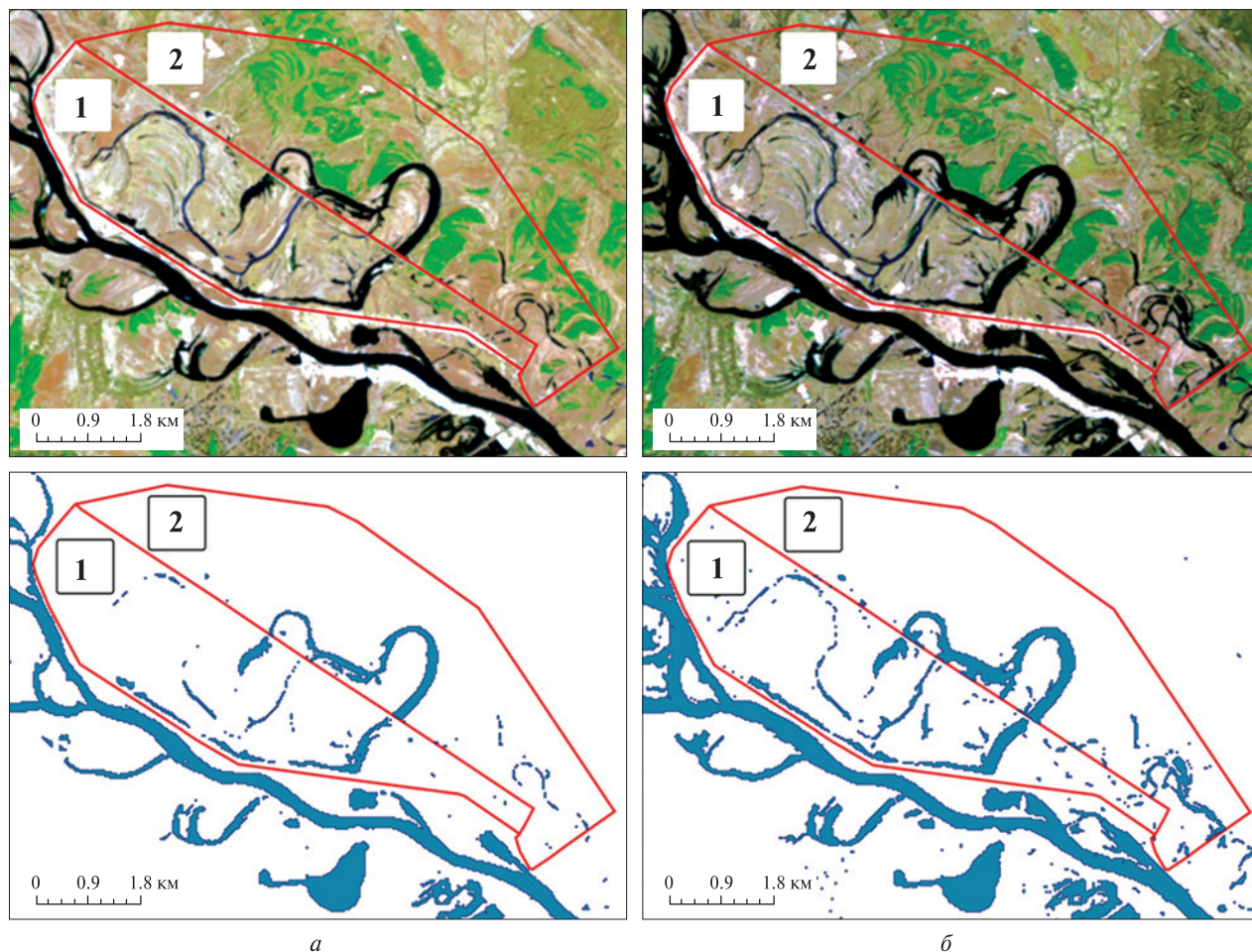
У дослідженнях застосовувалася методика комп'ютерного оброблення космічних знімків та

аналізу одержаних результатів, яку було цілеспрямовано розроблено для вивчення поверхневих водойм у межах суходолу [2, 3, 10, 11, 17, 19, 21, 22, 26, 34—38]. Зазначимо, що відповідні процедури провадилися із використанням різних відомих програмних продуктів, серед яких найширше до роботи залучалися пакети програм ERDAS Imagine, географічні інформаційні системи (ГІС) MapInfo Professional, ArcGIS та деякі інші. Перед обробкою знімків усі вони були прив'язані до прямокутної системи координат Гаусса — Крюгера (1942 р.) не менш ніж за 20 точками за допомогою програми ERDAS Imagine. Це дозволило геометрично скоригувати усі КЗ з точністю близько 1 пкл.

З метою виконання адекватного аналітичного порівняння площових об'єктів, дешифрованих на знімках високої розрізненості КА «WorldView-2», з об'єктами, що виділялися за знімками нижчої розрізненості, отриманими КА «Landsat-4/7», SPOT-3/4 і «Sentinel-2», просторову розрізненість зображень «WorldView-2» перед процедурою класифікації попередньо було загублено (генералізовано) до 6 м/пкл засобами спеціальних програмних продуктів.

Крім того, для урахування впливу різних умов зйомки на інтенсивність спектральних яскравостей об'єктів на земній поверхні (кут нахилу Сонця, прозорість атмосфери тощо) виконувалась радіометрична корекція КЗ. Це дало змогу привести різночасові знімки до рівня одного з них, після чого стало можливим проводити їхнє зіставлення. З метою радіометричної корекції КЗ бралися до уваги природні об'єкти території досліджень, спектральні яскравості яких більшу частину року можна вважати постійними.

Для чіткого виявлення за багатоспектральними супутниковими знімками відкритих водних поверхонь на фоні рослинності, відкритого ґрунту або інших відслонених осадових утворень у практиці дистанційних досліджень традиційно використовуються значення нормалізованого різницевого водного індексу *NDWI* (Normalized Difference Water Index) та відповідним чином отримані й візуалізовані зображення. Показник *NDWI* було запропоновано С. К. Макфітерсом у 1996 р. [34]. За допомогою *NDWI* можливе не



**Рис. 2.** Космічні знімки «Landsat-7 ETM+» (*a* — станом на 20.04.2003 р., *б* — станом на 14.04.2004 р.) та дешифровані з їхнім використанням відкриті водні поверхні (нижній ряд) на лівобережжі р. Прип'ять. Червоним контуром показано межі ділянок дослідження: **1** — ділянка між старою і новою дамбами, **2** — ділянка північно-східніше від старої дамби; синій колір — площі, зайняті відкритою водною поверхнею. Знімки синтезовані: канал 543 — 5-й, середній ІЧ-канал (1.55...1.75 мкм), 4-й, ближній ІЧ-канал (0.75...0.90 мкм) і 3-й, червоний канал (0.63...0.69 мкм)

лише ефективно виділення водних об'єктів на площі, наявність яких на зображенні неначе «посилюється», але добрі результати дає й моніторинг найменших змін як у їхній просторовій конфігурації, так і у власне водному середовищі (наприклад, поява фітопланктону, змуленості тощо) за різночасовими знімками.

З урахуванням переваги в інформативності щодо картування «дзеркала води» зображень ближнього інфрачервоного та зеленого спектральних осередків *NDWI* розраховується з використанням їхньої комбінації за формулою (1):

$$NDWI = \frac{I_G - I_{NIR}}{I_G + I_{NIR}}, \quad (1)$$

де  $I_{NIR}$ ,  $I_G$  — відбивна здатність об'єкта у ближній ІЧ-області (760...900 нм) та у зеленій області спектру (530...590 нм) відповідно.

Вибір вказаних діапазонів довжин ЕМХ зумовлений тим, що в зеленій області спектру водні об'єкти характеризуються максимальними значеннями відбивних характеристик, натомість у ближній ІЧ-зоні — мінімальними, оскільки в цій області наземна рослинність та відкритий ґрунт

мають максимальні значення. Таким чином, на підставі розрахунку за вказаним вище рівнянням (1) водні об'єкти вирізняються додатними значеннями *NDWI*, тоді як ґрунт та рослинність мають нульові або ж від'ємні його значення. Це дозволяє легко відділити поверхневі водойми від площ, у межах яких є рослинний покрив.

Отож, у роботі за даними багатоспектральних КЗ виконувалися розрахунки *NDWI*. При інтерпретації отриманих значень *NDWI* бралася до уваги, що вони мають відповідати таким наземним об'єктам:

- 0.2...1 — відкритій водній поверхні;
- 0.0...0.2 — площам суходолу, що зазнавали затоплення, (пере)зволоженням його площам;
- -0.3...0.0 — площам з помірно висушеним ґрунтом, неводним поверхням;
- -1... -0.3 — площам суходолу, що зазнали посухи, неводним поверхням.

Проте, враховуючи головне завдання досліджень, територія лівобережної Прип'ятської осушувальної системи у межах ЧЗВ класифікувалася на два основних класи просторових об'єктів: відкрита водна поверхня і суходіл. До класу останнього, крім власне площ непокритого рослинністю ґрунту, піску, інших осадових утворень та задернованих, заліснених площ, або ж таких, що зайняті різновидовим рослинним покривом різної щільності, також належать різноманітні техногенні об'єкти (бетонні, залізні, дерев'яні конструкції, споруди тощо).

Моніторинг змін у системі «поверхневі води — суходіл» засобами ДЗЗ/ГІС-технологій на території лівобережної Прип'ятської осушувальної системи здійснювався у межах двох відокремлених техногенними спорудами (дамбами) ділянок, що простяглися з північного заходу на південний схід. Це основна ділянка у межах ЧЗВ площею 15.424 км<sup>2</sup>, що обмежена «тілами» старої й нової дамб, і таким чином розташована між ними (ділянка № 1), та ділянка, що лежить на північний схід від старої дамби (ділянка № 2) і має площу 15.204 км<sup>2</sup> (рис. 2). Отож, за своїми геометричними параметрами ці дві ділянки, що межують між собою, є тотожними. З метою чіткої ідентифікації їхніх контурів (а отже і площ) на космічних знімках різних років, одержаних

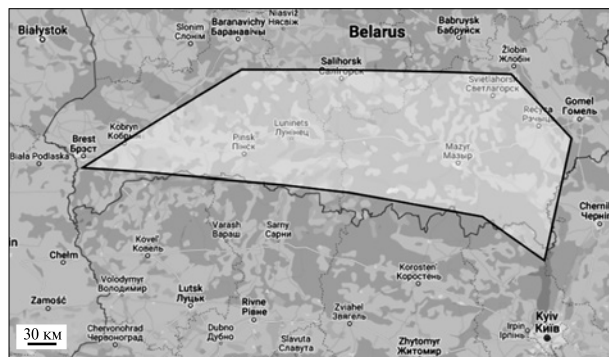


Рис. 3. Територія лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять (полігон світло-сірого кольору), на якій аналізувалися статистичні дані про атмосферні опади

з різних КА, та для картування і отримання порівнянних результатів для досліджуваних природних об'єктів у їхніх межах засобами ГІС було створено відповідні векторні «маски» контурів. При цьому контур і площа міждамбової ділянки для всіх опрацьованих КЗ були ідентичними. Натомість для аналізу гідрологічної ситуації на ділянці північно-східніше від старої дамби за знімками 1984, 1986, 1994 і 1995 рр. розглядалася територія площею 110.89 км<sup>2</sup>. Це значно перевищує площу в 15.204 км<sup>2</sup>, що деталізувалася за даними ДЗЗ 2003, 2004, 2018, 2022 і 2023 рр.

Під час аналізу та часового моніторингу кількості атмосферних опадів у регіоні Полісся, обсяги яких, на наш погляд, потенційно могли впливати на гідрологічний режим території лівобережної Прип'ятської осушувальної системи, до уваги бралися випадіння у межах лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять. Переважно це територія південної частини Республіки Білорусь (рис. 3). Її площа становить 49872 км<sup>2</sup>.

Для вибірки статистичних даних щодо кількості атмосферних опадів з бази даних, доступ до якої надається платформою ERA5 [31], саме для цієї території за конкретними географічними координатами та за попередньо визначеними місяцями та роками було створено програмний алгоритм та відповідну підпрограму (автор А. А. Андреев [26]). Певні роки визначалися роками отримання КЗ супутниковими система-



ми, які залучені до досліджень. При цьому брався до уваги також кожен з років, що передували року знімання. Протягом кожного з років, дані за якими мали аналізуватися, визначалися групи місяців по два в кожній. Підпрограмою для взятої до розгляду території розраховувалося не середнє значення кількості атмосферних опадів по кожному з двох місяців, а їхня сума за ці два місяці. Місяці було згруповано після проведення численних розрахункових ітерацій з їхніми комбінаціями від двох до чотирьох місяців у групі, з часовим зміщенням на 1...2 місяці таким чином, щоб встановити їхню інформативність щодо впливу опадів на формування відносної водності території досліджень.

Оскільки з допомогою платформи ERA5 відібрано масив даних із сумарної кількості атмосферних опадів по території лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять, що вимірюється у метрах, ці дані було перераховано відповідно до прийнятих у метеорології міліметрів шару води. Для цієї процедури використано базу даних метеорологічних показників метеостанції м. Чорнобиль, яка є найближчою до району лівобережної Прип'ятської осушувальної системи у межах ЧЗВ. У межах території лівобережної частини водозбору опади підсумовувалися за 402 комірками розміром  $11.132 \times 11.132$  км і площею  $123.921$  км<sup>2</sup> кожна.

Своєрідне калібрування сумарної кількості опадів згідно з даними чорнобильської метеостанції здійснювалося по кожному року окремо, визначався відповідний перехідний коефіцієнт. Його врахування дозволило розрахувати кількість атмосферних опадів у міліметрах шару води, що випала, для кожної з груп місяців у конкретному році. Таким чином, дані про кількість опадів у межах взятої до уваги території лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять, що формують водний баланс поверхневого стоку лівобережної Прип'ятської осушувальної системи, стали сумірними з аналогічними параметрами метеостанції м. Чорнобиль, які загалом носять локальний характер, а отже стали звичними для сприймання фахівцями-метеорологами.

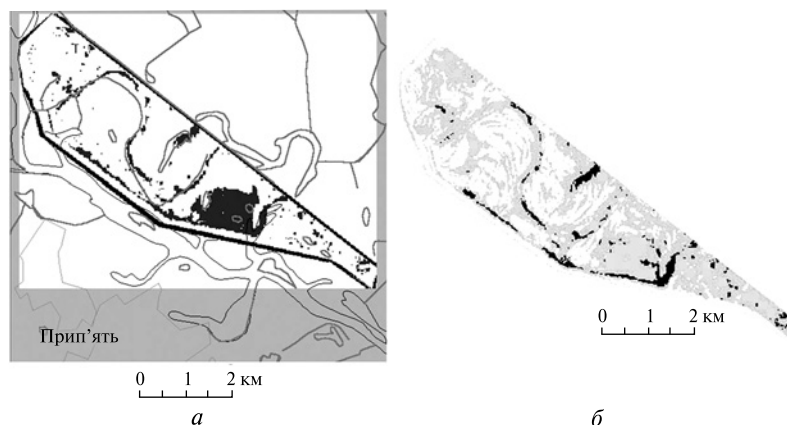
## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХНЄ ОБГОВОРЕННЯ

На основі аналізу матеріалів комп'ютерного оброблення багатоспектральних КЗ отримано тематично нові адекватні результати, що стали інформативними у процесі подальшої оцінки ефективності експлуатації водоохоронного комплексу на лівобережній Прип'ятській системі. Найперше — встановлено розподіл закартованих за даними космоснімків площ, що в різні роки у межах кожної з виділених окремих ділянок деталізації були зайняті водною поверхнею або суходолом. Це ділянки між старою та новою дамбами (ділянка № 1) та ділянка на північний схід від старої дамби (ділянка № 2) (див. рис. 2). Використання дешифрованих КЗ дозволило визначити точне просторове розміщення, контури та площі водоохоронних об'єктів, що були споруджені вже після останніх доповнень та видання топографічних карт місцевості, зроблених у 1984—1989 рр.

Зокрема, за результатами проведених раніше досліджень із застосуванням КЗ встановлено [2, 17—19], що на площі старого польдера (північно-східніше і гіпсометрично вище старої дамби) протягом 1994—1998 рр. відбувалася затримка значних обсягів поверхневого стоку. Це призвело до підтоплення та заболочення території, зростання площі водної поверхні та підвищеного винесення радіонуклідів з відповідної ділянки водозбору у р. Прип'ять. Тобто, за період після введення в експлуатацію лівобережного водоохоронного комплексу (зокрема нової дамби у 1992 р., функціонування ПНС тощо) набули істотного значення побічні негативні ефекти, що безперечно знизили загальний позитивний результат від локалізації радіонуклідного забруднення на огороженій частині заплави.

Затоплення у верхньому б'єфі старої дамби за рахунок підтоку з розташованого вище водозбору відбувалось щороку, збільшуючи фільтрацію через тіло старої дамби у міждамбову область і таким чином розширюючи площі водних об'єктів (рис. 4). Саме тому і ПНС, починаючи з 1994 р., працювала щороку, скидаючи забруднену воду з міждамбової ділянки через обвідний канал та проран у дамбі № 7 у р. Прип'ять. Тим





**Рис. 4.** Ділянка між старою та новою лівобережними дамбами у межах Прип'ятської осушувальної системи (окреслена контуром чорного кольору) з виділенням площ відкритої водної поверхні та суходолу за матеріалами багатоспектрального космічного знімання з супутників SPOT-3/4: *а* — станом на 23.08.1995 р. (дзеркало води — темний колір, згідно з [19]), *б* — сумарне затоплення міждамбової ділянки за час будівництва нової лівобережної дамби (з 1994 по 1998 рр.) за даними зйомки від 18.04.1994 р., 23.08.1995 р. та 14.07.1998 р. [18]: білий колір — площі суходолу, що не були зайняті водою у 1994—1998 рр., сірий колір — площі, що періодично були під водою у 1994—1998 рр.; темний колір — площі, що постійно були під водою у 1994—1998 рр.

самим робота ПНС призводила до додаткового затоплення площі у верхньому б'єфі старої дамби.

У результаті здійсненого у 2001—2004 рр. відповідно до рекомендації [18] розчищення каналів і реконструкції пропускних споруд на лівобережній Прип'ятській осушувальній системі зафіксовано спочатку збільшення (як і прогнозувалось — у зв'язку із збільшенням стоку), а потім зменшення винесення  $^{90}\text{Sr}$ . Концентрація  $^{90}\text{Sr}$  у гирлі каналу МК-5 (у місці зниження на 0.95 м порогу дамби № 7 узимку 2000—2001 рр.) значно зменшилась від самого початку реконструкції [6]. Завдяки останній збільшення стоку з лівобережного польдера у три рази, порівняно з 2000 р., призвело до збільшення водного винесення цього радіонукліду лише у 1.6 раза. У відносних одиницях (31 % від винесення  $^{90}\text{Sr}$  з території ЧЗВ) це значення також не стало аномальним (у порівнянні з 40 % у 1999 р.). У листопаді 2001 р. рівень води у верхньому б'єфі дамби № 7 знизився на 2 м (з 106 до 104 м Балтійської системи висот) [6]. З 2002 р. величини винесення  $^{90}\text{Sr}$  у р. Прип'ять з лівобережного польдера стали більш пропорційними до обсягів стоку.

Зменшення стоку через лівобережний польдер опосередковано підтверджують результати комп'ютеризованого дешифрування КЗ, зокре-

ма за квітень 2003 і 2004 рр., тобто за один з місяців інтенсивного обводнення і перезволоження території ЧЗВ (див. рис. 2). Згідно з ними [3, 27] площа відкритої водної поверхні на зазначеній території значно зменшилась (у декілька разів, а то майже й на порядок) порівняно з аналогічним періодом попередніх років [2, 17—19].

Так, дзеркало води на ділянці північно-східніше старої дамби закартовано на площі близько 0.76 км<sup>2</sup> станом на 20.04.2003 р. та приблизно 1.54 км<sup>2</sup> станом на 14.04.2004 р. Натомість на міждамбовій ділянці відкриту водну поверхню станом на 20.04.2003 р. дешифровано на площі приблизно 0.66 км<sup>2</sup>, а станом на 14.04.2004 р. — на площі 1.16 км<sup>2</sup> (табл. 1). Ці дистанційно отримані результати засвідчують правомірність виконаних на початку 2000-х років різноманітних гідротехнічних заходів (ліквідація дамби № 7, розчищення каналів, конструктивні зміни у водопропускних об'єктах тощо), що були спрямовані на радіоекологічно зумовлене покращення гідрологічної ситуації у межах лівобережної Прип'ятської системи.

Весняний водний баланс території формується за рахунок атмосферних опадів кінця попереднього року (листопад — грудень) та початку поточного (січень — квітень). У цей період тем-

пература атмосферного повітря низька, а його вологість підвищена, часто є наявність якогось снігового покриву, випаровування із земної поверхні незначне. Цим пояснюється зменшення зволоженості та площі водної поверхні на території досліджень навесні 2003 р., оскільки перед цим, у листопаді — грудні 2002 р., випало лише 90.382 м/54 мм) опадів (тут і далі: відповідно опади в сумі на всій взятій до розгляду території лівобережного водозбору басейну р. Прип'ять, у

метрах, та шару води, що випала у міліметрах, як класичному вираженні кількості опадів у метеорології), що менше порівняно з іншими роками (табл. 2, рис. 5, 6). Зокрема, у межах міждамбової ділянки 20 квітня 2003 р. площа дзеркала води становила 0.66 км<sup>2</sup>. Також незначні опади зафіксовано й у січні — лютому 2003 р. (97.127 м/54 мм) та березні — квітні (112.82 м/62 мм).

Схожа ситуація спостерігалася й у 2004 р., коли у березні — квітні цього року випало

**Таблиця 1. Площі відкритої водної поверхні та суходолу у межах окремих ділянок водозборів лівобережжя р. Прип'ять, що визначені за матеріалами супутникових знімків 2003, 2004, 2018, 2022 і 2023 рр.\***

Дата зйомки	Міждамбова ділянка (1)		Ділянка на північний схід від старої дамби (2)
	площа водної поверхні, км <sup>2</sup>	площа суходолу, км <sup>2</sup>	площа водної поверхні, км <sup>2</sup>
20.04.2003 р.	0.66	14.77	0.76
14.04.2004 р.	1.164	14.26	1.54
26.05.2018 р.	5.414	10.01	3.64
06.04.2022 р.	1.93	13.494	1.37
02.05.2023 р.	3.379	12.045	1.536

Примітка. Результати 2003 і 2004 рр. — за даними знімків з КА «Landsat-7», 2018 та 2022 рр. — з супутника «WorldView-2», 2023 р. — з КА «Sentinel-2»

**Таблиця 2. Статистичні значення суми атмосферних опадів у межах усієї території лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять (див. рис. 3), та в перерахунку на мм шару води, що випала, по роках і місяцях (складено з використанням даних платформи ERA5 [31])**

Місяці	Сума атмосферних опадів, м / кількість опадів (шар води, що випала), мм						
	2002 р.	2003 р.	2004 р.	2017 р.	2018 р.	2021 р.	2022 р.
Січень-лютий	134.866/ 80	97.127/ 54	171.399/ 112	115.973/ 63	114.02/ 68	176.536/ 103	158.809/ 93
Березень-квітень	109.365/ 65	112.82/ 62	127.203/ 83	170.332/ 92	118.462/ 71	135.249/ 79	155.128/ 91
Травень-червень	173.714/ 104	154.374/ 85	159.166/ 104	143.591/ 78	145.213/ 87	212.699/ 125	149.041/ 87
Липень-серпень	137.425/ 82	275.537/ 152	295.653/ 193	217.143/ 117	258.308/ 155	273.584/ 160	187.455/ 110
Вересень-жовтень	222.311/ 132	167.984/ 93	111.938/ 73	227.885/ 123	115.553/ 69	114.59/ 67	256.5/ 150
Листопад-грудень	90.382/ 54	100.96/ 56	154.578/ 101	202.75/ 110	138.574/ 83	137.769/ 81	187.431/ 110
Загалом за рік	868.063/ 518	908.802/ 502	1019.937/ 667	1077.674/ 583	890.13/ 534	1050.427/ 616	1094.364/ 641

127.203 м/83 мм, а напередодні, у листопаді — грудні 2003 р. — 100.96 м/56 мм атмосферних опадів, що є одним з найнижчих показників за цей період, представлений у табл. 2. Отож логічним є те, що за даними ДЗЗ станом на 14.04.2004 р. на міждамбовій ділянці закартовано 1.164 км<sup>2</sup> поверхні водоєм.

Починаючи з 2014 р. істотного затоплення міждамбової ділянки не відбувалося, що переважно пов'язано із порівняно невеликою кількістю опадів та середніми позитивними температурами холодного періоду 2014—2017 рр. (див. рис. 6). Це сприяло рівномірному розвантаженню поверхневих вод, зокрема шляхом їхньої інфільтрації взимку. У зв'язку із цим у 2015 р. було припинено постійну експлуатацію ПНС на старій лівобережній дамбі, чим усунуто причину додаткового збільшення концентрації <sup>90</sup>Sr у поверхневих водах верхнього б'єфу дамби. Відповідно істотно зменшились і витрати забруднених радіонуклідами неконтрольованих фільтраційних потоків під тілом нової піщаної дамби до р. Прип'ять.

За даними моніторингових спостережень Державного спеціалізованого підприємства (ДСП) «Екоцентр» винесення <sup>90</sup>Sr зі стоком з лівобережного польдера у 2015 р. становило 0.006 ТБк, у 2016 р. — 0.02 ТБк [8]. Це істотно менше у по-



Рис. 5. Кількість  $W$  атмосферних опадів, перерахована на міліметри шару води, що випала, у межах усієї території лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять у різні місяці 2002, 2003, 2004, 2017, 2018, 2021, 2022 рр. (складено з використанням даних платформи ERA5 [31])

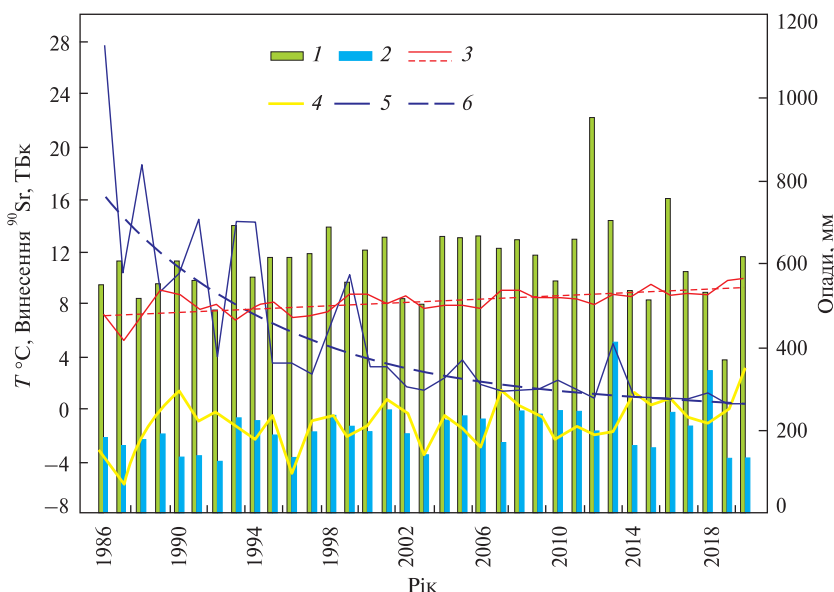
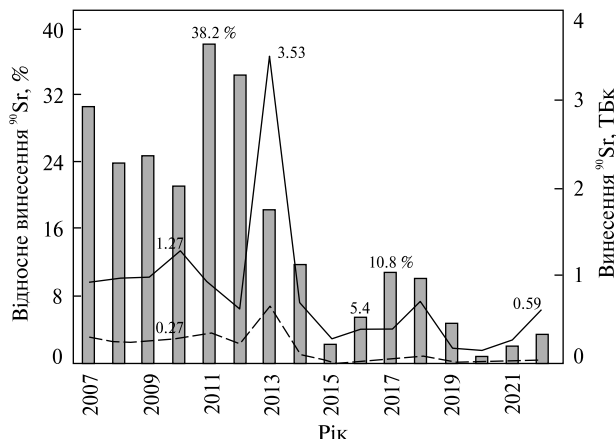


Рис. 6. Зміни водного винесення <sup>90</sup>Sr р. Прип'ять у створі м. Чорнобиль на фоні змін метеорологічних показників (дані метеостанції м. Чорнобиль): 1 — сумарні річні опади, мм шару води, що випала, 2 — опади холодного періоду року, мм, 3 — середня річна температура та багаторічний тренд її підвищення, °С, 4 — середня температура холодного періоду, °С, 5 — винесення <sup>90</sup>Sr р. Прип'ять за рік, ТБк, 6 — експоненційний тренд винесення <sup>90</sup>Sr р. Прип'ять, ТБк





**Рис. 7.** Динаміка абсолютного (штрихова лінія) та відносного (стовпчики) винесення <sup>90</sup>Sr з лівобережного польдера. Суцільна лінія — винесення <sup>90</sup>Sr з території зони відчуження загалом. Дані 2022 р. отримано розрахунковим методом (див. табл. 3)

**Таблиця 3.** Винесення <sup>90</sup>Sr зі стоком з лівобережного польдера у межах ЧЗВ у 2009—2021 рр., ТБк (складено з використанням даних ДСП «Екоцентр» [8])

Рік	Винесення	Рік	Винесення	Рік	Винесення
2009	0.24	2014	0.08	2019	0.008
2010	0.27	2015	0.006	2020	0.001
2011	0.34	2016	0.02	2021	0.005
2012	0.21	2017	0.04	2022*	0.02
2013	0.65	2018	0.07		

Примітка. Зірочка \* — дані розрахунків з використанням результатів багаторічних спостережень.

рівнянні з винесеною активністю <sup>90</sup>Sr в одному з попередніх років: 0.65 ТБк у 2013 р. (табл. 3, рис. 7).

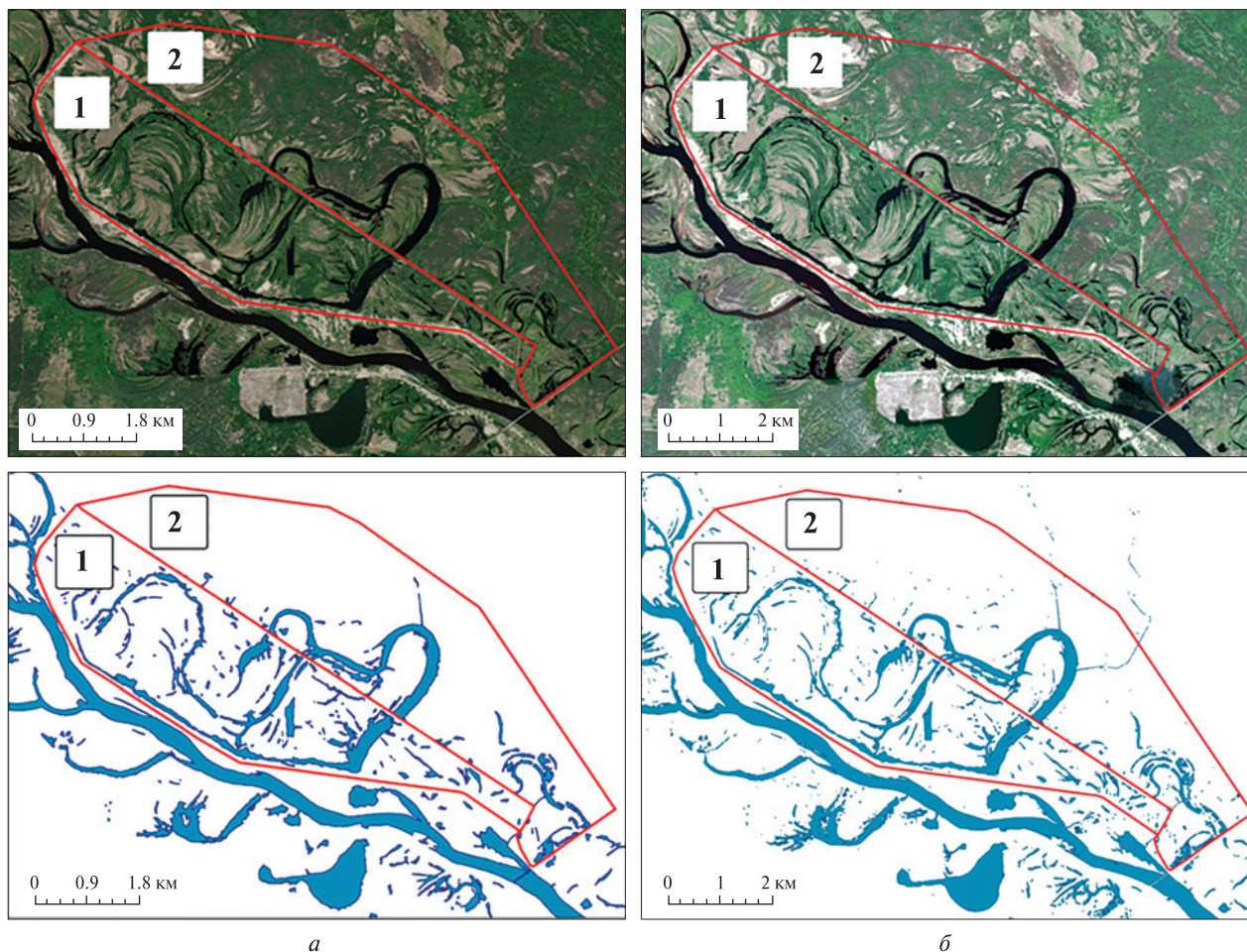
Ступінь відносно незначного обводнення ділянки між старою та новою лівобережними дамбами у 2018 і 2022 рр. певною мірою відображають результати тематичного дешифрування КЗ високої просторової розрізненності, отримані КА «WorldView-2» 26 травня 2018 р. та 06 квітня 2022 р. (рис. 8). Зокрема, станом на 26.05.2018 р. тут встановлено площу відкритої водної поверхні, рівну 5.414 км<sup>2</sup> (див. табл. 1). А це на 28% менше від аналогічного показника 7.56 км<sup>2</sup>, визначеного за КЗ станом на 18.04.1994 р. [2, 17—

19]. При цьому окремі об’єкти поверхневих вод у травні 2018 р. досить рівномірно розмішувалися на міждамбовій ділянці. Натомість у попередні роки їхня кількість помітно збільшувалася в генеральному напрямку з півночі на південь, переважно вони зосереджувалися поблизу нової дамби та району, що примикає до залізничної колії Янів — Славутич (див. рис. 4).

Водночас станом на 26.05.2018 р. (рис. 8, а) спостерігається значне зменшення площі дзеркала води також і на ділянці, що лежить північно-східніше від старої дамби (3.64 км<sup>2</sup>), якщо порівняти її з такими ж показниками дореконструкційного періоду існування Прип’ятської системи, особливо станом на 16.04.1984 р. (7.07 км<sup>2</sup>) і 18.04.1994 р. (6.68 км<sup>2</sup>) [2, 17—19]. Проте варто взяти до уваги, що за космічними знімками 1984, 1986, 1994 і 1995 рр. картування поверхні відкритих водних об’єктів у цьому районі виконано на значно більшій території, що лежить на північний схід від старої дамби і охопила загальну площу 110.89 км<sup>2</sup>. Натомість у 2003, 2004, 2018, 2022 і 2023 рр. аналізувався лише район площею 15.204 км<sup>2</sup>, що безпосередньо прилягає до старої дамби і залізничної колії.

Зазначені процеси зменшення обводнення території, що розглядається, мали чітку тенденцію до пролонгації, принаймні майже до середини весни 2022 р. Це підтверджується результатами вивчення їх засобами ДЗЗ/ГІС-технологій (рис. 8, б). Зокрема, помітніше зменшення площі, що була покрита водною поверхнею в районі досліджень, виявлено за КЗ «WorldView-2» від 06.04.2022 р. Це очевидно з порівняння аналогічних результатів, отриманих унаслідок тематичного дешифрування даних з цього ж КА від 26.05.2018 р. (див. табл. 1). Так, станом на 06.04.2022 р. зайнята водною поверхнею площа на міждамбовій ділянці зменшилася до 1.93 км<sup>2</sup>, а на ділянці на північний схід від старої дамби — до 1.37 км<sup>2</sup>. Водночас площа суходолу у їхніх межах становила 13.494 км<sup>2</sup> і 17.72 км<sup>2</sup> відповідно.

Наведені результати демонструють зв’язок із попереднім посушливим періодом 2015—2019 рр. та аномально теплою зимою 2019—2020 рр., що призвело до повсюдної рецесії рів-



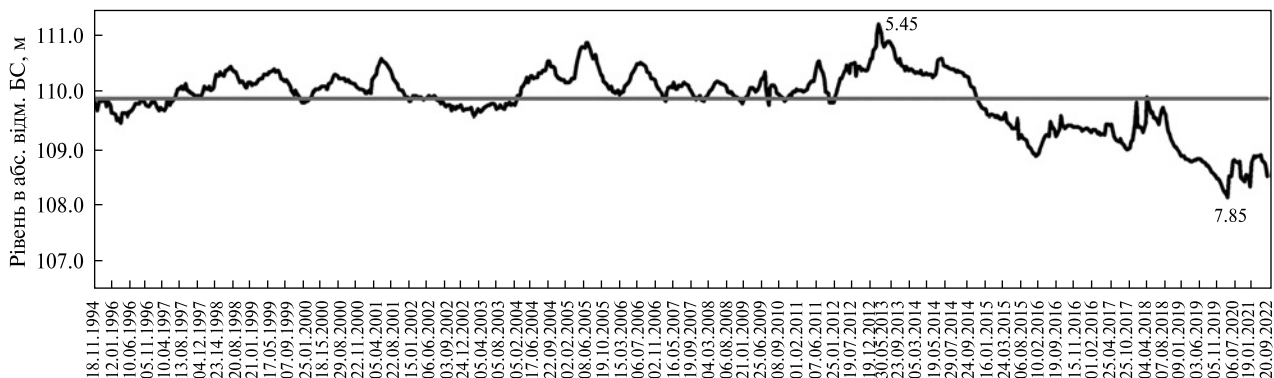
**Рис. 8.** Територія лівобережної Прип'ятської осушувальної системи. Космічні знімки, отримані з апарата «WorldView-2» (верхній ряд, синтез каналів 532 — 5-й, червоний (0.63...0.69 мкм), 3-й, зелений (0.51...0.58 мкм) і 2-й, блакитний (0.45...0.51 мкм)), та побудовані на основі їхнього застосування картосхеми водного дзеркала (нижній ряд) у межах міждамбової ділянки (1) та ділянки на північний схід від старої дамби (2): *а* — станом на 26.05.2018 р., *б* — станом на 06.04.2022 р.

нів ґрунтових вод (РГВ) та збільшення регуляторної ємності зони аерації (рис. 9). У зв'язку із значною інерційністю відновлення запасів ґрунтових вод навіть дещо вища за норму кількість атмосферних опадів холодного періоду 2021—2022 рр. (див. рис. 5) не призвела до збільшення площі водної поверхні навесні 2022 р., що вже була відчутно засушливою. У вересні — жовтні 2021 р. у межах лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять теж зафіксовано малу кількість атмосферних опадів, як сумарну, так і шару води, що випала: 114.59 м/67 мм відповід-

но. Про це виразно свідчать отримані нами статистичні дані (див. табл. 2, див. рис. 5, 6).

Отже, станом на 06 квітня 2022 р. за матеріалами космознімання площі відкритої водної поверхні на міждамбовій ділянці та на ділянці на північний схід від старої дамби були незначними і становили 1.93 км<sup>2</sup> та 1.37 км<sup>2</sup> відповідно (див. табл. 1, рис. 8, б).

За ознакою продовження рецесії РГВ у 2021—2022 рр. навіть після збільшення річної суми атмосферних опадів вище норми можна констатувати гідрологічну [39] та гідрогеологічну посухи



**Рис. 9.** Хронологічний графік коливань РГВ у свердловині 2-Г на водоносний горизонт у четвертинних відкладах на правобережній частині ЧЗВ, що охоплює період від 18.11.1994 р. до 20.09.2022 р. Максимальне значення РГВ від поверхні землі (5.45 м) зафіксовано 22.04.2013 р., мінімальне (7.85 м) — 02.03.2020 р.). Горизонтальна пряма — багаторічне середнє РГВ (109.85 м)

як прояв глобального потепління [20], а також достатньо високу гідрологічну вразливість водозбірної системи, що характерно для басейнів незарегульованих річок.

Разом з тим певне зростання встановленої методами ДЗЗ та ГІС площі водної поверхні на території досліджень у 2018 р., принаймні станом на 26 травня, могло бути зумовленим більш рясними опадами у вересні — жовтні та листопаді — грудні 2017 р., коли за даними платформи ERA5 у межах взятого до уваги водозбірного басейну р. Прип'ять їх нараховано 227.885 м/123 мм та 202.75 м/110 мм відповідно (див. табл. 2, та рис. 5). Необхідно відмітити, що внаслідок тривалого затоплення (1989—2000 рр.) початково добре проникних піщанистих ґрунтів відбулась кольматация їхнього порового простору мулом та злитизация, що значно уповільнило пропускання води з поверхні до РГВ, зменшило водовіддачу, проте збільшило водоутримувальну здатність ґрунту.

Загалом щороку, за винятком 2017 та 2022 рр., протягом чотирьох місяців з вересня по грудень включно на території лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять спостерігалася незначна сума атмосферних опадів: переважно менше 300 м (або в перерахунку 176 мм шару води, що випала).

Вочевидь, встановлене з використанням даних ДЗЗ відносне зневоднення території у 2015—

2020 рр. порівняно з періодом від кінця 1980-х років до 2010 р. зумовлене, на нашу думку, зменшенням кількості атмосферних опадів. Йдеться саме про визначальні для формування об'ємів поверхневих водойм сезони року, що особливо помітно після 2013 р. (див. рис. 5, 6). Переважно це спричинено перерозподілом опадів між тими місяцями, протягом яких у минулі роки їх випадало відносно менше. Усе це є проявами процесів глобальних змін клімату, що останнім часом дедалі більше інтенсифікуються. Під дією цих змін відбувається переважне потепління протягом більшості місяців року та розширення на північ, зокрема з захопленням Чорнобильського регіону, зони нестійкого зволоження, для якої притаманна значна втрата вологи на випаровування. Зростання температури холодного періоду призводить до частих відлиг, коли опади не замерзають або ж часто тануть і по земній поверхні стікають до дренажної мережі та/або активно інфільтруються в геологічне середовище, через те що ґрунт зони аерації недостатньо промерзає або ж розмерзається.

Процеси перерозподілу опадів та поверхневого стоку, що відбулись під дією змін клімату, відображаються також і на динаміці винесення  $^{90}\text{Sr}$ , що добре простежується при аналізі графіків змін температури, опадів та водного винесення цього радіонуклідів (див. рис. 6). Чітко помітно, що після 1990 р. (початок активної фази потепління



клімату в Україні) винесення  $^{90}\text{Sr}$ , яке значною мірою визначається періодом весняної повені, обернено залежить від температури холодного періоду року (листопад — березень). За умов, коли протягом зими утримувалась переважно від’ємна температура, проявляється також прямий зв’язок між кількістю зимових опадів і винесенням радіонукліду  $^{90}\text{Sr}$ . Очевидно, що підвищені температури та часті відлиги зимової пори не сприяють значному талому стоку і змиву радіонуклідів на початку весняної повені. Водночас аномально висока кількість опадів за холодний період 2012—2013 рр. (409 мм шару випалої води), збереженню якої до весняного танення сприяла достатньо витримана низька температура (середнє значення за холодний період  $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), забезпечила аномально високе винесення  $^{90}\text{Sr}$  із території зони відчуження у 2013 р. (див. рис. 6, 7).

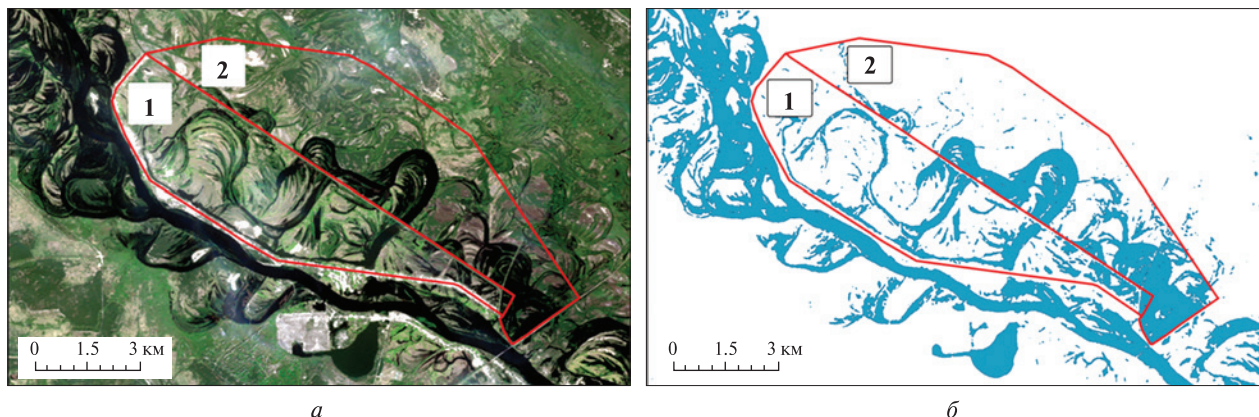
Через відсутність за останні 23 роки, за винятком 2013 р., інтенсивних весняних сніготанень з великої водозбірної території (басейну) у межах ЧЗВ не реєструються повені рівня 1999 р., поверхневі води на міждамбовій площі не накопичуються, перезволоження її з часом зменшується.

Здійснюючи порівняльний аналіз гідрологічної ситуації на території досліджень за даними космознімків різних років, потрібно звертати увагу на такий технічний параметр, як просторова розрізненість знімальної апаратури, якою їх одержано. Адже на перший погляд може здатися, що виявлені на КЗ «WorldView-2» площі відкритої водної поверхні станом на 26.05.2018 р. та 06.04.2022 р. більші за аналогічні, встановлені за знімками більш ранніх років з апаратів «Landsat» і SPOT [2, 17—19] (див. табл. 1). Це пояснюється тим, що просторова розрізненість зональних зображень супутника «WorldView-2», генералізованих до 6 м/пкл, дозволила виділити на міждамбовій ділянці детальних досліджень найвужчі протоки і найдрібніші водні об’єкти, що у багатьох випадках залежало від їхнього просторового розташування. Ці об’єкти через малі геометричні параметри не можна було виявити на знімках космічних апаратів «Landsat» та SPOT. Імовірно, що за цими КЗ середньої просторової розрізненості малорозмірні водні об’єкти спершу були

віднесені до перехідних (або змішаних) класів, які інтерпретувалися як площі із слабкозволоненими ґрунтовими утвореннями або ж площі з розвитком гідрофільної рослинності, і тому вважалися за «суходіл». Найімовірніше, значна частина з них у дійсності була мілководдям з наявністю макрофітів, яке також поросло вологолюбною рослинністю, характерною як для нього, так і для боліт, а тому насправді належала до класу об’єктів «вода».

Отже, співвідносячи просторові розрізненості зональних зображень, отриманих з супутника «WorldView-2» (генералізовано до 6 м/пкл), з аналогічними, наприклад з космічного апарата «Landsat» (30 м/пкл), можна умовно “нормалізувати” значення встановлених за знімками «WorldView-2» від 26.05.2018 р. та 06.04.2022 р. площ водного дзеркала до значень дешифрованих за знімками «Landsat-7 ETM+» (див. табл. 1). Для цього значення площі  $5.414\text{ км}^2$  потрібно поділити принаймні на 3 або навіть на 5. У цьому випадку площі відкритої водної поверхні у межах міждамбової ділянки Прип’ятської системи за знімками різних супутників можуть бути сумірними, принаймні однопорядковими. А це означає, що станом на травень 2018 р. і квітень 2022 р. ця ділянка не зазнавала значного затоплення порівняно з весняними періодами попередніх років (зокрема 2003 і 2004 рр.). Це може відображати відносну стабілізацію концентрації  $^{90}\text{Sr}$  у поверхневому стоці досліджуваного району наприкінці другого — на початку третього десятиліття XXI століття.

Останній висновок підтверджується статистичними даними з оцінених ДСП «Екоцентр» протягом ряду років обсягів активності  $^{90}\text{Sr}$ , що була винесена зі стоком з району лівобережного польдера (див. табл. 3 та рис. 7). Як видно, щорічно, вже починаючи з 2015 р. і протягом усіх років до 2021 р. включно, винесення  $^{90}\text{Sr}$  з цієї території було на один-два порядки меншим, ніж у попередньому періоді 2009—2014 рр., коли на лівобережній Прип’ятській системі ПНС працювала у штатному режимі. Також ілюстративним є те, що у 2018 р., порівняно з трьома попередніми роками, показники незначного збільшення обсягів вносу  $^{90}\text{Sr}$  зі стоком з досліджуваного



**Рис. 10.** Космічний знімок території лівобережної Прип'ятської осушувальної системи (а) та створена на його основі картосхема водної поверхні (б) у межах водозбору між старою і новою дамбами (1) та на ділянці північно-східніше старої дамби (2). Знімок отримано з супутника «Sentinel-2» 02.05.2023 р. (синтез каналів 432 — 4-й, червоний (0.65...0.68 мкм), 3-й, зелений (0.543...0.577 мкм) і 2-й, блакитний (0.458...0.522 мкм))

району (0.07 ТБк) корелюють з невеликим зростанням (у порівнянні з 2003 і 2004 рр., див. табл. 1) площі відкритої водної поверхні, закартованої за даними ДЗЗ станом на 26.05.2018 р.

Таким чином, результати використання технологій ДЗЗ спільно з геоінформаційним аналізом апріорних матеріалів наземних спостережень і випробувань підтверджують доцільність прийнятого станом на квітень 2022 р. регламенту роботи ПНС та інших гідротехнічних об'єктів на лівобережній Прип'ятській осушувальній системі ЧЗВ, а також радіоекологічну ефективність їхнього функціонування загалом.

**2023 р.** На відміну від більшості попередніх років, КЗ за квітень — травень яких було проаналізовано, дані космічного знімання супутником «Sentinel-2» від 02.05.2023 р. засвідчують зростання обводнення території як міждамбової ділянки, так і району, розташованого північно-східніше старої дамби (див. табл. 1, рис. 10). Тобто, станом на вказану дату зйомки площа дзеркала води на міждамбовій ділянці становила 3.379 км<sup>2</sup>. У порівнянні з результатами досліджень за матеріалами «WorldView-2» від 06.04.2022 р. площа відкритої водної поверхні збільшилася тут на 75 %, натомість площа суходолу зменшилася приблизно на 11 %.

Певне, хоча й не таке значне збільшення площі водної поверхні, також відмічається у меж-

ах ділянки на північний схід від старої дамби: 1.536 км<sup>2</sup> станом на 02.05.2023 р. порівняно з 1.37 км<sup>2</sup> станом на 06.04.2022 р. (12 %).

Вважаємо, що результати дистанційних досліджень водних об'єктів за даними КА «WorldView-2» і «Sentinel-2» є порівнянними. Адже просторову розрізненість знімків першого з них нами було генералізовано до 6 м/пкл, а вихідна розрізненість зональних зображень другого становить 10 м/пкл.

Кількість водних об'єктів та їхня площа у травні 2023 р. істотно збільшилася у південно-східній частині міждамбової ділянки і загалом безпосередньо поблизу обох дамб та в районі насипу залізничної колії Янів — Славутич. Візуально добре видно значне розширення водної поверхні усіх стариць, наприклад Краслянської, що на ділянці № 2 (рис. 10, б).

Виявлені з допомогою ДЗЗ/ГІС-технологій факти зростання обводнення території сигналізують про імовірне формування багатоводної фази водності у межах повного гідрологічного циклу, історично характерного для басейну р. Прип'ять. Такі цикли закінчуються маловодними фазами [14], одну з яких ми спостерігали протягом 2003—2022 рр. Причому тенденція у проходженні маловодної фази намічалася у 2021—2022 рр.

Натомість тенденція у формуванні багатоводної фази, ймовірно, підтверджується статистич-

ними даними про відносне збільшення у період вересень — грудень 2022 р. сумарної кількості атмосферних опадів у межах лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять (див. табл. 2 та рис. 5). Вони значно переважали відповідні показники 2021 р. та інших попередніх років. Так, сумарно кількість опадів у листопаді — грудні 2022 р. сягнула тут позначки 187.431 мм (або 110 мм шару води, що випала). Звичайно, охарактеризоване вище збільшення площі відкритих водних об'єктів у межах Прип'ятської лівобережної осушувальної системи станом на 02.05.2023 р. відносно збільшення сумарної кількості атмосферних опадів на прилеглий території водозбірного басейну восени й узимку 2022 р. пояснюється свого роду інерційною у часі реакцією у природній системі «атмосферні опади — поверхневі води». Адже вагому роль у співвідношенні показників у цій системі відіграють процеси масоперенесення (інфільтрації) поверхневої води у ґрунт, який є складовою частиною геосистеми «поверхневі відклади».

Іншою чіткою ознакою настання багатоводної фази водності були рясні дощі, що пройшли у квітні 2023 р. у досліджуваному регіоні, та затоплення, підтоплення значних площ, а також паводок на його території у квітні — травні цього ж року. У порівнянні з 2023 р. у квітні більшості попередніх років спостерігалися засухи та суховії, наслідком яких були численні пожежі у природних екосистемах, зокрема, у межах ЧЗВ [25]. Про розвиток багатоводної фази водності свідчить також початок у другій половині жовтня 2023 р. періоду практично перманентних дощів.

Розрахункові обсяги активності  $^{90}\text{Sr}$ , які могли бути винесеними зі стоком з району лівобережного польдера у 2022 р. [8], цілком відповідають встановленим тенденціям їхнього зростання. Так, порівняно з 2021 р. у 2023 р. виніс зріс у чотири рази, а порівняно з 2020 р. — у 20 разів.

Таким чином, загальновідомі факти рясних весняних дощів, затоплень і підтоплень значних площ та паводкової ситуації на території досліджень у 2023 р., а також зафіксований починаючи з другої половини осені цього ж року період практично безперервних дощів загалом вказують на ймовірну, започатковану в кінці 2022 р.

тенденцію до зростання обсягів активності  $^{90}\text{Sr}$ , що виноситиметься зі стоком з району лівобережного польдера до р. Прип'ять як у 2023 р., так і в наступних роках. Такий прогноз, на наш погляд, є обґрунтованим на основі поглибленого аналізу комплексу дистанційно і наземно отриманих даних із застосуванням сучасних інформаційних технологій.

#### **ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Результати застосування геоінформаційного аналізу комплексу дистанційних і наземних даних з метою оцінювання пов'язаних із кліматичними змінами трансформацій гідрологічних умов, що впливають на радіоекологічний стан у водно-болотних екосистемах на території ЧЗВ, у межах якої постійні моніторингові спостереження за водним стоком наразі об'єктивно не здійснюються, у вигляді відповідної науково-методичної рекомендації передано для використання в діяльності групи моніторингу приземного шару повітря та ландшафтів інформаційного науково-аналітичного відділу ДСП «Екоцентр» (Акт впровадження-приймання-передачі матеріалів науково-дослідних розробок від 15.06.2023 р.). Вони використовувалися з метою оцінки обсягів виносу радіонуклідів з басейнів водного стоку у межах ЧЗВ до р. Прип'ять, а також з метою оцінки пожежної небезпеки та вжиття протипожежних заходів на відповідних територіях протягом 2023 р.

У перспективі результати досліджень можуть застосовуватися фахівцями підприємств ЧЗВ з метою удосконалення системи радіоекологічного моніторингу поверхневих вод на території Зони.

#### **ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Отже, результати досліджень засвідчили, що застосування технологій ДЗЗ та ГІС є оперативним і ефективним інструментом виявлення і стеження за гідрологічними процесами, оцінювання стану поверхневих водойм на територіях, які є важкодоступними, заболоченими, значною мірою забруднені радіоактивними випадіннями і у межах



яких безпосереднє перебування персоналу повинно бути вкрай обмеженим. У комплексі з матеріалами інтегрованих у ПС наземних вимірювань дистанційно отримані дані дають адекватну моніторингову інформацію про просторово-часові зміни радіаційно-екологічної ситуації загалом на таких територіях, зокрема у межах ЧЗВ.

У ході робіт здійснено ретроспективний та поточний з використанням матеріалів багатоспектрального космічного знімання аналіз гідрологічної ситуації на території лівобережної Прип'ятської осушувальної системи у межах української частини ЧЗВ. За результатами інтерпретації комплексу наземних вимірювань і супутникових даних встановлено значну чутливість системи «поверхневі води — суходіл» до змін довкілля території, виконано картування об'єктів відкритої водної поверхні, простежено її просторово-часову мінливість.

Доцільність і обґрунтованість рекомендації [18] стосовно найраціональнішого та найефективнішого варіанту експлуатації лівобережного водоохоронного комплексу — без використання ПНС, із природним фільтраційним розвантаженням стоку через тіло «нової» піщаної дамби у р. Прип'ять — підтверджено результатами тематичного дешифрування багатоспектральних космознімків. Так, за даними ДЗЗ 2018 і 2022 рр. порівняно з періодом безперервної роботи ПНС у межах комплексу встановлено незначне обводнення та заболочення ділянки між старою та новою дамбами, а також ділянки північно-східніше старої дамби. Це може свідчити про трансформацію гідрологічних умов у межах території природно-техногенного комплексу Прип'ятської осушувальної системи, пов'язаних з процесами глобальних змін клімату (переважно глобального потепління з тенденцією до перерозподілу кількості атмосферних опадів між місяцями протягом року, що призводить до їхнього зменшення у весняний період).

Разом з цим аналітичні дані супутникових знімань та матеріали гідрометеорологічних спостережень 2023 р. дають можливість прогнозувати цілком вірогідне настання багатоводної фази водності в рамках повного гідрологічного циклу. Про це свідчать отримані на їхній основі резуль-

тати, згідно з якими у межах ЧЗВ встановлено зростання обводнення території лівобережної Прип'ятської системи. Тому прогнозується, що така ситуація у перспективі може призвести до зростання обсягів активності  $^{90}\text{Sr}$  зі стоком з району лівобережного польдера як у 2023 р., так і в наступні 2-3 роки.

Отримані у процесі досліджень результати використовувалися фахівцями підприємств ЧЗВ відповідного профілю з метою удосконалення системи радіоекологічного моніторингу поверхневих вод у Зоні, для оцінювання обсягів виносу радіонуклідів з басейнів водного стоку в її межах до р. Прип'ять, а також з метою аналізу природної пожежонебезпеки, прийняття управлінських рішень та вжиття протипожежних заходів на відповідних територіях.

**Перспективи подальших досліджень** різноманітних гідрологічних процесів та радіоекологічної обстановки на лівобережжі р. Прип'ять з метою значного зменшення або уникнення опромінення персоналу при проведенні польових робіт, на нашу думку, полягають у використанні даних космозйомки високої просторової, спектральної й радіометричної розрізненності, що виконувалася б з порівняно невеликим часовим інтервалом (у період повеней — щотижня, в інший час — один раз на 1-3 місяці). Застосування технологій безпілотних літальних апаратів у ході досліджень (гіперспектральне знімання по достатній кількості профілів і точок спостережень, або ж площове знімання з просторовою розрізненністю близько 2 см/пкл) та активне використання отриманих матеріалів спільно з наземними і супутниковими даними надасть якісно новий поштовх у вивченні радіогідрологічного й радіоекологічного стану території ЧЗВ. Отримані таким чином гетерогенні дані у перспективі є сенс інтегрально обробити, залучаючи відповідне програмне забезпечення.

Інформативність вказаного комплексу робіт порівняно з традиційними методами значно зросте, що допомагатиме точніше визначати водний баланс замкнених водойм, дозволить чіткіше встановлювати зміни у гідрографії й скоригувувати контури площ водозбірних басейнів, знання про які дадуть можливість достовірніше

встановлювати такі поточні показники радіологічного моніторингу, як модулі стоку і модулі винесення радіонуклідів, а також дасть можливість вирішувати ряд інших тематичних завдань.

Роль дистанційних методів моніторингу природно-територіальних комплексів, уражених техногенними катастрофами, стає надзвичайно важливою в умовах тимчасового припинення роботи різноманітних систем контролю компонентів довкілля, як це відбулося з автоматизованою системою контролю та з комплексом наземних

спостережень за радіаційним станом у ЧЗВ навесні 2022 р. під час її окупації регулярними військами російської федерації. У зв'язку з діючим у теперішній час воєнним станом в Україні та неможливістю доступу до природно-техногенних об'єктів на території лівобережної Прип'ятської осушувальної системи з метою оцінки їхнього впливу на навколишнє середовище ЧЗВ загалом застосування відповідних моніторингових досліджень на підставі ДЗЗ/ГІС-технологій є надзвичайно актуальним і перспективним.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Азімов О., Кураєва І., Трофимчук О., Злобіна К., Кармазиненко С. Моніторингова оцінка якості поверхневих вод у районах захоронення твердих побутових відходів. *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Геологія*. 2020. Вип. 4 (91). С. 56—60. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.08>
2. Азімов О. Т., Шевченко О. Л. Впровадження сучасних інформаційних систем як засіб підвищення ефективності водоохоронних заходів на радіоактивно забруднених площах Зони відчуження ЧАЕС. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2005. № 1. С. 37—40.
3. Азімов О. Т., Шевченко О. Л., Томченко О. В. Геоінформаційний аналіз даних космічних знімків з метою оцінювання змін радіогідрологічних умов територій. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2022. 9, № 2. С. 13—36. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.2.21>
4. Байрак Г. Р., Муха Б. П. *Дистанційні дослідження Землі: навч. посіб.* Львів: Видав. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2010. 712 с. ISBN 978-966-613-761-9
5. Вишняков В. Ю., Охарев В. О., Радчук І. В., Шумейко В. О. Реалізація геоінформаційних технологій підтримки прийняття рішень для управління водокористуванням та екологічною безпекою озерних екосистем. *Уч. записки Таврического нац. ун-та ім. В. И. Вернадского. Географія*. 2013. 26 (65), № 1. С. 49—54.
6. Деревець В. В., Кіреєв С. І., Обрізан С. М., Годун Б. О., Халява В. Г., Купченко П. Г., Бицуля В. В., Горський Б. О., Назаров О. Б., Паланський В. А. Радіаційний стан зони відчуження в 2001 році. *Бюл. екологічного стану зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення*. 2002. № 1 (19). С. 3—31.
7. Довгий С. О., Лялько В. І., Трофимчук О. М., Федоровський О. Д., Азімов О. Т., Верюжський Г. Ю., Вульфсон Л. Д., Греков Л. Д., Кононов В. І., Копійка О. В., Костюченко Ю. В., Крот В. М., Ловцов І. В., Перерва В. М., Прусов В. А., Рябоконтенко О. Д., Савицький О. А., Сахацький О. І., Терьоменко О. М., Ходоровський А. Я., Яценко О. В. *Інформатизація аерокосмічного землезнавства*; За ред. С. О. Довгого, В. І. Лялька. Київ: Наук. думка, 2001. 607 с. ISBN 966-00-0743-4.
8. Інформаційний звіт про результати радіаційно-екологічного моніторингу зони відчуження за 2022 рік. *Чорнобиль: ДСП «Екоцентр»*, 2022. 35 с.
9. Кондратьєв К. Я., Поздняков Д. В. *Дистанционные методы слежения за качеством природных вод*. Ленинград: Наука, 1985. 62 с.
10. Красовський Г. Я., Волошкіна О. С., Пономаренко І. Г., Слободян В. А. Інвентаризація водойм регіону з застосуванням космічних знімків і геоінформаційних систем. *Екологія і ресурси*. 2005. № 11. С. 19—42.
11. Красовський Г. Я., Петросов В. А. *Інформаційні технології космічного моніторингу водних екосистем і прогнозу водоспоживання міст*. Київ: Наук. думка, 2003. 224 с.
12. Кронберг П. *Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии*. Пер. с нем. Москва: Мир, 1988. 343 с. ISBN 5-03-000545-5
13. Лялько В. І., Федоровський О. Д., Боєв А. Г., Драновський В. Й., Книш В. В., Коротаєв Г. К., Сіренко Л. А., Азімов О. Т., Бушуєв Є. І., Вульфсон Л. Д., Єфімов В. Б., Колодяжний О. А., Костюченко Ю. В., Курекін О. О., Малиновський В. В., Машковський О. Г., Мичак А. Г., Мойсеєнко К. Я., Перерва В. М., Пустовойтенко В. В., Радайка Л. М., Сахацький О. І., Суслін В. В., Ходоровський А. Я., Цимбал В. М., Якимчук В. Г., Волошин В. І., Гунченко В. О., Колоколов О. О., Котляр О. Л., Ліщенко Л. П., Рябоконтенко О. Д., Теременко О. М., Харечко О. Г., Шепець М. С. *Космос — Україні: Атлас тематично дешифрованих знімків території України з українсько-російського*

- космічного апарата «Океан-О» та інших космічних апаратів. Під ред. В. І. Лялька, О. Д. Федоровського. Київ: НАН України, НКА України, 2001. 106 с.
14. Ободовський Ю. О., Хільчевський В. К., Ободовський О. Г. *Гідроморфоєкологічна оцінка руслових процесів річок верхньої частини басейну Тиси (в межах України): монографія*. За ред. О. Г. Ободовського. Київ: Прінт-сервіс, 2018. 193 с. ISBN 978-617-7069-71-4
  15. Підгородецька Л. В., Зуб Л. М., Федоровський О. Д. Використання інформації космічного геомоніторингу для оцінки екологічного стану водойм на прикладі озера Світязь. *Космічна наука і технологія*. 2010. **16**, № 4. С. 51—56. <https://doi.org/10.15407/knit2010.04.051>
  16. Федоровський О. Д., Сіренко Л. Я., Якимчук В. Г. Використання космічних знімків для контролю водних об'єктів. *Нові методи в аерокосмічному землезнавстві: наук.-метод. посіб.* Відп. ред. В. І. Лялька. Київ: ЦАКДЗ ІГН НАН України, 1999. С. 143—148. ISBN 966-02-1398-0
  17. Шевченко О. Л., Азімов О. Т., Сахацький О. І. Сучасні дистанційні аерокосмічні технології в комплексі радіогідрологічного моніторингу. *Вісник Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Геологія*. 2004. Вип. 29. С. 40—44.
  18. Шевченко О. Л., Козицький О. М., Наседкін І. Ю., Акінф'єв Г. О., Кіреєв С. І., Сахацький О. І., Ходоровський А. Я. Аналіз ефективності та варіанти експлуатації водоохоронного комплексу Лівобережної польдерної системи. *Пробл. Чорнобильської зони відчуження*. 2001. Вип. 7. С. 112—125.
  19. Шевченко О. Л., Наседкін І. Ю., Козицький О. М., Шабатура С. С., Ходоровський А. Я., Сахацький О. І., Азімов О. Т., Акінф'єв Г. О., Долін В. В., Осадчий В. І., Левченко А. С., Тишкевич Ю. О., Чарний Д. В., Онанко Г. Г., Гудзенко В. В. Розрахунок водно-радіаційного балансу осушувальних систем лівобережної заплави р. Прип'ять в 30-км зоні ЧАЕС. Київ: НІЦ РПД НАН України, 1998. 1. 213 с.
  20. Шевченко О. Л., Скорбун А. Д., Чарний Д. В. Підпорядкованість коливань рівнів ґрунтових вод в басейні р. Південний Буг кліматичним змінам. *Вісник Одес. нац. ун-ту. Географічні та геологічні науки*. 2021. **26**, вип. 2 (39). С. 175—194. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2\(39\).246202](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2(39).246202)
  21. Шевченко О. Л., Шестопалов В. М., Сахацький О. І., Наседкін І. Ю., Гудзенко В. В., Акінф'єв Г. О. Лівобережна заплава: шляхи вирішення проблеми перезволоження та зростання вносу <sup>90</sup>Sr через проран в дамбі № 7. *Бюл. екологічного стану Зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення*. 1999. № 14. С. 51—57.
  22. Шумаков Ф. Т., Азімов А. Т. Об использовании геоинформационных технологий и данных космических изображений для оценки качества воды в водоемах. Матеріали XII Міжнар. конф. «Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти» (Київ, 13—15 травня 2013 р.). EAGE, *EarthDoc*, 2013. id: cp-347-00049. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142427>
  23. *Advances in geoscience and remote sensing*; Jedlovac G. (Ed.). Vukovar, Croatia: In-Teh, 2009. 741 p.
  24. Azimov O. T., Dorofey Ye. M., Trofymchuk O. M., Kuraeva I. V., Zlobina K. S., Karmazyenko S. P. Monitoring and assessment of impact of municipal solid waste landfills on the surface water quality in the adjacent ponds. 13th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (12—15 November 2019, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*. **2019**. P. 1—6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903228>
  25. Azimov O. T., Kireev S. I., Tomchenko O. V., Veremenko D. M. Monitoring of the radioecological state of the atmospheric air using the ground survey and multispectral satellite imaging data during wildfires. 16th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (15—18 November 2022, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*. **2022**. P. 1—5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580105>
  26. Azimov O. T., Tomchenko O. V., Andreiev A. A., Dorofey Ye. M., Shevchenko O. L., Kireev S. I. Monitoring of the current underflooding processes of drainage systems in the Exclusion Zone by means of remote sensing and GIS-technologies. 17th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (7—10 November 2023, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*. **2023**. P. 1—5.
  27. Azimov O., Tomchenko O., Shevchenko O., Dorofey Ye. Satellite monitoring of the natural and technogenic events on the left-bank Pripyat reclamation system of the Chernobyl Exclusion Zone. 16th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*. **2022**. P. 1—6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580102>
  28. Campbell J. B., Wynne R. H. *Introduction to remote sensing*; 5th ed. New York, London: The Guilford Press, 2011. 718 p. ISBN 978-1-60918-176-5
  29. Doerffer R. Zum Problem der Fernerkundung von Substanzen im Wasser mit dem Multispektralabtaster. *Bildmessung und Luftbildwesen*. 1978. **4**. P. 133—138.
  30. Doerffer R. Untersuchungen über die Verteilung oberflächennaher Substanzen im Elbe-Ästuar mit Hilfe von Fernmeßverfahren. *Archiv für Hydrobiologie, Suppl.* 1979. **43** (Elbe-Ästuar 4) (2/3). P. 119—224.
  31. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>

32. Fekrache F., Boudeffa K. Application of mapping and statistical study for the assessment of surface water quality in the Safsaf River (North-Eastern Algeria). *Res. Square*. 2023 (October 16th). P. 1—17. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3440178/v1>
33. Heiskary S. A., Wilson C. B. *Minnesota lake water quality assessment report: Developing nutrient criteria* (third ed.). Minnesota Pollution Control Agency, September 2005. 188 p.
34. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sensing*. 1996. **17** (7). P. 1425—1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
35. Olmanson L. G., Bauer M. E., Brezonik P. L. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sensing of Environment*. 2008. **112** (11). P. 4086—4097.
36. Rowland E. D., Okpobiri O. Floodplain Mapping and Risks Assessment of the Orashi River Using Remote Sensing and GIS in the Niger Delta Region, Nigeria. *J. Geographical Res.* 2021. **4** (2). P. 10—16. <https://doi.org/10.30564/jgr.v4i2.3014>
37. Rubin H. J., Lutz D. A., Steele B. G., Cottingham K. L., Weathers K. C., Ducey M. J., Palace M., Johnson K. M., Chipman J. W. Remote sensing of lake water clarity: Performance and transferability of both historical algorithms and machine learning. *Remote Sensing*. 2021. **13** (8). 1434. <https://doi.org/10.3390/rs13081434>
38. Santos G. M. D., Navarro-Pedreño J., Meléndez-Pastor I., Gómez Lucas I. (2021). Using Landsat Images to Determine Water Storing Capacity in Mediterranean Environments. *J. Geographical Res.* **4** (4). P. 58—67. <https://doi.org/10.30564/jgr.v4i4.3780>
39. Van Loon A. F. Hydrological drought explained. *WIREs Water*. 2015. **2** (4). P. 359—392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>

## REFERENCES

1. Azimov O., Kuraeva I., Trofymchuk O., Zlobina K., Karmazynenko S. (2020). Monitoring assessment of the surface water quality within the areas for the municipal solid waste disposal. *Visnyk of Taras Shevchenko Nat. Univ. of Kyiv: Geology*, **4** (91), 56—60. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.08> [in Ukrainian with English abstract].
2. Azimov O. T., Shevchenko O. L. (2005). Instillation the modern information systems as a means for increasing the effectiveness of water protection measures within radioactivity contaminated areas of the Chornobyl Exclusion Zone. *Ecology of the Environment and Safety of Human Livelihood*, **1**, 37—40 [in Ukrainian with English summary].
3. Azimov O. T., Shevchenko O. L., Tomchenko O. V. (2022). Geoinformation analysis of the satellite imagery data in order to assess the changes in radiohydrological conditions over the study territories. *Ukr. J. Remote Sensing*, **9** (2), 13—36. <https://doi.org/10.36023/ujsr.2022.9.2.213> [in Ukrainian with English abstract].
4. Bairak G. R., Mukha B. P. (2010). *Remote sensing of the Earth: Training manual*. Lviv: Ivan Franko Nat. Univ. Publ. center, 712 p. ISBN 978-966-613-761-9 [in Ukrainian].
5. Vyshnyakov V. Y., Okhariev V. O., Radchuk I. V., Shumeiko V. O. (2013). GIS-technologies for decision making in context of water resource management and ecological safety of limnological ecosystems. *Sci. Notes of Taurida V. Vernadsky Nat. Univ.: Geography*, **26** (65), **1**, 49—54 [in Ukrainian with English summary].
6. Derevets V. V., Kireev S. I., Obrizan S. M., Hodun B. O., Khaliava V. H., Kupchenko P. H., Bytsulia V. V., Horskyi B. O., Nazarov O. B., Palanskyi V. A. (2002). The radiation status of the Exclusion Zone in 2001. *Bull. Ecological State Exclusion Zone and Zone Absolute (Mandatory) Resettlement*, **1** (19), 3—31 [in Ukrainian].
7. Dovhyi S. O., Lyalko V. I., Trofymchuk O. M., Fedorovsky O. D., Azimov O. T., Veriuzhskiy G. Yu., Vulfson L. D., Grekov L. D., Kononov V. I., Kopyika O. V., Kostyuchenko Yu. V., Krot V. M., Lovtsov I. V., Pererva V. M., Prusov V. A., Riabokononko O. D., Savytskyi O. A., Sakhatsky O. I., Teremenko O. M., Khodorovsky A. Ya., Yatsenko O. V. (2001). *Informationisation of aerospace Earth science*. Eds. S. O. Dovhyi, V. I. Lyalko. Kyiv: Naukova Dumka, 607 p. ISBN 966-00-0743-4 [in Ukrainian].
8. Information Report on the results of radiation and environmental monitoring of the Exclusion Zone for 2022. (2022). Chornobyl: SSE Ecocentre, 35 p. [in Ukrainian].
9. Kondratiev K. Ya., Pozdnyakov D. V. (1985). *Remote methods of controlling after quality of natural waters*. Leningrad: Nauka, 62 p. [in Russian].
10. Krasovsky G. Y., Voloshkina O. S., Ponomarenko I. G., Slobodian V. A. (2005). Inventory of water bodies in the region using the satellite images and geoinformation systems. *Ecology and Resources*, **11**, 19—42 [in Ukrainian with English abstract].
11. Krasovsky G. Y., Petrosov V. A. (2003). *Information technologies of the satellite monitoring of aquatic ecosystems and predicting urban water consumption*. Kyiv: Naukova Dumka, 224 p. [in Ukrainian].
12. Kronberg P. (1985). *Fernerkundung der Erde: Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 394 p. ISBN 3-432-94601-5
13. Lyalko V. I., Fedorovsky O. D., Boyev A. G., Dranovsky V. Y., Knysh V. V., Korotaev G. K., Sirenko L. A., Azimov O. T., Bushuev Ye. I., Vulfson L. D., Yefimov V. B., Kolodyazhnyy O. A., Kostyuchenko Yu. V., Kurekin A. S., Malynovsky V. V., Mashkovsky O. G., Mychak A. G., Moysyenko K. Ya., Pererva V. M., Pustovoytenko V. V., Radaykina L. M., Sakhats-



- ky O. I., Suslin V. V., Khodorovsky A. Ya., Tsymbal V. N., Yakymchuk V. G., Voloshyn V. I., Gunchenko V. O., Kolokolov O. O., Kotlyar O. L., Lischenko L. P., Riabokononko O. D., Teremenko O. M., Kharechko O. G., Shchepets M. S. (2001). *Space for Ukraine: Atlas. Thematically interpreted images of Ukraine's territory acquired in the frame of Ukrainian-Russian "Okean-O" program and other space missions*. Eds. V. I. Lyalko, O. D. Fedorovsky. Kyiv: NAS of Ukraine, Nat. Space Agency of Ukraine, 99 p.
14. Obodovskiy Y. O., Khilchevskiy V. K., Obodovskiy O. G. (2018). *Hydromorphoecological assessment of the river bed processes of rivers in the upper Tisza river basin (within Ukraine): Monograph*. Ed. O. G. Obodovskiy. Kyiv: Print-Service, 193 p. ISBN 978-617-7069-71-4 [in Ukrainian with English abstract].
  15. Podgorodetskaia L. V., Zub L. N., Fedorovskii O. D. (2010). The use of remote sensing data for estimation of ecological state of water bodies by the example of the Svityaz Lake. *Space Science and Technology*, **16** (4), 51–56. <https://doi.org/10.15407/knit2010.04.051> [in Ukrainian with English abstract].
  16. Fedorovsky O. D., Sirenko L. Ya., Yakymchuk V. G. (1999). Using space images for controlling of water objects. *New methods in the aerospace Earth exploration: Sci. and learning guide*. Ed. V. I. Lyalko. Kyiv: CASRE IGS NAS of Ukraine, 143–148. ISBN 966-02-1398-0 [in Ukrainian].
  17. Shevchenko O., Azimov O., Sakhatsky O. (2004). Modern remote aerospace technologies for integral radiohydrological monitoring. *Visnyk of Taras Shevchenko Nat. Univ. of Kyiv: Geology*, **29**, 40–44 [in Ukrainian with English summary].
  18. Shevchenko A. L., Kozitsky O. M., Nasedkin I. Yu., Akinfiev G. A., Kireev S. I., Sakhatsky A. I., Khodorovsky A. Y. (2001). Performance analysis and the variants of water-protecting complex at Left-bank polder system. *Probl. Chernobyl Exclusion Zone*, **7**, 112–125 [in Ukrainian with English abstract].
  19. Shevchenko O. L., Nasedkin I. Yu., Kozitsky O. M., Shabatura S. S., Khodorovsky A. Ya., Sakhatsky O. I., Azimov O. T., Akinfiev G. O., Dolin V. V., Osadchyi V. I., Levchenko A. S., Tyshkevych Yu. O., Charnyi D. V., Onanko G. G., Gudzenko V. V. (1998). Calculation of the water-radiation balance of reclamative systems of the Left-bank flood plain of the Pripyat river in 30-km Zone of the ChNPP: Report on research. Kyiv: Radioecological Center, NAS of Ukraine. **1**, 213 p. [in Ukrainian].
  20. Shevchenko O. L., Skorbut A. D., Charny D. V. (2021). Subordination of fluctuations of groundwater levels in the Southern Bug River basin to climate change. *Odesa Nat. Univ. Herald: Geography & Geology*, **26**, 2 (39), 175–194. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2\(39\).246202](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2(39).246202) [in Ukrainian with English abstract].
  21. Shevchenko O. L., Shestopalov V. M., Sakhatsky O. I., Nasedkin I. Yu., Gudzenko V. V., Akinfiev G. O. (1999). Left-bank floodplain: ways to solve the problem of overwetting and increase <sup>90</sup>Sr removal through the duct in the dam No 7. *Bull. Ecological State Exclusion Zone and Zone Absolute (Mandatory) Resettlement*, **14**, 51–57. [in Ukrainian].
  22. Shumakov F. T., Azimov O. T. (2013). On the use of GIS and satellite imagery data to assess the quality of water in reservoirs. *12th EAGE Int. Conf. on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects (13-16 May 2013, Kiev, Ukraine)*. *Conf. Papers*, id: cp-347-00049. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142427> [in Russian with English summary].
  23. *Advances in geoscience and remote sensing*. Ed. G. Jedlovec. (2009). Vukovar, Croatia: In-Teh, 741 p.
  24. Azimov O. T., Dorofey Ye. M., Trofymchuk O. M., Kuraeva I. V., Zlobina K. S., Karmazylenko S. P. (2019). Monitoring and assessment of impact of municipal solid waste landfills on the surface water quality in the adjacent ponds. 13th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (12–15 November 2019, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*, **2019**, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903228>
  25. Azimov O. T., Kireev S. I., Tomchenko O. V., Veremenko D. M. (2022). Monitoring of the radioecological state of the atmospheric air using the ground survey and multispectral satellite imaging data during wildfires. 16th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (15–18 November 2022, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*, **2022**, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580105>
  26. Azimov O. T., Tomchenko O. V., Andreiev A. A., Dorofey Ye. M., Shevchenko O. L., Kireev S. I. (2023). Monitoring of the current underflooding processes of drainage systems in the Exclusion Zone by means of remote sensing and GIS-technologies. 17th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (7–10 November 2023, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*, **2023**, 1–5.
  27. Azimov O., Tomchenko O., Shevchenko O., Dorofey Ye. (2022). Satellite monitoring of the natural and technogenic events on the left-bank Pripyat reclamation system of the Chornobyl Exclusion Zone. 16th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine). *Conf. Papers*, **2022**, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580102>
  28. Campbell J. B., Wynne R. H. (2011). *Introduction to remote sensing* (5th ed.). New York, London: Guilford Press, 718 p. ISBN 978-1-60918-176-5
  29. Doerffer R. (1978). Zum Problem der Fernerkundung von Substanzen im Wasser mit dem Multispektralabtaster. *Bildmessung und Luftbildwesen*, **4**, 133–138.

30. Doerffer R. (1979). Untersuchungen über die Verteilung oberflächennaher Substanzen im Elbe-Ästuar mit Hilfe von Fernmeßverfahren. *Archiv für Hydrobiologie, Supplement*, 43 (Elbe-Ästuar 4) (2/3), 119—224.
31. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
32. Fekrache F., Boudeffa K. (October 16th, 2023). Application of mapping and statistical study for the assessment of surface water quality in the Safsaf River (North-Eastern Algeria). *Res. Square*, 1—17. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3440178/v1>
33. Heiskary S. A., Wilson C. B. (2005). *Minnesota lake water quality assessment report: Developing nutrient criteria* (third ed.). Minnesota Pollution Control Agency, 188 p.
34. McFeeters S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sensing*, 17 (7), 1425—1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
35. Olmanson L. G., Bauer M. E., Brezonik P. L. (2008). A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sensing of Environment*, 112 (11), 4086—4097.
36. Rowland E. D., Okpobiri O. (2021). Floodplain Mapping and Risks Assessment of the Orashi River Using Remote Sensing and GIS in the Niger Delta Region, Nigeria. *J. Geographical Res.*, 4 (2), 10—16. <https://doi.org/10.30564/jgr.v4i2.3014>
37. Rubin H. J., Lutz D. A., Steele B. G., Cottingham K. L., Weathers K. C. Ducey M. J., Palace M., Johnson K. M., Chipman J. W. (2021). Remote sensing of lake water clarity: Performance and transferability of both historical algorithms and machine learning. *Remote Sensing*, 13 (8), 1434. <https://doi.org/10.3390/rs13081434>
38. Santos G. M. D., Navarro-Pedreño J., Meléndez-Pastor I., Gómez Lucas I. (2021). Using Landsat Images to Determine Water Storing Capacity in Mediterranean Environments. *J. Geographical Res.*, 4 (4), 58—67. <https://doi.org/10.30564/jgr.v4i4.3780>
39. Van Loon A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2 (4), 359—392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>

Стаття надійшла до редакції 16.10.2023

Після доопрацювання 17.01.2024

Прийнято до друку 30.01.2024

Received 16.10.2023

Revised 17.01.2024

Accepted 30.01.2024

O. T. Azimov<sup>1</sup>, Head Researcher, Dr. Sci. in Geol., Senior Scientist

ORCID 0000-0002-5210-3920

E-mail: azimov@casre.kiev.ua

O. V. Tomchenko<sup>1</sup>, Senior Researcher, Cand. Sci. in Engineer

ORCID 0000-0001-6975-9099

E-mail: tomch@i.ua

O. L. Shevchenko<sup>2</sup>, Head Researcher, Dr. Sci. in Geol., Senior Scientist

ORCID 0000-0002-5791-5354

E-mail: shevch62@gmail.com

S. I. Kireev<sup>3</sup>, General Director

ORCID 0000-0001-7059-3655

E-mail: kireev@ecocentre.kiev.ua

<sup>1</sup> Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine  
55-B O. Honchar Str., Kyiv, 01054 Ukraine

<sup>2</sup> Ukrainian Research Hydrometeorological Institute under the Ministry for Emergencies and the National Academy of Sciences of Ukraine  
37 Nauky ave., Kyiv, 03028 Ukraine

<sup>3</sup> State Specialized Enterprise «Ecocentre»  
6 Shkilna Str., Chornobyl, Kyivska oblast, 07270 Ukraine

#### WATER RESOURCE MONITORING FOR THE DRAINAGE SYSTEMS CONTAMINATED BY RADIATION BASED ON THE COMPLEX OF SATELLITE IMAGING AND GROUND OBSERVATIONS (IN THE CONTEXT OF REGIONAL CLIMATE CHANGES)

As a case study of the Prypiat Left Bank Drainage System of the Chornobyl Exclusion Zone, the probable onset of the multi-aqueous phase of water content in the frame of the entire hydrological cycle at the end of 2022 was estimated for the entire region of Polissia. The attributes of such a process are 1) a relative increase in the total amount of atmospheric precipitation

for the period of September–October–November–December in 2022 compared to the same period in previous years within the entire left-bank part of the Prypiat River catchment basin (according to the ERA5 dataset); 2) the increase in the watering rate of the drainage system territory — both the interdam section and the area located to the northeast of the old dam (this is evidenced by an analytical comparison of the results of the thematic interpretation of «Sentinel-2» image data for 02.05.2023 and satellite data acquired by the various sensors for April — May of previous years); 3) the established facts of heavy rains that occurred in April 2023 in the studied region, flooding, submergence of the large areas, freshet in its territory in April — May of the same year.

As a result, compared to the period 2015—2021, i.e., already after the termination of the permanent operation of the polder pumping station in the area of the left bank polder, in 2022, the level of  $^{90}\text{Sr}$  activity which, according to calculations, could have been removed with the runoff from this territory, increased significantly — 4 times more as compared to 2021 and 20 times more compared to 2020. Therefore, considering the above hydrometeorological factors, the prediction regarding the increase in the level of  $^{90}\text{Sr}$  activity, which will be carried out with the runoff from the area of the left-bank polder to the Prypiat River, both in 2023 and the following 2–3 years is substantiated.

**Keywords:** Chernobyl Exclusion Zone, Left Bank Drainage System, water resources, monitoring, remote sensing methods, surface runoff, radionuclide carry-over.