

УДК 556.3:532.5:553(477.411)

DOI <https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2025.5.07>

Оксана Диняк

кандидат геологічних наук, доцент, доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології,
ННІ «Інститут геології»,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
dyniak_o_v@knu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7147-0769>

Ірина Кошлякова

інженер кафедри гідрогеології та інженерної геології, ННІ «Інститут геології»,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
iryna.koshliakova@knu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2293-8441>

**ВИКОРИСТАННЯ ВОДНОГО БАЛАНСУ ДЛЯ ПОБУДОВИ
ПРОГНОЗНОЇ КОНЦЕПТУАЛЬНОЇ ГІДРОГЕОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ
В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ ВХІДНИХ ДАНИХ**

Анотація. Метою екологічно збалансованого водокористування є забезпечення функціонування екосистем на рівні, найбільш наближеному до природного. Експлуатація водних ресурсів не повинна супроводжуватися деградацією гідроєкосистем вище допустимого мінімального рівня. Сталий видобуток підземних вод стикається з проблемами через обмежені знання та інструменти для розуміння динаміки підземних вод. Точні прогнози поповнення підземних вод мають вирішальне значення для оцінювання впливу зміни клімату на ресурси підземних вод, а також для ефективного планування та управління.

Вивчення системи підземних вод зазвичай полягає в прогнозуванні стану цієї системи в майбутньому за умов дії природних та антропогенних чинників, що її формують. Змодельований водний баланс за допомогою інструментарію ArcMap, а саме Darcy Flow, дає змогу уточнити умови живлення та розвантаження підземних вод, зробити висновки про кількісні співвідношення між різними складниками водного балансу системи. Результати дослідження демонструють доцільність застосування балансових методів у системі гідрогеологічного моніторингу поряд із просторовим аналізом та моделюванням.

Ключові слова: водоносний комплекс, водоспоживання, гідродинамічні зміни, геоінформаційні системи, умови живлення, баланс за Дарсі.

**Dyniak Oksana, Koshliakova Iryna. USE OF THE WATER BALANCE FOR THE CONSTRUCTION
OF A PREDICTIVE CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL UNDER THE CONDITIONS
OF LIMITED INPUT DATA**

Abstract. The goal of ecologically balanced water use is to ensure the functioning of ecosystems at a level that is as close to natural as possible. The exploitation of water resources should not be accompanied by the degradation of hydroecosystems above the acceptable minimum level. Sustainable groundwater extraction faces challenges due to limited knowledge and tools to understand groundwater dynamics. Accurate groundwater recharge forecasts are crucial for assessing the impact of climate change on groundwater resources, as well as for effective planning and management. A balance assessment helps determine whether withdrawals and recharge in an aquifer are well balanced, which is crucial for water management. Today, as the population's need for access to high-quality and sustainable drinking water increases, groundwater is increasingly being used for water supply. The problems of water supply and groundwater quality are of strategic importance and require a comprehensive approach.

The study of the groundwater system usually involves predicting the state of this system in the future under the influence of natural and anthropogenic factors that shape it. The degree of disturbance to the natural groundwater regime depends on many factors, but primarily on the structure of the geofiltration medium, the type of water exchange basin, the depth of underground development, the nature of development and the degree of anthropogenic load. To determine changes in hydrodynamic conditions, it is important to determine the groundwater balance.

The modeled water balance using the ArcMap tool, namely Darcy Flow, allows us to identify and clarify the conditions of groundwater supply and discharge, and draw conclusions about the quantitative relationships between different components of the system's water balance. To assess the state of drinking aquifers, especially their quality indicators, it is necessary to rely on monitoring results. The results of the study demonstrate the feasibility of applying balance methods in the hydrogeological monitoring system along with spatial analysis and modeling in GIS to assess and predict the state of drinking aquifers in order to ensure balanced water use.

Key words: aquifer complex, water consumption, hydrodynamic changes, geographic information systems, recharge conditions, Darcy balance.

Актуальність теми дослідження. Підземні води є цінним, але обмеженим ресурсом, який стикається з численними проблемами, як-от дефіцит, забруднення та відсутність надійних даних. Ефективне оцінювання поповнення підземних вод має вирішальне значення для сталого управління водними ресурсами. Світовий досвід екологічно збалансованого водокористування нині вказує на те, що його метою має бути забезпечення функціонування екосистем на рівні, найбільш наближеному до природного, а експлуатація водних ресурсів не має супроводжуватися деградацією гідроєкосистем вище допустимого мінімального рівня.

Підземні води натеper усе більше долучаються до водозабезпечення, особливо в разі зростання потреби населення в доступі до якісного та безперебійного питного водопостачання. Надмірне використання ресурсів, неконтрольовані скиди забрудненої води, а також інтенсифікація сільського господарства спричиняють широку деградацію водоносних горизонтів. Значний водовідбір підземних вод, що перевищує природне поповнення, призводить до поступового зниження рівня ґрунтових вод, що ускладнює стаке водопостачання. Невибіркове та необґрунтоване використання питних водоносних горизонтів також може призвести до погіршення фізичних та хімічних показників якості води, проникнення солоної води в прибережні водоносні горизонти та осідання денної поверхні, що спричинить зниження рівня прісних вод із загрозливою швидкістю. Правильне управління системою підземних вод має важливе значення для підтримки водного балансу.

Натеper підземні води є єдиним надійним безпечним джерелом альтернативного водопостачання в умовах непередбачуваних ризиків, які пов'язані з воєнними діями. Наведена інформація щодо прогнозних ресурсів, балансових експлуатаційних запасів та використання підземних вод свідчить про великі потенційні можливості розширення їх використання практично в усіх регіонах України, особливо для невеликих водоспоживачів [1]. Сучасні виклики та екологічний стан поверхневих водних об'єктів указує на те, що частка підземних вод у водокористуванні буде зростати й надалі. Тому належне вивчення стану та режиму підземних вод, запобігання виснаженню та забрудненню питних водоносних горизонтів у край необхідні для забезпечення якісного водоспоживання населення. Проблеми водопостачання та якості підземних вод мають стратегічне значення та потребують комплексного підходу. Зокрема, попередження забруднення джерел питного водопостачання потребує постійного моніторингу стану підземних вод та змін гідрогеологічних умов.

Відсутність розширених систем моніторингу рівня ґрунтових вод, опадів і вологості ґрунту перешкоджає точному оцінюванню джерел живлення й, відповідно, забезпеченості ресурсів підземних вод. Відсутність мережі моніторингу призводить до нестачі вхідних даних, перерви в часових та просторових даних, особливо в сільській місцевості або віддалених районах, що ускладнює фіксацію мінливості процесів поповнення в різних регіонах і гідрогеологічних умовах. Невідповідності та неповнота даних є звичайним явищем, часто через застарілі методи вимірювання, відсутність заходів контролю якості або недостатні зусилля щодо обміну та інтеграції даних. Обмежені ресурси для збору та управління даними, включаючи фінансові, технічні та інституційні обмеження, ще більше перешкоджають ефективному збору даних, управлінню та аналізу. Крім того, відсутність технічного досвіду для моніторингу підземних вод, управління даними та аналізу загострює ці проблеми. Розв'язання цих проблем потребує бага-

тостороннього підходу, який передбачає інвестиції в інфраструктуру, розвиток потенціалу, співпрацю та політичну підтримку для забезпечення сталого управління ресурсами підземних вод.

Стан вивчення питання з аналізом основних праць. Відомо, що процес вивчення підземних вод включає збір геологічних і гідрологічних даних про басейн, включаючи геологічну будову, рівень ґрунтових вод, опади та землекористування. У випадках, коли даних бракує, необхідні польові дослідження для побудови концептуальної моделі, яка підтверджується фізичними та гідрологічними даними з метою розуміння величини живлення та розвантаження, тобто балансу. Для чисельного моделювання також важливі карти меж і характеристик водоносних горизонтів, а також допоміжні карти. Збір даних для моделювання підземних вод може бути складним, особливо коли інформація про досліджувану територію обмежена. Хоча деякі дані можуть бути доступні з наявних звітів, часто потрібна додаткова робота на місцях. Зібрані дані можуть не завжди відповідати необхідному формату та містити неточності, що потребує перевірки.

Наприклад, у зв'язку з інтенсивним розвитком господарської діяльності на території м. Києва та його околиць постійно проводяться роботи з вивчення режиму підземних вод [3]. З погляду формування якісного складу питних підземних вод м. Києва велику роль відіграють водоносні горизонти, що виступають у ролі живлячих. Цей відомий факт дотепер не викликав особливої практичної уваги та занепокоєння, оскільки вважалося, що будова гідрогеологічного розрізу та інтенсивність природного вертикального водообміну забезпечує надійний захист питних підземних вод від забруднення з поверхні. Проте ще з другої половини XX ст. фіксується наявність зон знижених гідродинамічних напорів у водоносному горизонті у відкладах канівської і бучацької серій еоцену, який залягає вище горизонтів питних підземних вод, з яких здійснюється водовідбір [2]. Виявлено локальні депресійні воронки в ґрунтових водах і території міста, причиною утворення яких вважається функціонування водозаборів питних підземних вод.

Мета та завдання дослідження. Зазвичай кінцевою метою вивчення системи підземних вод є прогноз стану цієї системи в майбутньому за умов дії природних та антропогенних чинників, що її формують. Завдання дослідження – визначення змін гідродинамічних умов Антонівського родовища підземних вод (м. Київ) у результаті експлуатації; розв'язання проблемних питань, формалізація отриманих даних у вигляді побудови різноманітних карт і картосхем; перевірка припущень із використанням фактичних матеріалів.

Методи та матеріали дослідження. Під час розгляду систем підземних вод виділяють три основні взаємопов'язані складники: гідрогеодинамічний, гідрогеохімічний та гідрогеотермічний. Проте визначальним є гідрогеодинамічний складник, який формує гідрогеохімічний та гідрогеотермічний режими потоків підземних вод.

Дані спостережень за елементами режиму підземних вод у вигляді строкових вимірів гідродинамічного напору, дебіту та температури, а також результати хімічних аналізів проб води проходять первинне оброблення з обрахуванням середньомісячних і середньорічних їх значень і визначенням абсолютних максимальних і мінімальних значень у межах річного циклу. Надалі оброблені дані спостережень зводяться до зручних форм, які відповідають вимогам їх накопичення та використання й утворюють певні масиви даних. Взагалі виділяють такі групи методів оброблення результатів спостережень: аналітичні, балансові, гідрогеологічних аналогій, імовірісно-статистичні.

Аналітичні методи застосовуються в тих випадках, коли відомі гідрогеологічні параметри водоносного горизонту (коефіцієнти фільтрації, нестачі насичення або водовіддачі, потужність) і встановлена функціональна залежність між змінами гідродинамічного напору й одного або декількох аргументів (до яких зазвичай відноситься і час). З аналітичними методами найтіснішим чином пов'язані методи прогнозу з використанням математичного детермінованого моделювання [4].

Методи гідрогеологічних аналогій полягають у тому, що закономірності режиму підземних вод, які виявлені для певної території за багаторічний період спостережень (тривалість циклів, характер змін усередині циклів тощо), екстраполюються в часі й у просторі. Достовірність таких прогнозів зростає, якщо зміну режиму вдається зв'язати зі змінами будь-якого регіонального або глобального чинника, наприклад, атмосферною циркуляцією, сонячною активністю тощо. Використовуючи метод аналогії, можна прогноз режиму, складений будь-яким методом для території, яка забезпечена достатньою кількістю спостережних точок, перенести на територію з подібними умовами формування режиму, де цих точок недостатньо.

Під час використання ймовірісно-статистичних методів установлюються не функціональні, а кореляційні залежності між змінами гідродинамічного напору й одним або декількома факторами. З ймовірісно-статистичними методами тісно пов'язані методи гармонійного аналізу, за допомогою яких виявляються кількісні закономірності в коливаннях гідродинамічного напору за період режимних спостережень, які екстраполюються за межі цього періоду [5].

Балансові методи базуються на розв'язанні рівнянь водного балансу підземних вод відносно величини зміни гідродинамічного напору за певний проміжок часу. Елементи балансу визначаються або експериментальним шляхом із використанням спеціальних приладів і установок, або розраховуються за формулами гідрогеодинаміки. Потім встановлюється функціональна або кореляційна залежність між зміною гідродинамічного напору та тими або іншими елементами балансу.

Виклад основного матеріалу. Під час вивчення гідрогеологічних умов Антонівського родовища підземних вод у м. Києві балансовим методом авторами використано просторовий аналіз та моделювання в ГІС за допомогою інструментарію ArcMap, а саме модулю Darcy Flow. Дослідження зміни гідродинамічних умов проведено по 10 свердловинах Філії ДП «АНТОНОВ» трьох водоносних систем: олігоцен-міоценовий водоносний горизонт, сеноман-келовейський водоносний комплекс та байоський водоносний горизонт.

Стандартні вихідні дані інструменту Сток по Дарсі (Darcy Flow) – це растрове зображення залишкового балансу обсягу підземних вод, який вимірює різницю між потоком води в кожний осередок і з кожного осередку моделі. Остаточний баланс обсягу підземних вод використовується для перевірки взаємоузгодження наборів даних по підземному стоку. Загальна зміна запасів води на досліджуваній території дорівнює сумі всіх елементів водного балансу [4].

Такий аналіз дає змогу створити растрове зображення векторів потоку підземних вод. Стандартним вихідним растром є залишковий растр балансу об'єму підземних вод, який вимірює різницю між потоком води в кожний осередок (комірку) та з нього.

Оскільки обчислення потоку виконується через кожну з чотирьох стінок осередку незалежно (потік регулюється різницею між сусідніми осередками), можливо, що більше (або менше) води може надходити в осередок, ніж виходити з неї, що призведе до позитивного значення (або від'ємного) залишкового обсягу балансу.

Гладкі, узгоджені вхідні растри без джерел або поглиначів повинні давати невеликі залишки, близькі до нуля. Великі залишкові значення вказують на те, що головний растр є неприйнятним щодо растрів проникності, пористості та потужності водоносної товщі. Особливе значення має растр напору підземних вод для кожного осередку. Коли виявляються великі залишки, вхідні дані будуть непослідовними та дадуть необґрунтовані результати, що призведе до помилкових результатів за подальшого моделювання.

Другою метою аналізу Стоку по Дарсі є обчислення поля потоку за допомогою закону Дарсі. Поле потоку – це векторне поле швидкостей просочування підземних вод. Воно виражається двома растрами: один – для величини, а інший – для напрямку.

Першим кроком у моделюванні потоку ґрунтових вод є визначення швидкості та напрямку потоку в кожній точці поля потоку. Darcy Flow робить це та розраховує баланс об'єму в кожному осередку растру, який має бути малим за відсутності додаткових джерел або стоків,

наприклад, експлуатаційних гідрогеологічних свердловин. Нульовий залишок балансу об'єму вказує на баланс між потоком у комірку та потоком із неї.

Стандартним растром Darcy Flow є залишковий растр балансу об'єму ґрунтових вод, який вимірює різницю між потоком води в кожну комірку та з неї. Залишок використовується для перевірки узгодженості наборів даних підземних вод.

Для досягнення поставлених завдань дослідниками було створено шейп-файли параметрів згаданих водоносних горизонтів Антонівського родовища. У процесі роботи створювалася атрибутивна таблиця, в якій реєструвалися свердловини. Також було відтворено гідродинамічні поверхні водоносних горизонтів. Для цього для кожної свердловини на кожний водоносний горизонт використовувався стовпчик даних гідростатичного рівня підземних вод та метод апроксимації (IDW).

Далі було побудовано карти гідродинамічних напорів підземних вод, коефіцієнтів водопровідності, коефіцієнтів пористості вміщуючих порід, товщини водоносних пластів та карти балансу підземних вод для згаданих водоносних горизонтів. Побудовані карти допомогли краще зрозуміти динаміку водоносних пластів і точніше відтворити гідродинамічну обстановку. Карти водного балансу горизонтів наведено на рис. 1.

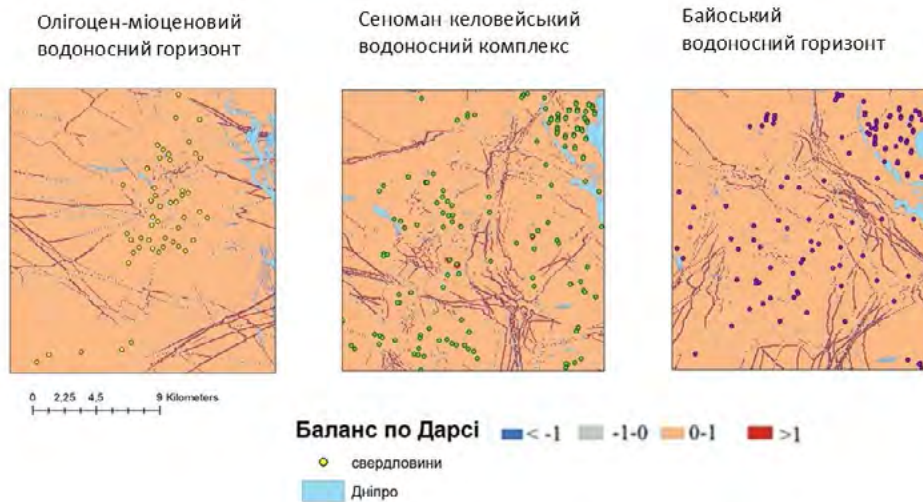


Рис. 1. Картосхеми балансу підземних водоносних горизонтів

Ситуація з балансом підземних вод показує стан системи водоносних горизонтів, зміну водності, враховує сезонність і зміни у водоносних горизонтах. Оптимальним є значення, близькі до нуля. Це показує, що система знаходиться в рівновазі, а поповнення та витрати води в пластах є взаємозалежними і тримаються на одному рівні. Можна сказати, що стан Антонівського родовища на території Києва є саме таким.

Висновки. Аналізуючи отримані растри напрямку руху підземних вод, можна зробити висновки, що в кожному водоносному горизонті спостерігається зміщення руху потоку в напрямку водозаборів, тобто до чинних свердловин. Це створює умови для виникнення воронки депресій та взаємодії свердловин. Загалом, результати просторового аналізу вказують, що антропогенний чинник має місце та впливає на процеси фільтрації води в досліджуваних водоносних горизонтах. Наразі такі чинники особливо не призводять до зміни режиму підземних вод, або такі зміни несуттєві та не призводять до зміни загального стану водоносних горизонтів.

ГІС-технології добре підходять для досліджень підземних вод завдяки їх здатності обробляти дані про місцезнаходження та атрибути одночасно. Технологія ГІС полегшує інтеграцію різноманітних наборів даних, як-от топографічні карти, літологічні карти та дані про рівень

води, які необхідно інтегрувати для узгодженої інтерпретації. Прогрес у комп'ютерних технологіях покращив здатність ГІС швидко й точно обробляти великі обсяги даних, що призвело до більш високої точності та повторюваності результатів порівняно з ручними методами.

Новизна дослідження. Такій підхід застосовано вперше для території Антонівського родовища, що дало змогу змодельовати водний баланс та зробити висновки про кількісні співвідношення між різними водоносними пластами. Водоносна системи горизонтів знаходиться в рівновазі, а поповнення й витрати води в пластах є взаємозалежними і тримаються на одному рівні. Також отримано можливість просторових оцінок компонентів водного балансу, які раніше не вимірювалися, завдяки просторовому аналізу в ГІС-середовищі.

Список використаних джерел:

1. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2021 році. URL: <https://mtu.gov.ua/content/nacionalna-dopovid-pro-yakist-pitnoi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostachannya-v-ukraini.html> (дата звернення: 03.02.2025).
2. Кошляков О., Диняк О., Кошлякова І. Виснаження та забруднення питних водоносних горизонтів в умовах інтенсивної експлуатації на території м. Києва. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 1 (56). Київ : ВПЦ «Київ. ун-т», 2012. С. 38–42.
3. Федоренко А.С., Буян Н.Н., Нікіташ Ю.О. Геолого-економічна переоцінка експлуатаційних запасів Київського родовища питних підземних вод для ПрАТ «АК «Київводоканал» в м. Києві. Київська гідрогеологічна експедиція ДП «Українська геологічна компанія». 2017. 153 с.
4. Dyniak O., Koshliakov O., Koshliakova I. Application of spatial analysis and modeling in GIS in the implementation of the water balance method in the hydrogeological monitoring system. *Conference Paper. XVII International Scientific Conference on "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 7–10 November 2023, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520152>
5. Koshliakov O., Dyniak O., Koshliakova I. Modeling in monitoring system of underground hydrosphere for territories under technogenic pressure. *Abstract of XI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of Environment"*, 2019, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903232>

References:

1. National report on the quality of drinking water and the state of drinking water supply in Ukraine in 2021. (2021). Retrieved 03.02.2025 from <https://mtu.gov.ua/content/nacionalna-dopovid-pro-yakist-pitnoi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostachannya-v-ukraini.html> [in Ukrainian].
2. Koshliakov, O., Dyniak, O., & Koshliakova, I. (2012) Depletion and contamination of drinking water aquifers under intensive exploitation on the territory of Kyiv. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(56), 38–42. [in Ukrainian].
3. Fedorenko, A.S., Buyan, N.N., & Nikitash, Yu.O. (2017) Geological-economical revaluation of operational reserves of Kyiv potable groundwater field for PJSC "AK Kyivvodokanal" in Kyiv city. Kyiv hydrogeological expedition of SI "Ukrainian Geological Company", 152. [in Ukrainian].
4. Dyniak, O., Koshliakov, O., & Koshliakova, I. (2023). Application of spatial analysis and modeling in GIS in the implementation of the water balance method in the hydrogeological monitoring system. *Conference Paper. XVII International Scientific Conference on "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 7–10 November 2023, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520152>
5. Koshliakov, O., Dyniak, O., & Koshliakova, I. (2019). Modeling in monitoring system of underground hydrosphere for territories under technogenic pressure. *Abstract of XI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of Environment"*. Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903232>