

**О. І. Сахацький**

## **ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ ЗЙОМОК ДЛЯ ОЦІНКИ ВОДООБМІНУ ГРУНТОВИХ ВОД (НА ПРИКЛАДІ БАСЕЙНУ Р. ТРУБІЖ)**

*(Рекомендовано чл.-кор. НАН України В. І. Ляльком)*

Представлены новые комплексные методологические подходы к использованию мультиспектральных спутниковых съемок для определения гидрогеологических параметров и водообмена грунтовых вод при построении гидрогеологических моделей. Экспериментальные результаты были получены в процессе комплексной обработки спутниковых и наземных данных в пределах тестовых полигонов в бассейне р. Трубеж.

The paper presents the new complex approach of using multispectral satellite data for identification of hydrogeological parameters and water balance of ground water for hydrogeological models creation. The experimental results have been received on the base of processing of ground and satellite data within the test area in Trubej river basin.

На прикладі басейну р. Трубіж розглядаються методологічні підходи до використання даних багатоспектральної космічної зйомки для визначення складових водного балансу ґрунтових вод при побудові гідрогеологічних моделей, що включає проведення схематизації області досліджень та визначення параметрів гідрогеологічних моделей на основі комплексної обробки супутникових та наземних даних з залученням комп'ютерних програм вирішення обернених фільтраційних задач. Загалом, це дозволяє суттєво підвищити ефективність та надійність вирішення гідрогеологічних задач.

Природні умови району досліджень детально описані в монографії І. О. Запольського [4], де розглядався водний баланс у зв'язку з осушенням заплави р. Трубіж та її приток. Незважаючи на досить ґрунтовний аналіз та оцінку складових водного балансу в межах даної території, в роботі [4] все ж таки поза оцінкою, за визнанням автора, залишилися такі питання, як оцінка ґрунтового потоку, значення його інфільтраційного живлення і відповідно особливості його просторового розподілу. Крім того, хоча на основі експериментальних робіт наведені окремі приклади розподілу сумарного випаровування на транспіраційні витрати та випаровування з поверхні ґрунту, але в межах всього басейну оцінка можливих транспіраційних витрат та їх просторовий розподіл

не проводилися, очевидно, через нестачу даних.

Загалом процеси водообміну у поверхневих шарах Землі часто є визначальними щодо багатьох природних явищ — родючості ґрунтів, врожайності сільськогосподарських угідь, стану і продуктивності лісових екосистем, газообміну в них, зокрема, вуглецевого балансу, а також стану поверхневих та підземних вод, їх захищеності від забруднення, підтоплення територій внаслідок підйому рівня ґрунтових вод або катастрофічних паводків тощо. Але визначення параметрів водообміну в ґрунтових водах, як правило, недостатньо обґрунтоване через брак даних.

При ідентифікації параметрів гідрогеологічних моделей для оцінки складових водообміну та водних ресурсів виконавець майже завжди стикається з нестачею даних і з тим, що вони характеризують власне лише точку опробування. Іншою проблемою є коректне узагальнення та визначення інтегральних характеристик для розрахунків блоків моделі. Для цього потрібна достатня кількість даних по кожному блоку моделі. При традиційному підході коректно розв'язати це питання майже нереально через значні витрати на початкову інформацію.

Значні труднощі виникають при визначенні ділянок та параметрів інтенсивності інфільтраційного живлення підземних вод поверхневими, що необхідно для оцінки ресурсів підземних вод та локалізації ділянок їх

© О. І. Сахацький, 2009

можливого поверхневого забруднення. В деяких випадках всю балансову неузгодженість між складовими водного балансу (кількістю атмосферних опадів, поверхневим стоком, випаровуванням з поверхні ґрунтів та водоймищ і транспірацією рослин) необґрунтовано відносять до інфільтрації поверхневих вод у підземні без подальшої перевірки розрахунками на основі створення відповідних фільтраційних моделей. Специфічною проблемою є необхідність враховувати процеси та параметри евапотранспірації при визначенні водообміну в системі підземні води — ґрунт — рослини — атмосфера. За попередніми оцінками витрати води рослинами на транспірацію порівнюються з річковим стоком. Хоча певні автори і відмічають це [11, 15] і є намагання їх враховувати, але загалом в практиці гідрогеологічних та гідрологічних розрахунків цьому приділяється недостатня увага. Одна з можливих причин цього — труднощі з визначенням параметрів цього процесу, що потребує актуальних різнобічних просторово-розподільних даних про стан ґрунтового та рослинного земного покриття. В той же час відомо, що максимальна глибина коренів як у деревинних порід, так і трав'янистих нерідко перевищує 2—2,5 м і може легко досягати рівня ґрунтових вод, особливо в зонах неглибокого залягання рівня підземних вод. Деревинні породи можуть мати і значно більшу глибину проникнення кореневої системи. Особливо для листяних порід глибина проникнення понад 5 м є нормальним явищем; таким чином, враховуючи капілярну зону, "водовідбір" внаслідок кореневого всмоктування та транспірації деревинними породами може торкатися ґрунтових вод, що знаходяться на глибинах близько 10 м. При побудові гідрогеологічних моделей це необхідно враховувати. Фактично корені рослин, які можуть легко досягати рівня ґрунтових вод, з точки зору вирішення задач гідрогеології, являють собою природні пристрої водовідбору. Але цей фактор "відкачування води" з горизонту ґрунтових вод у моделюванні гідрогеологічних процесів здебільшого не враховується без будь-якої оцінки його впливу.

Нааявність багатоспектральних супутникових даних, які є одним із сучасних видів космічного знімання, кардинально змінює

ситуацію на краще при вирішенні перелічених проблем. До багатоспектральних космічних зображень відноситься сукупність зображень, на кожному з яких відбита одна й та сама сцена і які зроблені одночасно (синхронно у часі), але одержані в різних частинах (зонах) електромагнітного спектра випромінювання [16]. В наш час суттєво збільшується просторова, спектральна та часова розрізняюча здатність багатоспектральної космічної зйомки, а також чутливість її сенсорів. Застосування багатоспектральної космічної зйомки для вирішення тематичних задач та моніторингу навколишнього середовища знаходиться дедалі ширше застосування через визнані переваги аерокосмічного знімання — оглядовість (покриття значних територій), оперативність та порівняно економічну ефективність. Але отримання якісних результатів на основі обробки багатоспектральних аерокосмічних даних для вирішення тематичних задач, зокрема вказаних в даній статті, потребує суттєвого методичного доопрацювання способів сумісної обробки супутникової та наземної інформації.

Важливими перевагами багатоспектральної космічної зйомки, що можуть ефективно використовуватись для вирішення зазначених задач, є, по-перше, можливість проводити класифікацію земного покриття, яке дозволяє для виділених класів земного покриття виконати наближену оцінку характеру та інтенсивності процесів водообміну та надати у першому наближенні просторовий розподіл можливих усереднених значень параметрів моделей водообміну, а по-друге, багатоспектральна зйомка дозволяє вираховувати різні показники та індекси, зокрема так звані водні індекси, які визначаються на основі спектрального відбиття в певних каналах зйомки, включаючи інфрачервоні діапазони електромагнітних хвиль, чутливі до зволоженості земного покриття [18, 19].

Отже, оцінка водообміну та параметрів гідрогеологічних моделей верхньої гідродинамічної зони з використанням багатоспектральних супутникових даних може включати такі основні підходи. По-перше, використовується класифікація земного покриття на основі космічних знімків та наземних даних і для виділених класів земного покриття виз-

начаються характерні гідрогеологічні процеси та усереднені значення параметрів їх моделей. По-друге, може проводитись кореляція даних космічної зйомки з наземними матеріалами для оцінки параметрів безпосередньо за дистанційними даними. Третій підхід може ґрунтуватись на комбінації перших двох і в ряді випадків є найбільш ефективним, коли регресійні залежності знаходять лише для певного класу земного покриття, що виділяється в результаті класифікації космічних зображень. І, нарешті, четвертий підхід полягає в параметризації моделей природного середовища та визначення балансово взаємно узгоджених параметрів створених гідрогеологічних моделей з врахуванням даних космічної зйомки [13, 14].

Запропоновані підходи до використання багатоспектральної космічної зйомки суттєво доповнюють традиційне ландшафтно-індикаційне та структурне дешифрування матеріалів ДЗЗ і можуть у комплексі використовуватись з ним. Структурне дешифрування матеріалів ДЗЗ у поєднанні з аналізом геолого-геофізичних матеріалів дозволяє: уточнити тектонічні умови, блокові структури району досліджень, що має важливе значення для виділення однорідних ділянок гідрогеологічної моделі; виділити активні на сучасному етапі розвитку кільцеві структури, які впливають на положення ерозійної мережі, що, в свою чергу, визначає розподіл потоків поверхневих та підземних вод; побудувати карти лінійних структур (лінеаментів), які просторово пов'язані з розломами. Кількісний аналіз поля лінеаментів дозволяє деталізувати положення зон розломів і вузлів їх перетину та у поєднанні з розрахунковими методиками оцінити фільтраційну проникність порід, особливо у вертикальному напрямку. Застосування ж запропонованих підходів на основі використання багатоспектральних космічних зображень дозволяє фактично оцінити наповненість гідрогеологічних структур вологою з подальшим наближенням розрахунком складових водного балансу та гідрогеологічних параметрів для визначення водних ресурсів території.

Використання водних індексів розглянуто в статті [14]. На прикладі тестової ділянки поблизу с. Єрківці Переяслав-Хмельницько-

го району Київської області, що знаходиться в південній частині басейну р. Трубіж, на основі комплексної обробки наземних даних та багатоспектральної космічної інформації з супутника SPOT-5 (01.11.2005 р.) була показана ефективність використання запропонованого водного індексу NWI (normalized water index) з метою встановлення ділянок з підвищеною вологістю в місцях мікрозападинних форм рельєфу, що, як доведено гідрогеологічними дослідженнями [3], можуть відповідати локальним ділянкам живлення ґрунтових вод. Індекс NWI, який у роботі [19] рекомендується використовувати для відокремлення снігового покриву і тому має назву NDSI (normalized difference snow index), вираховується за даними багатоспектральної зйомки в зеленій (GR) та середній інфрачервоній смугах (SWIR) спектра, але, як показав наш досвід, цей індекс дозволяє також ефективно виконувати оцінку вмісту вологи як у рослинному покриві, так і у верхньому шарі відкритого ґрунту [13, 14]:

$$NWI = \frac{GR(560) - SWIR(1650)}{GR(560) + SWIR(1650)},$$

де 560, 1650 — спектральний діапазон, нм.

Докладніше розглянемо можливості застосування результатів класифікації багатоспектральних космічних зображень для гідрогеологічної схематизації та оцінки складових водообміну. Ці можливості ґрунтуються на підходах, які використовуються у ботанічних методах визначення водообміну на основі фітоіндикації [5]. В результаті проведення класифікації багатоспектральних космічних зображень, методика якої розглядається, зокрема, в роботах [2, 7], з певною точністю виділяються різні класи земного покриття. Причому досить успішно можуть виділятися класи, що відповідають рослинному покриву різного типу. Вдало виділяють різні лісові рослинні угруповання, трав'янисту рослинність, агрофітоценози. Відомо, що в межах названих типів рослинного покриву водообмін має специфічні риси та певні межі змін своїх кількісних характеристик. Зокрема, це стосується такої важливої складової водообміну, як транспіраційні витрати рослин, що часто складають основну частину евапотранспірації. З точки зору поставленої задачі це відкриває широкі перспективи для більшої деталізації при оцінці складових во-

дообміну в межах певних територій. Але в даному випадку в якості індикатора можуть виступати не окремі види рослин, а їх екологічні групи, для яких проведено фундаментальні дослідження за характером та параметрами водообміну [5, 6, 9, 12, 17]. Таким чином, класифіковане космічне зображення на основі використання накопичених теоретико-експериментальних баз знань дозволяє виконати обґрунтовану трансформацію класифікованих даних в інші карти для оцінки параметрів природних процесів, зокрема процесів водообміну. Більш того, отримані карти можуть слугувати для пошуку прямих кореляційних зв'язків між даними космічної зйомки в певних каналах та параметрами водообміну. Такий підхід дозволяє також уникнути принципових помилок, накладаючи певні обмеження на кореляційні залежності між супутниковими та наземними даними, отриманими в конкретних умовах.

Як приклад розглянемо басейн р. Трубіж. Кліматичні, геоморфологічні, гідрологічні та геолого-гідрогеологічні особливості території та меліоративні заходи, що були проведені в його межах, детально описані в роботі [4]. Використовуючи матеріали роботи [4], коротко наведемо природні умови території, які впливають на водний баланс ґрунтових вод у даному районі.

На півночі басейн р. Трубіж, який розташований в північно-західній частині Придніпровської низовини в межах Київської, Чернігівської та Черкаської областей, обмежений вододілом з басейном р. Остер. На заході та південному заході — вододілом басейну групи боліт, що витягнуті вздовж пойми р. Десна та далі за течією р. Дніпро; на сході — вододілом з басейном р. Супій; на півдні — заплавою р. Дніпро; Північна частина басейну знаходиться в Чернігівському Поліссі, а середня та нижня частини — у Північно-Дніпровській терасово-рівнинній лісостеповій зоні. За даними роботи [4], залісеність території становить близько 8% і майже 13% зайнято болотами.

В цілому поверхня являє собою рівнину з рідкісними улоговинами та невисокими підвищеннями. Значна частина території зайнята блюдцеподібними мікрозападинами рельєфу. В формуванні ландшафтів значну роль відіграють різновікові тераси р. Дніпро, які обумовлюють диференціацію

рельєфу за абсолютними позначками. Вся територія знаходиться в межах першої, другої, третьої та четвертої терас р. Дніпро, а також власних терас р. Трубіж та її приток (річок Недра, Карань, Альта та ін.). Більша частина території басейну знаходиться в межах другої тераси р. Дніпро, південно-східна частина — в межах першої тераси, а північно-східна та північна — в межах третьої та четвертої терас. Заплава р. Трубіж має ширину від декількох десятків до сотень метрів, іноді до 1—2 км. В нижній частині складена піщаними ґрунтами. А вище за течією була заболочена. В наш час болотні масиви в заплаві р. Трубіж внаслідок меліорації перетворені на високопродуктивні угіддя. Основні ґрунти в заплаві представлені торф'яниками, потужність яких досягає 7 м. Перша надзаплавна тераса р. Дніпро з абсолютними позначками 100—115 м складена верхньочетвертинними різнозернистими пісками, що залягають на нижньо- та середньочетвертинних алювіальних відкладах пра-Дніпра. На поверхні тераси часто трапляються піщані гряди, дюни, котловини видування, заболочені западини. Ширина тераси становить близько 7—8 км і простягається смугою від с. Проців до м. Переяслав-Хмельницький. Перша тераса відділена від високих другої та третьої терас западиною з долиною р. Карань. Абсолютні позначки слабодренованих рівнин на другій терасі сягають 120—130 м. Ґрунти в межах другої тераси в основному сірі лісові, іноді малогумусні чорноземи. Тут розповсюджені мікрозападини діаметром 20—30 м та глибиною 1,0—1,5 м.

Більш високий ландшафтний рівень займають лесові рівнини третьої та четвертої терас р. Дніпро, в північно-східній частині території з абсолютними позначками 130—140 м. Ґрунтовий покрив представлений потужними малогумусними чорноземами. Западини в рельєфі в цій частині басейну р. Трубіж мають діаметр до 150—200 м, а їх глибина може становити 8—10 м.

Загальна рівнинність території басейну, численні замкнуті западини у рельєфі, слабка дренованість та наявність в геологічному розрізі потужної товщі піщаних та супіщаних порід сприяють високому заляганню рівня ґрунтових вод, розвитку процесів заболочування та розвитку боліт та торф'яників.

З точки зору гідрогеологічних умов басейн р. Трубіж відноситься до Дніпровського артезіанського басейну. Водоносні горизонти встановлені у відкладах сеноманського ярусу, буцацької, київської та харківських світ, а також четвертинної системи [1, 4, 10].

Детальніше розглянемо ґрунтові води четвертинних відкладів, що є предметом обговорення. Вони розповсюджені на всій території. Всі четвертинні водоносні відклади складають єдиний водоносний горизонт, потужність якого змінюється від 20 до 55 м.

У нижній частині водовмісних порід знаходяться крупнозернисті піски з галькою кристалічних порід, у середній частині залягають середньо- та дрібнозернисті піски з численними прошарками мулистих глин та суглинків. У верхній частині другої, третьої та четвертої терас водоносними є леси та лесоподібні суглинки, а в межах заплави р. Трубіж та її приток ґрунтові води залягають у торфових відкладах та пісках з прошарками суглинків. Тільки на підвищеннях в еолово-делювіальних суглинках в деяких місцях зустрічається так звана верховодка, для якої характерним є неглибоке залягання (2—2,5 м) та незначна товща водовмісних порід (до 0,5 м). Живлення ґрунтових вод відбувається переважно за рахунок атмосферних опадів. Максимальні позначки рівня ґрунтових вод збігаються з підвищеними в рельєфі на північному заході басейну р. Трубіж та на його східній границі — на лівобережжі р. Трубіж. В районі таких підвищень формуються куполи розтікання підземних вод і частина потоку йде в напрямку р. Трубіж та її приток. Глибина залягання ґрунтових вод зменшується від 5—10 м на вододілах до декількох десятків сантиметрів у заплавах річок та заболочених місцях.

Таким чином, у межах басейну р. Трубіж ґрунтові води надходять з двох боків до р. Трубіж — на правобережжі з заходу на схід, а на лівобережжі зі сходу на захід. Ці потоки розвантажуються в заплаву та р. Трубіж. До прокладання меліоративних каналів це викликало заболочування території.

Розглянемо, як класифікація земного покриття за космічними знімками в межах басейну р. Трубіж використовувалась для схематизації гідрогеологічних умов та для оцінки транспіраційних витрат. Важливість

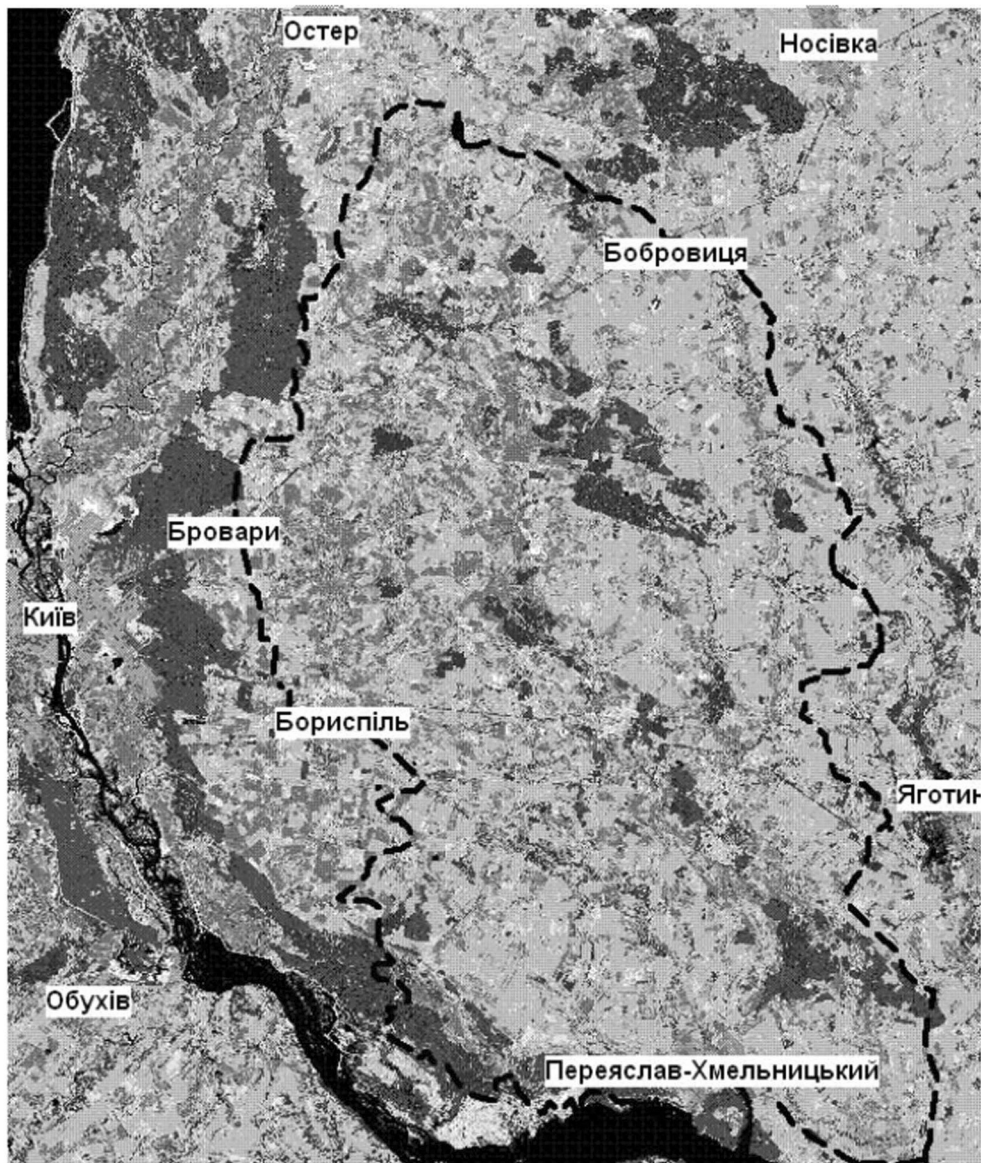
цих питань з точки зору вирішення гідрогеологічних задач пояснювалась вище, особливо щодо транспіраційних витрат.

Для класифікації земного покриття території в межах басейну р. Трубіж використовувались мозаїчні знімки Landsat TM за літній період 1990 р., що охоплюють всю територію басейну р. Трубіж. Мозаїчні знімки Landsat TM створені на основі 2, 4 та 7 каналів стандартної зйомки, що відповідають таким спектральним діапазнам: 2 — зелений (525—605 нм), 4 — ближній інфрачервоний (750—900 нм), 7 — другий діапазон середньої інфрачервоної зони (2090—2350 нм).

В результаті проведення класифікації багатоспектрального космічного зображення за методикою, викладеною в роботах [2, 7], з певною точністю були виділені різні класи земного покриття, що відповідають рослинному покриттю різного типу. При використанні запропонованої методики класифікації вдало виділяються різні лісові рослинні угруповання, трав'яниста рослинність, агрофітоценози, водна поверхня, техногенні об'єкти.

Виділення вказаних класів проведено не випадково, а з урахуванням геоботанічних підходів, що розглядалися вище. При побудові карт транспіраційних витрат на основі виконаної класифікації космічного знімка використовувались методичні підходи, розроблені І. Н. Бейдеманом, З. Г. Беспаловою та А. Т. Рахманіною, а також Л. Н. Касьяною, викладені в роботі [5], коли карти транспіраційних витрат будуються на основі геоботанічної карти. В нашому випадку геоботанічна карта отримується на підставі класифікації космічного знімка і підхід, що пропонується у такій спосіб, включає всі переваги використання космічної інформації — оглядовість, оперативність та можливість значної деталізації.

Проведена класифікація дозволила отримати просторовий розподіл різних класів земного покриття та визначити їх площу в межах басейну р. Трубіж. З допомогою класифікованого знімка побудована карта транспіраційних витрат (рис. 1). В основу карти покладено дані про витрати води на транспірацію домінуючими рослинними угрупованнями [5, 6, 9, 12, 17]. Попри значні відхилення в значеннях транспіраційних витрат та сумарного випаровування, намічають-



Пунктирна лінія - границя басейну р. Трубіж [1]; значення транспіраційних витрат (мм/рік):  0 – 40 (розріджена рослинність, техногенні об'єкти, іноді відкритий ґрунт);  40 – 80 (рослинність в межах населених пунктів);  80 – 160 (сільськогосподарські поля та луки на вододілах);  120 – 170 (луки та рослинність на заболочених територіях);  150 – 180 (високопродуктивні луки та поля в основному на осушених болотах в заплавах вздовж водойм);  180 – 280 (соснові ліси);  250 – 350 (сади та групи дерев, листяні ліси);  водна поверхня

Рис. 1. Карта транспіраційних витрат за вегетаційний цикл в межах басейну р. Трубіж, що складена на основі класифікації багатоспектрального мозаїчного знімка Landsat TM за літній період 1990 р.

ся інтервали, що характерні для певних типів рослинного покриву (див. таблицю). Усвідомлюючи значну схематичність та дискусійність поділу на такі інтервали, автор вважає такий поділ все ж таки корисним для наближеної оцінки транспіраційних витрат. Всього на карті було виділено сім контурів,

які припадають на інтервал від 0 до 350 мм/рік. Градація з витратами до 40 мм/рік охоплює різні угруповання, що продукують найбільш низьку біомасу, адже між транспіраційними витратами та продуктивністю рослинних угруповань встановлено тісний взаємозв'язок [5, 9, 12, 17]. В цю гра-

дацію віднесені ділянки з розрідженою рослинністю в межах промислових зон, техногенних об'єктів, піщаних гряд тощо. В градацію 40—80 мм/рік входять більш продуктивні рослинні угруповання в основному в межах населених пунктів. Наступна градація охоплює контур з витратами води на транспірацію 80—160 мм/рік. До цього контуру потрапляють поля з сільськогосподарськими угіддями, а також луки та чагарники на вододілах. Класифікація багатоспектральних космічних знімків дозволяє виділяти поля з різними сільськогосподарськими угіддями з різним ступенем потреб у водозабезпеченні та транспіраційними витратами, але прийнята градація у середньому охоплює цей діапазон і тому прийнята для наближеної оцінки. Транспірація рослинністю в межах заболочених територій має градацію 120—170 мм/рік. До контуру з витратами води на транспірацію 150—180 мм/рік потрапляє лугова та чагарникова

рослинність вздовж берегів озер та заплавл річок, а також високопродуктивні сільськогосподарські поля та луки в основному в межах осушених боліт заплави р. Трубіж та її приток. Контур 180—280 мм/рік відповідає сосновим лісам на вододілах. В межах контуру 250—350 мм/рік розташовані змішані ліси та листяні ліси на вододілах, а також сади й окремі групи листяних дерев (див. таблицю).

Проведені дослідження показали, що значення транспіраційних витрат для даної території є суттєвою складовою водного балансу. За результатами розрахунків на основі класифікації космічного зображення річні витрати на транспірацію в межах басейну р. Трубіж становлять приблизно 593 млн м<sup>3</sup>/рік, або у середньому для всієї площі 143 мм/рік. Це сягає близько 30% від атмосферних опадів, враховуючи, що середня кількість атмосферних опадів за період 1945—1988 рр. для басейну р. Трубіж, за даними пунктів спостережень "Бориспіль", "Березань", "Кривицьке",

**Оцінка сумарних транспіраційних витрат у межах басейну р. Трубіж на основі класифікованого мозаїчного космічного знімка Landsat TM (літній період 1990 р.) (див. рис. 1)**

№ п/п	Клас земного покриття	Площа класу, км <sup>2</sup>	% від загальної площі	Усереднені значення транспіраційних витрат, інтервал (чисельник), середнє (знаменник), мм/рік	Сума транспіраційних витрат, млн м <sup>3</sup> /рік
1	Розріджена рослинність в межах техногенних об'єктів	47,65	1,15	$\frac{0-40}{20}$	0,95
2	Рослинність в межах населених пунктів	489,79	11,82	$\frac{40-80}{60}$	29,39
3	Сільськогосподарські поля та луки на вододілах	2003,04	48,36	$\frac{80-160}{120}$	240,36
4	Рослинність на заболочених територіях	360,59	8,71	$\frac{120-170}{145}$	52,29
5	Високопродуктивні сільськогосподарські поля та луки в основному в межах осушених боліт заплави р. Трубіж та її приток	598,60	14,44	$\frac{150-180}{165}$	98,77
6	Соснові ліси	231,14	5,58	$\frac{180-280}{230}$	53,16
7	Листяні ліси, сади та групи листяних дерев	395,24	9,54	$\frac{250-350}{300}$	118,57
8	Водна поверхня	16,70	0,40	—	—
	Всього	4142,16	100	143,28	593,49

"Гоголів" та 10 постам метеостанції "Барішівка", становить 494 мм/рік [4]. Звичайно, що більша частина транспіраційних витрат припадає на рослинність в межах сільськогосподарських угідь, які разом займають понад 60% території.

Щодо багаторічного стоку річок з 1 км<sup>2</sup> то, за даними роботи [4], для цієї території він становить близько 1,0—1,3 л/с/км<sup>2</sup>, або приблизно 30—40 мм/рік. Тобто транспіраційні витрати виявились в декілька разів більшими.

Нарешті, порівняймо наведені вище дані про складові водного балансу з розрахунками значень інфільтраційного живлення підземних вод для типових ділянок у межах даної території. Це було виконано нами шляхом розв'язання обернених фільтраційних задач методом взаєморегування гідрогеологічних параметрів за стрічками току гідродинамічної сітки [8]. Гідродинамічна сітка для четвертинного водоносного горизонту була побудована на основі карт рівнів ґрунтових вод, наведених у роботі [4] (рис. 2, А, Б). До речі, як відмічається в цій роботі, рівні ґрунтових вод після осушення на основній території басейну р. Трубіж на відстані декількох сот метрів від заплав річок практично не змінились. Метод взаєморегування гідрогеологічних параметрів за стрічками току дозволяє створювати досить детальні схеми водопровідності та балансової складової інфільтраційного живлення підземних вод, що дає змогу встановити зони підвищеної водопроникності порід та давати оцінку інфільтраційному живленню та розвантаженню підземних вод. Але він потребує багато апріорних даних для кожної комірки стрічки току, а саме:  $H$  — напір на контурі живлення комірки;  $B$  — ширина на контурі живлення комірки;  $S$  — довжина шляху фільтрації по комірці;  $W_{ap}$  — апріорне значення водопровідності;  $W_{ap}$  — апріорне значення балансової складової інфільтрації підземних вод;  $W_{min}$  — мінімальна межа для  $W_{ap}$ ;  $W_{max}$  — максимальна межа для  $W_{ap}$ .

Саме дистанційні матеріали дозволили більш обґрунтовано надати ці початкові дані, що значно підвищило якість розрахунків. Зокрема, космічні знімки та їх класифіковані зображення використовувались для точного оконтурення зон розвантаження підземних вод, які в основному збігаються з ділянками

заболочених територій та осушеними частинами заплави р. Трубіж, для виділення зон можливого інфільтраційного живлення підземних вод, особливо в місцях розвитку мікрозападинних форм рельєфу, і, крім того, для побудови гідродинамічної сітки, для уточнення напрямків ліній току (рис. 2, Б). Для визначення апріорних значень водопровідності для комірок сітки фільтрації використовувались дані роботи [4] про значення коефіцієнта фільтрації та потужностей водоносного горизонту в четвертинних відкладах, а також результати лінеаментного аналізу (карти щільності лініментів) для даної території. Це було виконано А. А. Ходоровським та О. А. Апостоловим за знімками Landsat.

Результати розрахунків за методом взаєморегування основних геофільтраційних параметрів за стрічками току гідродинамічної сітки показали, що водопровідність водоносного горизонту в четвертинних відкладах у середньому становить 100—150 м<sup>2</sup>/добу (рис. 2, В), а параметр балансової складової інфільтраційного живлення максимальний на вододілах, де переважно знаходиться в межах  $(0,5—1,5) \cdot 10^{-4}$  м/добу (близько 20—55 мм/рік) (рис. 2, Г). В середньому для більшості ділянок з інфільтраційним живленням балансова складова його для четвертинного водоносного горизонту не перевищує  $(0,5—1,0) \cdot 10^{-4}$  м/добу, або приблизно 20—40 мм/рік (рис. 2, Г). Відомо, що в межах мікрозападин, де формується інфільтраційне живлення підземних вод, ці значення можуть бути на порядок більшими — до 1000 мм/рік, а іноді і вище [3], але усереднені значення інфільтраційного живлення для розрахункових комірок сітки фільтрації і відповідно для блоків фільтраційної гідрогеологічної моделі значно нижчі. Крім того, враховуючи отримані результати, можна також стверджувати, що значна частина інфільтраційного живлення, особливо в межах мікрозападин, які широко розповсюджені на даній території, надходить до водоносних горизонтів у палеогенових відкладах бучацької, канівської та київської світ і до нижчезалягаючих горизонтів, але кількісне визначення потребує додаткових досліджень.

Розрахунки за стрічками току також показали, що основне розвантаження підзем-



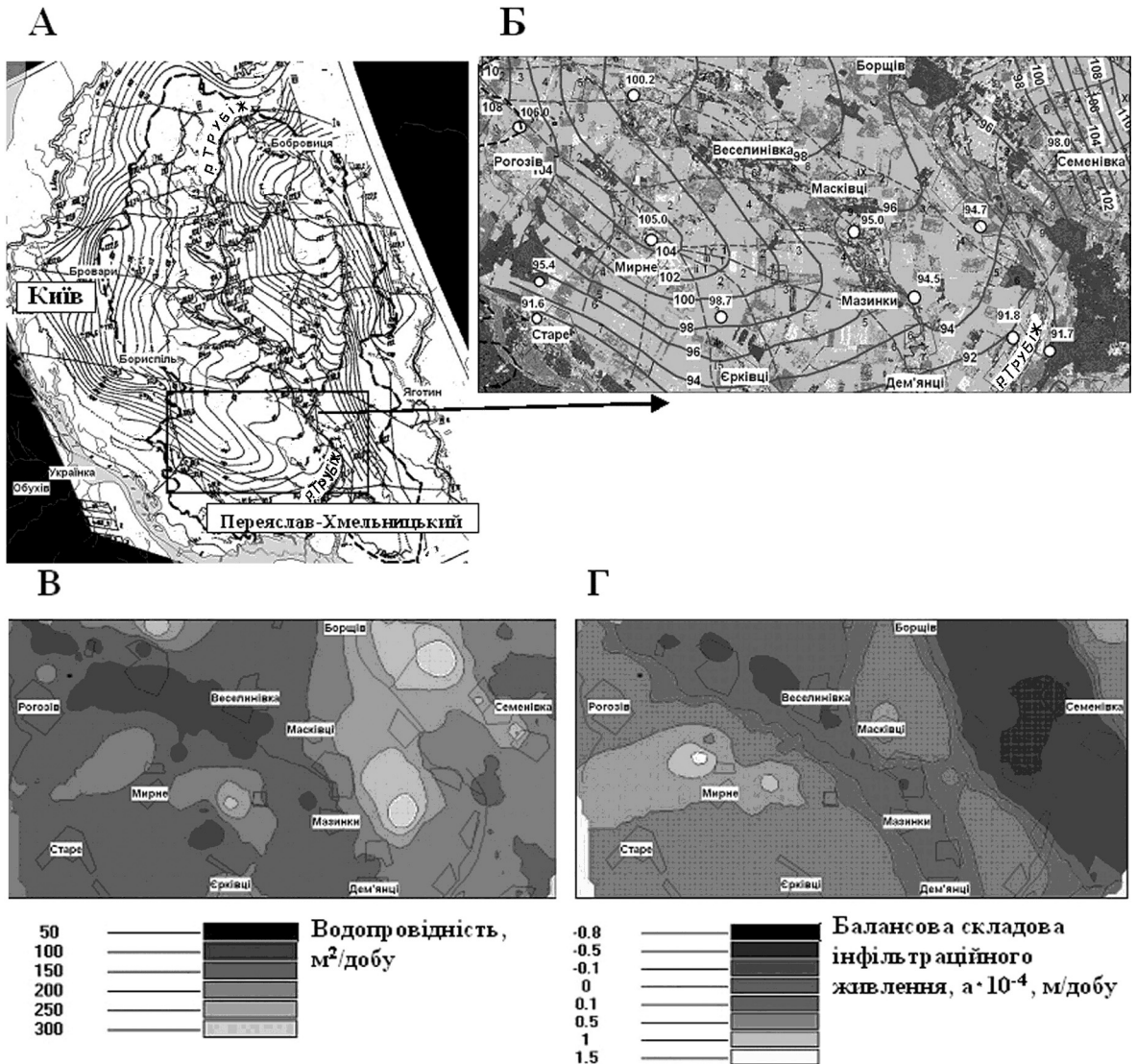


Рис. 2. Результати визначення основних гідрогеологічних параметрів у межах басейну р. Трубіж  
 А. Карта рівнів ґрунтових вод у четвертинних відкладах у басейні р. Трубіж (до осушення) [4]. Чорний прямокутник показує ділянку детальних досліджень з взаєморегування гідрогеологічних параметрів.  
 Б. Гідродинамічна сітка водоносного горизонту у четвертинних відкладах суміщена з фрагментом класифікованого мозаїчного знімка Landsat TM у межах ділянки детальних досліджень.  
 В. Схема значень водопровідності водоносного горизонту в четвертинних відкладах.  
 Г. Схема значень балансової складової інфільтраційного живлення (розвантаження) водоносного горизонту в четвертинних відкладах

них вод у четвертинних відкладах йде в заплаву р. Трубіж та її приток і частково — в локальні заболочені западини, де розвантаження відбувається внаслідок випаровування з поверхні Землі на ділянках неглибокого залягання підземних вод або у річкову мережу. Балансова складова інфільтрації тут від'ємна і становить близько  $(-0.1 \div -0.8) \times 10^{-4}$  м/добу (рис. 2, Г).

Необхідно зазначити, що параметр балансової складової інфільтраційного живлення підземних вод враховує різницю між надходженням та розвантаженням підземних вод у розрахунковій комірці стрічки току. Тому в місцях неглибокого залягання підземних вод, де коренева система рослин досягає рівня ґрунтових вод, часткове розвантаження підземних вод відбувається

внаслідок кореневого всмоктування та подальшої транспірації. Крім того, в межах сільських населених пунктів йде водовідбір ґрунтових вод через колодязі. В таких випадках реальне надходження інфільтраційних вод на рівень водоносного горизонту більше, ніж балансова складова інфільтраційного живлення.

Таким чином, на прикладі басейну р. Трубіж показано, що запропонований підхід, який передбачає сумісну обробку даних багатоспектральної космічної зйомки та наземних спостережень і розрахункових методів, дозволяє ефективно проводити оцінку складових водного балансу та гідрогеологічних параметрів у ґрунтових водах з просторовим їх розподілом. Загалом, це надає набагато детальнішу основу для гідрогеологічної схематизації та побудови гідрогеологічних моделей.

Виконані дослідження показали, що значення транспіраційних витрат рослинними угрупованнями для даної території є суттєвою складовою водного балансу. За результатами розрахунків на основі класифікації космічного зображення річні витрати на транспірацію становлять у середньому 143 мм/рік, що набагато перевищує модуль поверхневого стоку. На транспіраційні витрати у середньому припадає приблизно третина загального випаровування з поверхні Землі, але в межах території лісів — більша частина загального випаровування.

Розрахунки за стрічками току гідродинамічних сіток, виконані з врахуванням супутникових даних, показали, що в середньому для більшості ділянок водопровідність водоносного горизонту в четвертинних відкладах у середньому становить 100—150 м<sup>2</sup>/добу, а балансова складова інфільтраційного живлення при такій водопровідності та конфігурації сітки фільтрації для четвертинного водоносного горизонту не перевищує  $(0,5—1,0) \cdot 10^{-4}$  м/добу, або приблизно 20–40 мм/рік. Розвантаження ґрунтових вод повністю забезпечується сумарним випаровуванням в заплавах р. Трубіж та її приток і на заболочених ділянках, а також частково поверхневим стоком.

Враховуючи отримані результати, можна стверджувати, що значна частина інфільтраційного живлення, особливо в межах мікрозападин, які дуже розповсюджені на

даної території, надходить до водоносних горизонтів у палеогенових відкладах буцацької, канівської та київської світ і до нижчезалегаючих горизонтів.

1. *Бабинец А. Е., Боревский Б. В., Шестопалов В. М. и др.* Формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод платформенных структур Украины. — Киев: Наук. думка, 1979. — 214 с.
2. *Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В.І. Лялька, М.О. Попова.* — Киев: Наук. думка, 2006. — 357 с.
3. *Бублясь В. М., Шестопалов В. М.* Аномальные зоны и их роль в перераспределении радионуклидов из поверхности почв в подземные воды // Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Ч. 1. Распространение чернобыльских радионуклидов в гидрогеологических структурах. — Киев, 2001. — С. 251—356.
4. *Запольский И. А.* Влияние мелиорации на водный баланс Украинского Полесья (на примере бассейна р.Трубеж). — Киев: Наук. думка, 1991. — 166 с.
5. *Касьянова Л. Н.* Экология растений Прибайкалья. Водный обмен. — М.: Наука, 2004. — 288 с.
6. *Константинов А. Р.* Испарение в природе. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 531 с.
7. *Лялька В. И., Сахацкий А. И., Ходоровский А. Я. и др.* Комплексирование многозональных космических снимков различного пространственного разрешения для повышения эффективности исследований лесных массивов (на примере зоны отчуждения ЧАЭС и районов Сибири) // Косм. наука і технологія. — 2002. — Т. 8, № 2/3. — С. 239—246.
8. *Лялька В. И., Сахацкий А. И., Шнейдерман Г. А.* Методика взаимокорректировки геофильтрационных параметров с применением ЭВМ. — Киев, 1986. — 34 с.— (Препр. / ИГН АН УССР; 86-2).
9. *Молчанов А. А.* Влияние леса на окружающую среду. — М.: Наука, 1973. — 359 с.
10. *Огняник Н. С.* Постоянно действующие математические модели гидрогеологических процессов. — Киев: Наук. думка, 1983. — 168 с.
11. *Пашковский И. С.* Математическое моделирование подземного и поверхностного стоков с водосбора // Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Методы изучения водообмена. — Киев: Наук. думка, 1988. — С. 89—103.

12. Раунер Ю. Л. О гидрометеорологической роли леса // Изв. АН СССР. Сер. геогр. — 1965. — № 4. — С. 40—53.
13. Сахацький О. І. Застосування супутникових даних для вирішення задач водообміну у геосистемах // Доп. НАН України. — 2006. — № 4. — С. 118—126.
14. Сахацький О. І. Підвищення ефективності гідрогеологічних прогнозів з використанням водних індексів мультиспектральних супутникових зйомок // Геол. журн. — 2007. — № 4. — С. 42—47.
15. Ситников А. Б. Динамика влаги в почвогрунтах зоны аэрации. — Киев: Наук. думка, 1986. — 152 с.
16. Словник з дистанційного зондування Землі / За ред. В. І. Лялька та М. О. Попова — Киев: СМП "АВЕРС", 2004. — 170 с.
17. Федоров С. Ф. Исследование элементов водного баланса в лесной зоне Европейской территории СССР. — Л., Гидрометеоиздат, 1977. — 248 с.
18. Gao B. C. NDWI — a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. — 1996. — Vol. 58. — P. 257—266.
19. Griffin M. K., Hsu S. M., Burke H. K. et al. Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis // Lincoln Laboratory Journal. — 2005. — Vol. 15. — P. 271—296.

Наук. центр аерокосм.  
досліджень Землі ІГН НАН України,  
Київ  
E-mail: sakhatsky@casre.kiev.ua

Стаття надійшла  
17.06.09