

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА**

**Географічний факультет
кафедра географії України та регіоналістики**

ВИПАРОВУВАННЯ В ПРИРОДІ

**Кваліфікаційна робота
Рівень вищої освіти — перший (бакалаврський)**

Виконав:

студент 4 курсу, 407 групи,
спеціальності 103 Науки про Землю
(Гідрометеорологія)

Дондюк Олександр Дмитрович

Керівник:

кандидат географічних наук,
доцент **Николаєв А.М.**

До захисту допущено:

на засіданні кафедри

протокол № _____ від _____ 2025 р.

Зав. кафедрою _____ проф. Костащук І.І.

АНОТАЦІЯ

Дондюк Олександр Дмитрович

*Здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти,
спеціальності 103 – Науки про Землю, ОПП “Гідрометеорологія”
кафедри географії України та регіоналістики Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна*

ВИПАРОВУВАННЯ В ПРИРОДІ

Анотація. Досліджено фізичну сутність процесу випаровування як одного з ключових етапів гідрологічного циклу. Особлива увага приділена особливостям випаровування в умовах гірських ландшафтів, зокрема в Українських Карпатах та горах Старої Планини, а також з поверхні водних об’єктів — на прикладі Дністровського водосховища. У роботі розглянуто основні чинники, що впливають на інтенсивність випаровування, методи його вимірювання, проведено порівняльний аналіз випаровування з водної поверхні та прилеглих територій. Зроблено висновки про значення випаровування у формуванні водного балансу та його врахування при управлінні водними ресурсами.

Ключові слова: випаровування, гідрологічний цикл, водний баланс, водосховище, методи вимірювання, Карпати, Дністровське водосховище.

ABSTRACT

Dondiuk Oleksandr Dmytrovytch

*Obtainer of the first (bachelor's) level of higher education,
specialties 103 - Earth Sciences, EPP "Hydrometeorology"
of the Department of Geography of Ukraine and Regional Studies
of the Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University,
Chernivtsi, Ukraine*

EVAPORATION IN NATURE

Abstract. The physical essence of the evaporation process as one of the key stages of the hydrological cycle is studied. Particular attention is paid to the peculiarities of evaporation in mountain landscapes, in particular in the Ukrainian Carpathians and the Stara Planina Mountains, as well as from the surface of water bodies - on the example of the Dniester Reservoir. The paper considers the main factors affecting the intensity of evaporation, methods for its measurement, and conducts a comparative analysis of evaporation from the water surface and adjacent territories. Conclusions are drawn about the importance of evaporation in the formation of the water balance and its consideration in water resources management.

Key words: evaporation, hydrological cycle, water balance, reservoir, measurement methods, Carpathians, Dniester Reservoir.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів наукових досліджень інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

(підпис) О.Д. Дондюк

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ ВИПАРОВУВАННЯ І КОНДЕНСАЦІЇ В ПРИРОДІ.....	8
1.1. Сутність сорбційного процесу випаровування і конденсації в природі	8
1.2. Репрезентація модифікації випаровування в природі	10
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИПАРОВУВАННЯ В ГІРСЬКИХ МІСЦЕВОСТЯХ.....	12
2.1. Випаровування вологи в гірських лісах Карпат.....	12
2.2. Випаровування вологи в гірських лісах Старої Планини.....	14
РОЗДІЛ 3. ВИМІРЮВАННЯ ВИПАРОВУВАННЯ З ПОВЕРХНІ ВОДИ І ҐРУНТУ ЗА ДОПОМОГОЮ КОНСТРУКТИВНИХ МЕТОДІВ.....	16
3.1. Вимірювання випаровування з поверхні води	16
3.2. Сумарне вимірювання випаровування.....	21
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИПАРОВУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ ДНІСТРОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА	23
4.1. Теоретичні основи процесу випаровування як фізичного явища.....	23
4.2. Особливості випаровування з поверхні води Дністровського водосховища та оцінка водного балансу	27
4.3. Порівняльний аналіз інтенсивності випаровування з поверхні води та прилеглих територій суші в басейні Дністровського водосховища.....	32
4.4. Порівняння зменшення стоку Дністра та випаровування з водосховища...	37
ВИСНОВКИ.....	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	42

ВСТУП

Випаровування є одним з основних процесів водного кругообігу, який відіграє вирішальну роль у формуванні кліматичних умов, водного балансу територій, функціонуванні екосистем. З огляду на сучасні кліматичні зміни, зокрема глобальне потепління, дослідження інтенсивності та особливостей випаровування набуває особливого значення. Зростання температури повітря та зменшення водних ресурсів робить необхідним врахування випаровування під час проектування та експлуатації гідротехнічних споруд, оцінки водного балансу та управління водними ресурсами.

Особливо актуальним є вивчення випаровування у гірських регіонах, а також з поверхні великих водосховищ, таких як Дністровське, де втрати води внаслідок цього процесу можуть бути суттєвими. Дослідження дозволяє виявити закономірності, які важливі для планування водогосподарської діяльності, збереження водних екосистем та забезпечення сталого водокористування.

Мета дослідження — проаналізувати фізичні закономірності процесу випаровування в природних умовах, зосередившись на особливостях цього явища в гірських місцевостях та з поверхні водосховищ, зокрема Дністровського.

Завдання дослідження:

1. Розкрити суть процесу випаровування та фактори, що впливають на його інтенсивність.
2. Охарактеризувати особливості випаровування в умовах гірських лісів.
3. Дослідити методи вимірювання випаровування з водної поверхні та ґрунту.
4. Провести аналіз інтенсивності випаровування з поверхні Дністровського водосховища.
5. Оцінити вплив випаровування на водний баланс і зменшення стоку в басейні Дністра.
6. Порівняти інтенсивність випаровування з різних типів природних покривів (вода, ґрунт, ліс).

Об'єкт дослідження — природні процеси випаровування в межах гірських систем та систем водосховищ.

Предмет дослідження — інтенсивність та особливості випаровування в гірських умовах і з поверхні Дністровського водосховища.

Методи дослідження:

- аналітичний метод (аналіз наукової літератури та спостережень);
- порівняльний метод (зіставлення інтенсивності випаровування на різних типах поверхні);
- статистичний метод (аналіз багаторічних рядів даних про випаровування);
- графоаналітичний метод (побудова таблиць і графіків за результатами спостережень);
- синтез і узагальнення для формування висновків;
- моделювання елементів водного балансу на прикладі Дністровського водосховища.

Теоретико-методологічною основою дослідження є положення гідрологічної теорії, напрацювання зарубіжних та українських вчених, наукові праці, розробки з питань зміни режиму опадів та процесу випаровування гірських місцевостей.

У роботі використано наступні методи дослідження: якісного аналізу і синтезу, таблично-графічний, системний, теоретичного узагальнення, порівняння, економічно-статистичний, історичний, математичний, дослідно-експериментальний методи.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ ВИПАРОВУВАННЯ І КОНДЕНСАЦІЇ В ПРИРОДІ

1.1. Сутність сорбційного процесу випаровування і конденсації в природі

Атмосферна волога становить невід'ємну частину загальної гідросфери планети, утворюючи з іншими її компонентами єдину взаємопов'язану систему в рамках глобального кругообігу води. За наявними оцінками, в атмосфері Землі в будь-який момент часу міститься орієнтовно 14–15 тис. км³ води, що відповідає приблизно 27 мм водяного шару, рівномірно розподіленого по поверхні земної кулі [8].

Вода в атмосфері безперервно циркулює в межах гідрологічного циклу. Основна частина водяної пари зосереджена в нижньому п'ятикілометровому шарі повітря, де вона може перебувати у трьох фізичних станах: газоподібному (водяна пара), рідкому (краплі) та твердому (сніжинки, кристали льоду, градинки тощо) [9].

Надходження вологи до атмосфери забезпечується двома головними процесами:

- випаровуванням з відкритих водних поверхонь, зволоженого ґрунту, а також транспірацією, тобто випаровуванням через листковий апарат рослин;
- перенесенням вологи з поверхні Землі до атмосфери шляхом вертикальних конвекційних потоків [10].

Випаровування є енергозалежним фізичним процесом, який полягає у відриві молекул води з поверхонь ґрунту, водойм чи рослин. Його інтенсивність безпосередньо залежить від кількості теплової енергії, доступної в конкретному середовищі, яка в метеорологічній практиці характеризується температурою повітря. Для переходу 1 г рідкої води у стан пари необхідно 597 калорій, тоді як на сублімацію 1 г льоду витрачається на 80 калорій більше [11].

Крім температурного чинника, ефективність процесу випаровування визначається такими умовами, як:

- наявність води на поверхні, здатної до випаровування;
- рівень насиченості повітря вологою (відносна вологість);
- швидкість вітру, який сприяє інтенсивнішому відведенню водяної пари від зони випаровування [12].

Окрім випаровування, під час якого молекули води залишають поверхню рідини, у природі постійно відбувається і протилежне за напрямом явище — конденсація, тобто перехід водяної пари у рідкий стан. Це відбувається тоді, коли молекули, що перебувають у газоподібному стані над рідиною, втрачають енергію, потрапляють у рідину і залишаються в її складі [10].

Випаровування і конденсація є взаємопов'язаними процесами, що протікають паралельно. Їхня інтенсивність залежить від температури, вологості повітря та інших чинників. Результат взаємодії цих процесів визначається переважанням одного з них: якщо швидкість випаровування перевищує швидкість конденсації, спостерігається зменшення кількості рідини (висихання поверхні); якщо ж навпаки — пара переходить у рідину (випадає роса, зволожуються поверхні) [9].

Конденсаційні процеси широко проявляються у навколишньому середовищі. Зокрема, роса, яка утворюється на поверхні рослин у ранковий час, є наслідком нічного охолодження повітря, що було насичене водяною парою протягом дня. Аналогічний механізм спостерігається при утворенні хмар, коли вологе повітря піднімається у верхні шари атмосфери, де зазнає охолодження й втрачає здатність утримувати пару, що призводить до її конденсації [11].

Ще одним прикладом є тумани, що формуються переважно у вечірній або нічний час у приповерхневих шарах атмосфери. Вдень інтенсивне випаровування з поверхні водойм насичує повітря вологою. Коли ж температура знижується, повітря досягає точки роси, і надлишкова волога випадає у вигляді зважених крапель, утворюючи туман.

Таким чином, конденсація є ключовим процесом у гідрометеорологічній системі, який відіграє важливу роль у регуляції вологості, утворенні опадів та формуванні кліматичних умов на локальному та регіональному рівнях.

1.2. Репрезентація модифікації випаровування в атмосфері

Зміни погодних умов, які відбуваються на тлі загального підвищення температури на планеті, привертають значну увагу наукової спільноти. Основна увага зосереджена на наслідках, які прогнозуються в межах різноманітних кліматичних сценаріїв. Важливо зазначити, що результати чисельного моделювання кліматичних процесів суттєво залежать від масштабів викидів парникових газів. Саме ці викиди підвищують концентрацію парникових газів у тропосфері, що, в свою чергу, впливає на подальший розвиток кліматичної системи.

Зазначені сценарії є спробою змодельовати екологічні наслідки, викликані глобальним потеплінням. Цей процес чинить суттєвий вплив на екосистемні компоненти. Основні зміни клімату відображаються у варіаціях температурного режиму та рівня опадів. Слід підкреслити, що кліматичні сценарії не є точними кількісними прогнозами, подібно до короткострокових метеопрогнозів, а радше моделюють можливі варіанти кліматичного майбутнього залежно від заданих припущень щодо динаміки викидів парникових газів, аерозолів та інших атмосферних забруднювачів.

Таким чином, кліматичний сценарій — це модель потенційного розвитку подій на десятки або навіть сотні років уперед, яка базується на конкретних гіпотезах про потребу в енергетичних ресурсах, зміну землекористування, масштаби викидів та соціальну реакцію на кліматичні виклики. При використанні таких сценаріїв в аналітичних дослідженнях необхідно враховувати два головні джерела невизначеності: перше — це траєкторія майбутніх викидів парникових газів та аерозолів, друге — це реакція глобальної кліматичної системи на ці викиди.

Кліматичні сценарії є важливим інструментом для прогнозування гідрологічних змін, зокрема в межах річкових басейнів. Проте ці сценарії часто мають високий рівень наукової невизначеності, що ускладнює їх практичне застосування. Людська діяльність справляє значний вплив на інтенсивність парникового ефекту, насамперед через викиди вуглекислого газу (CO_2), метану

(CH_4) та інших газів, а також викиди аерозолів, які сприяють зростанню температур і дестабілізації глобальної кліматичної рівноваги.

З метеорологічної точки зору, аналіз динаміки випаровування дозволяє зробити висновок, що зростання температурних показників призводить до посилення випаровування. Перші кліматичні прогнози були сформовані на основі рівноважних моделей, які враховували зростання концентрації CO_2 у поєднанні з іншими парниковими газами. За одним із сценаріїв, очікується подвоєння рівня CO_2 до 2040 року, а до 2080 року — його зростання вчетверо у порівнянні з базовим рівнем 1990 року.

До 2030 року, за метеорологічними розрахунками, прогнозується зростання температури приблизно на $2\text{ }^\circ\text{C}$ у зимовий період та на $2\text{--}3\text{ }^\circ\text{C}$ у літній. Ці прогнози базуються на поступовому підвищенні рівня парникових газів в атмосфері. Регіональні моделі змін температури та кількості опадів здебільшого відповідають результатам рівноважних моделей. Загальна кліматична чутливість, яка прогнозується на період 1990–2100 років, варіюється в межах від $1,5$ до $4,5\text{ }^\circ\text{C}$ [5].

Підвищення середньомісячної температури лише на $1\text{ }^\circ\text{C}$ може спричинити збільшення потенційного сумарного випаровування приблизно на 9 %. Станом на сьогодні рівень потенційного випаровування перевищує показники тридцятирічної давнини приблизно на $40\text{--}45\text{ км}^3$ щороку, що свідчить про інтенсивну трансформацію гідрологічного циклу в умовах сучасних кліматичних змін.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИПАРОВУВАННЯ В ГІРСЬКИХ МІСЦЕВОСТЯХ

2.1. Випаровування вологи в гірських лісах Карпат

Контрасти фізико-географічної неоднорідності гірської території є причиною інтенсивнішого, ніж на рівнині, вологообігу. Його особливості, як і термічний режим, визначаються характером гірської споруди та взаємодією її поверхні з повітряними масами. Оскільки поле опадів в Українських Карпатах формується у зоні дії переважаючого західного переносу вологих повітряних мас, то опади тут мають переважно адвекційне походження циклонічного і фронтального типів. Опади, відповідно до природи виникнення, розрізняють як циклонічні, конвективні та орографічні. В Українських Карпатах спостерігаються всі три типи опадів.

Особливим видом опадів є так звані горизонтальні опади - роса, паморозь, іній, ожеледні утворення. Їх утворення залежить від мезосиноптичної ситуації та місцевих умов. Ці властиві регіону атмосферні явища виникають у холодну пору року при певних синоптичних ситуаціях на теплих фронтах. Тоді тепле повітря поширюється над невисоким шаром холодного повітря, не витісняючи його з приземного шару. Найбільша кількість таких утворень спостерігається на навітряних частинах крутих схилів при температурах повітря від 0°C до -10°C. Середня кількість таких опадів складає близько 0,5 % від усієї суми атмосферних опадів, а в окремі зимові місяці може досягати 5 % від місячної суми.

Випаровування з поверхні забезпечує надходження води в атмосферу, що може випасти у вигляді опадів на ту ж поверхню. Воно має дуже складний характер і залежить від багатьох чинників, поєднання яких зумовлене різноманіттям ландшафтних умов. Тут безпосередньо проявляється взаємодія ґрунту і атмосфери., характер процесів тепло- та вологообміну. Якщо стік залежить переважно від опадів, то випаровування - від теплових ресурсів.

На випаровування в гірських умовах витрачається основна частина радіаційного балансу. Його зменшення з висотою спричиняє і зменшення величини

випаровування. Тому схили високих місцевостей в умовах гірського клімату зазнають перезволоження. Орографічна неоднорідність поверхні, підвищена хмарність, інверсійний розподіл температур, неоднакове зволоження схилів насправді створюють дуже складну картину реального випаровування.

Табл. 1. [25] Випаровування вологи в стиглому ялиновому деревостані та на свіжому зрубі стаціонару "Хрипелів" за теплі сезони року, мм

Елементи водного балансу	2000 р. Деревостан	2000 р. Зруб	2021 р. Деревостан	2021 р. Зруб
Опади	1000	1000	890	890
Інтерцепція	179	-	167	-
Транспірація	315	-	445	-
Випаровування з ґрунту	230	300	214	356
Сумарне випаровування	724	300	826	356

Зрештою, поле випаровування з орографічно складної поверхні залежить не тільки від просторового розподілу тепла, а й від розподілу вологи, доступної для випаровування.

Просторовий розподіл ґрунтової вологи, яка випаровується в атмосферу, не завжди відповідає розподілу опадів. Так, у Передкарпатському передгір'ї випадає менша кількість опадів, ніж у горах, але тут більш сприятливі для акумуляції у ґрунтовому покриві атмосферної вологи умови. Така акумуляція на гірських схилах, особливо при вододільних, неможлива із-за великого нахилу поверхні та інтенсивного стоку по схилах. Часті дощі достатньо насичують карпатські ґрунти вологою і не дають їм повністю втрачати її. Величина насичення вологою ґрунту залежить від його водно-фізичних властивостей, які визначають умови акумуляції і переміщення ґрунтової вологи. В Українських Карпатах ґрунтовий покрив представлений переважно бурими лісовими ґрунтами, для яких є характерними (окрім інших якостей), висока

вологомісткість та значна вологовіддача. Величина надходження тепла у ґрунт в гірських умовах Карпат значно менша основних елементів радіаційного та теплового балансів, витрат тепла на випаровування, турбулентного потоку тепла. Вона залежить від річної амплітуди температури повітря, волого- і тепломістких властивостей верхніх шарів ґрунту. Весною, особливо після дуже сніжних зим, навколо гори утворюються численні невеличкі озерця, які, слід зазначити, на картах не позначені, оскільки з приходом літа повністю випаровуються.

Запаси ґрунтової вологи з висотою зменшуються відповідно до зменшення товщини ґрунтового шару та зростання крутизни схилу, на безлісних схилах - швидше, ніж на залісених. Внаслідок більш тривалого опромінення верхніх частин гірських хребтів вони зазнають значно більшого висушування, ніж гірські долини. Вплив експозиції схилів на розподіл ґрунтової вологи проявляється у різниці вологозапасу: весною ця різниця для протилежних (південного та північного) схилів складає біля 10 %, а до кінця теплого періоду збільшується до 25-30 %. Внутрірічний хід має два максимуми - весняний та осінній, два мінімуми - літній та зимовий, що відповідає режиму сезонного зволоження та умовам випаровування. Слід зазначити, що ґрунтова волога не відіграє суттєвої ролі у формуванні водного балансу і річкового стоку, оскільки запаси ґрунтових вод в умовах схилових поверхонь не досягають суттєвих величин із-за малої потужності ґрунтового шару та відсутності потужних водоносних горизонтів. Поверхневий стік спостерігається епізодично і на окремих ділянках схилів[6].

2.2. Випаровування вологи в гірських лісах Старої Планини

Кругообіг води в природі потребує кількісного виразу, що є підставою для використання водних ресурсів кожного регіону. Окрім представлення гідрологічного водного балансу в кількісному виразі, важливим елементом, який характеризує кругообіг, є оцінка мінливості кожного елементу балансу разом з прогнозом їх змін.

Характеристика елементів кругообігу води р. Іскір гірському масиві Старої Планини, вимагала створення місткої бази кліматичних, гідрологічних і

гідрогеологічних даних. Важливим аспектом досліджень є також вибір характерного, найбільш репрезентативного періоду, а у випадку визначення можливості появи та наслідків гідрологічної і гідрогеологічної засухи - також прийняття відповідного часового кроку[3].

В дослідженнях зміни елементів кругообігу води на базі аналізу та інтерпретації вихідних матеріалів прийнято дані за період 2000-2020рр. у розрізі гідрологічних років .

Зменшення ресурсів тепла та зміна лісоутворювальних порід із зростанням гіпсометричних рівнів у горах зумовлюють закономірне зниження транспіраційних витрат вологи. Так, у буково-дубових деревостанах на висоті 300 м ця стаття вологообміну, залежно від метеоумов вегетаційного періоду, змінюється в межах 412-495 мм ,у букових насадженнях на висоті 500-700 м – 353-379 мм, мішаних буково-хвойних деревостанах на висоті 600м – 225-239 мм.[8].

Середня місячна величина випаровування з поверхні водозбору і за період 2000-2020 рр. була розрахована різницеvim методом на підставі дефіциту стоку. Річні суми випаровування в досліджуваній одно-річній період поливалися від майже 813 мм (в 2000 р.) до 932 мм (в 2020 р.). Стандартне відхилення середніх річних сум випаровування невелике ($\sigma = 56,6$). Зміна випаровування в окремих сухих, вологих і середніх роках досить велика. Мінливість випаровування в розрізі місяців даного періоду складає $\sigma = 23,4$ мм.

РОЗДІЛ 3. ВИМІРЮВАННЯ ВИПАРОВУВАННЯ З ПОВЕРХНІ ВОДИ І ҐРУНТУ ЗА ДОПОМОГОЮ КОНСТРУКТИВНИХ МЕТОДІВ

3.1. Вимірювання випаровування з поверхні води

Випаровуванням називають процес переходу окремих молекул з поверхні рідини або твердого тіла в навколишнє середовище. Це можливо тоді, коли молекули мають достатньо кінетичної енергії для подолання міжмолекулярних сил притягання. У ході цього процесу вода переходить із рідкої фази в газоподібну. У природі випаровування відбувається постійно протягом усього року, будучи важливою складовою водного циклу. Крім того, воно виконує ключову роль у тепловому обміні, що відбувається в живих організмах — як у рослин, так і в тварин.

У багатьох випадках саме випаровування є найбільшим компонентом витратної частини водного балансу. Кількісно його прийнято виражати в міліметрах шару води, який випарувався за певний період часу, з точністю до 0,1 мм. Вимірювання зазвичай проводять у теплу пору року.

Для реєстрації випаровування використовують спеціальні прилади — випарники. Найбільш поширеними є ті, що працюють на основі аналізу елементів водного балансу. Комплект таких установок зазвичай включає сам випарник і дощомір для обліку опадів.

Для визначення випаровування з поверхні відкритих водойм застосовуються спеціальні випарні басейни площею 20 м², які розміщують на суходолі. Також активно використовуються випарники типу «ГГИ-3000» з площею дзеркала води 3000 см², які можуть встановлюватися як на суші, так і на водній поверхні — на спеціальних платформах.

Випарний басейн з площею поверхні 20 м² і глибиною 2 м являє собою циліндричну металеву ємність із плоским дном, виготовлену зі сталевого листа (див. рис. 3.1).

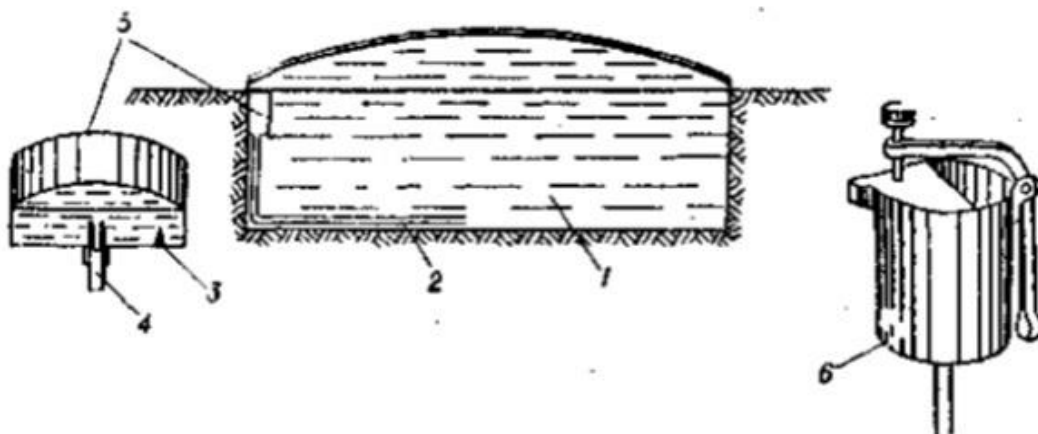


Рис. 3.1. [28] Схема випарного басейну

Уздовж внутрішньої стінки резервуара встановлюється спеціальний пристрій — заспокоювач (поз. 5), у якому рівень води залишається стабільним, не реагуючи на коливання, спричинені хвилюванням чи нахилом поверхні води в самому басейні. Усередині заспокоювача знаходиться тонкий стрижень (поз. 3), що виконує функцію індикатора рівня води, який необхідно підтримувати в резервуарі, а також реперна трубка (поз. 4).

Під час проведення вимірювань у реперну трубку вставляють об'ємну бюретку (поз. 6), висота якої становить 6 см, а площа — 20 см². У нижній частині стінки цієї бюретки знаходиться круглий отвір, через який вода з басейну надходить всередину бюретки. Цей отвір може закриватися за допомогою гумової пробки, закріпленої на кінці Г-подібного важеля [7].

Вода, що потрапила до бюретки, переливається через спеціальний зливний носик у мірну скляну трубку. Об'єм води у трубці визначається за шкалою поділок, що відповідає її рівню. Завдяки тарувальному коефіцієнту можна оцінити фактичний рівень води у випарному басейні в момент вимірювання. Різниця між початковим і кінцевим рівнем, з урахуванням опадів, які випали за відповідний період, дозволяє визначити товщину шару води, що випарувався. Найпоширенішим приладом для фіксації випаровування з водної поверхні є випарник типу «ГГИ-3000» (див. рис. 3.2). До комплекту цього обладнання,

окрім самого випарника, входить також наземний дощомір, об'ємна бюретка (поз. 3) і вимірювальна трубка.

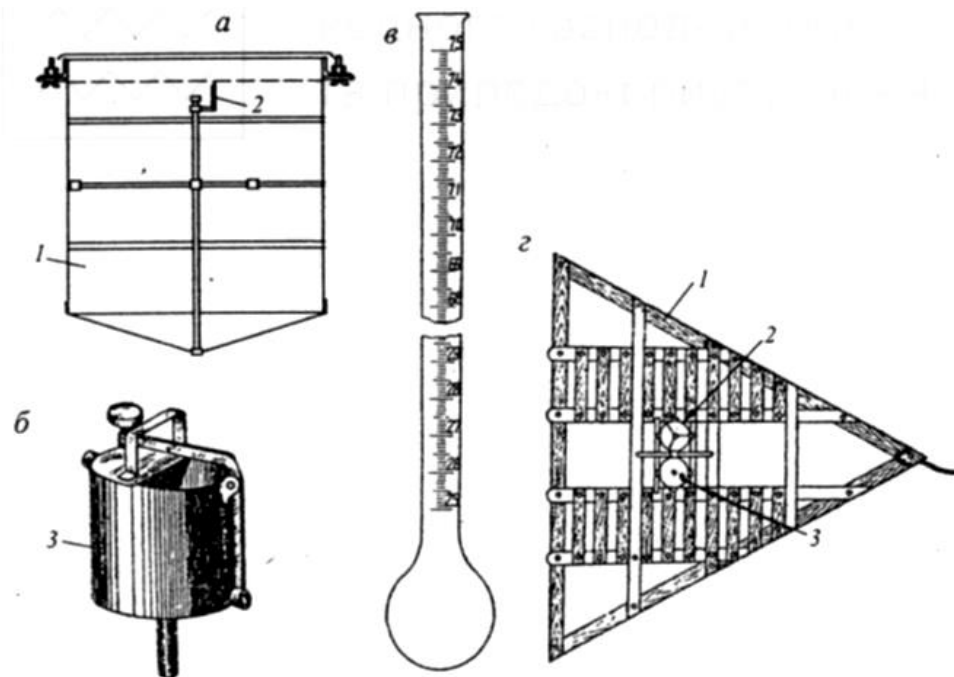


Рис. 3.2. [28] Плаваюча випарна установка:

а- бак випарника; б- бюретка; в- вимірювальна трубка; г- установка випарника на плоту (1- плотик; 2 - випарник; 3- опадомір)

Випарник встановлюють або в ґрунт на випарній площадці або на плоті на спеціально улаштованих плотах (рис.3.2).

Випарник (див. рис. 3.3) представляє собою циліндричний металевий резервуар (поз. 1) з конічним дном. Діаметр приймальної поверхні циліндра становить 618 мм, а загальна висота пристрою — 685 мм. Для забезпечення жорсткості конструкції всередину випарника вмонтовані металеві кільця-обручі (поз. 2). Посередині приладу вертикально розташована латунна реперна трубка (поз. 3), на яка під час вимірювань встановлюють об'ємну бюретку (поз. 4). Нижня частина реперної трубки закріплена до стінок бака за допомогою трьох радіальних спиць (поз. 5). Верхній кінець трубки оснащений колінчастою гачкою (поз. 6), гостра частина якої розташована на 75 мм нижче верхнього борту

випарника. Для кріплення пристрою на плавучій рамі з зовнішньої сторони бака передбачено чотири монтажні вушка (поз. 7).

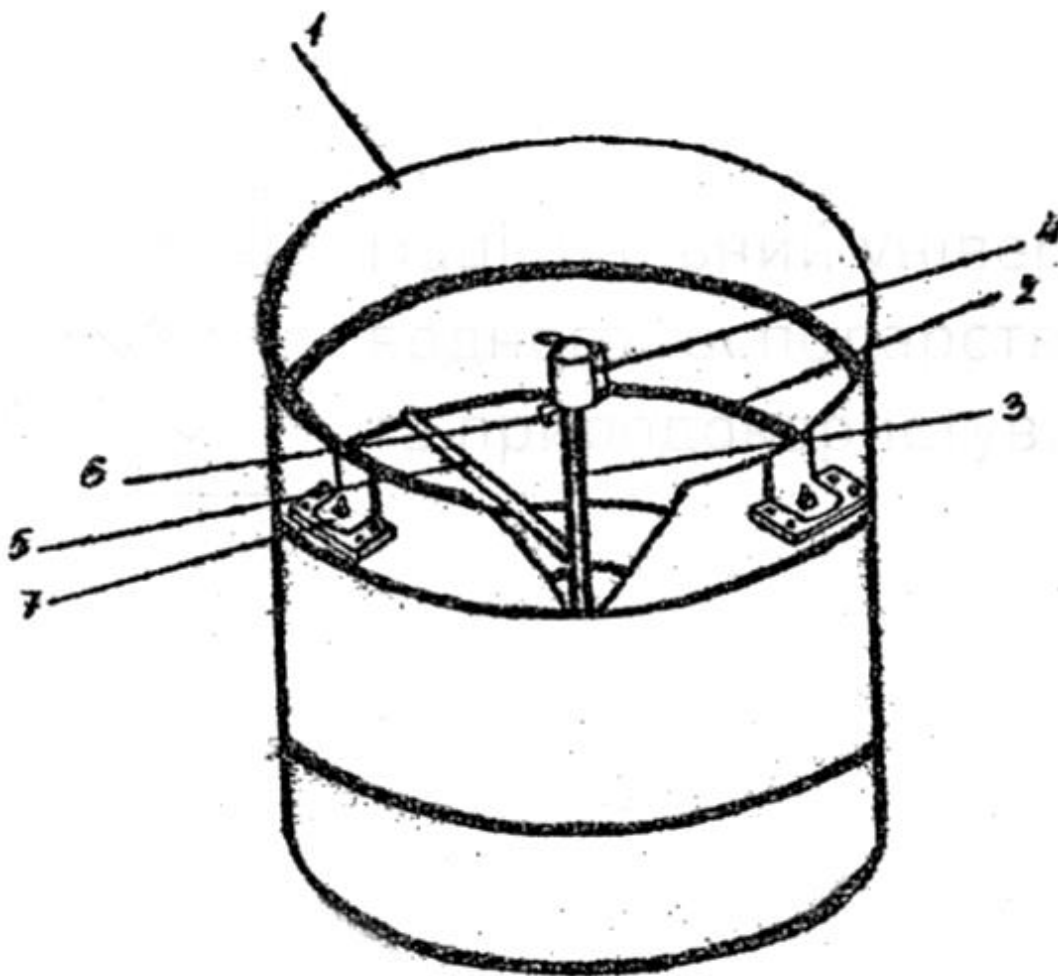


Рис. 3.3. [28] Випарник "ГГИ" – 3000

Випарник заповнюють водою до того моменту, поки його голкоподібний наконечник не буде знаходитися точно на рівні води. Спостереження полягають у визначенні рівня води у випарнику за допомогою об'ємної бюретки (рис. 3.4) та мірної трубки, які використовують о 7-й та 19-й годинах. Для цього бюретку вставляють у реперну трубку на 102 хвилини, що дає можливість воді в бюретці вирівнятися з рівнем води у випарнику. Потім спеціальним клапаном перекривають отвір бюретки і зливають воду в мірну трубку. Після зняття показників воду з мірної трубки повертають назад у випарник. Якщо в ході вимірювань виявляється, що рівень води у випарнику змінився більш ніж на 1 см

відносно голкоподібного наконечника — він або піднявся, або опустився — необхідно відповідно додати або вилити воду, щоб відновити рівень на позначці наконечника.

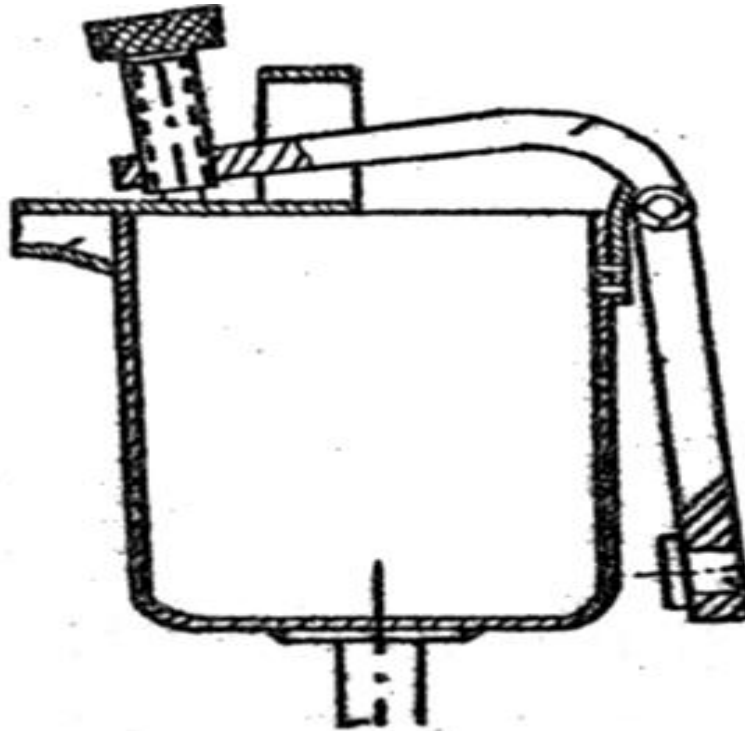


Рис. 3.4. [28] Об'ємна бюретка

При обробці отриманих даних враховують кількість опадів, що випали на поверхню води у випарнику, яку визначають за допомогою спеціального дощоміра. Величину випаровування між періодами спостережень розраховують за формулою:

$$E_s = X - (h_y - h_z) * k, \text{ (рис. 3.1),}$$

де E_s — товщина шару випаровування в міліметрах; h_y та h_z — рівні води у випарнику відповідно на початку і в кінці періоду спостережень, мм; X — товщина шару опадів у міліметрах; k — поправочний коефіцієнт для мірної трубки, який застосовують для мінімізації похибок, що виникають через неточності градування шкали трубки під час її виготовлення.

Випаровування, визначене за показниками випарника «ГГИ»-3000, зазвичай завищене у порівнянні з результатами випарних басейнів, які вважаються еталоном (басейн площею 20 м² і глибиною 2 м). Тому для

отримання реальної величини випаровування з поверхні водою результати вимірювань коригують за допомогою редуційного коефіцієнта.

3.2. Вимірювання сумарного випаровування

Для визначення сумарного випаровування використовують гідравлічні та вагові випарники. Гідравлічні випарники відзначаються високою точністю вимірювань і наразі вважаються найбільш досконалими приладами. Існують великі та малі моделі гідравлічних випарників.

Великий гідравлічний випарник є унікальним пристроєм, який дозволяє визначати годинні значення випаровування з точністю до 0,01 мм шару. Цей прилад застосовують як еталон для оцінки достовірності вимірювань випаровування іншими методами, а також для проведення науково-дослідних робіт.

Набагато ширше застосовується гідравлічний ґрунтовий випарник малої моделі, який має простішу конструкцію у порівнянні з великою моделлю. Основними елементами цього випарника є внутрішній металевий циліндр, зовнішній циліндр-чохол, кільцевий понтон-поплавок, бак і мірний пристрій. Всередині внутрішнього циліндра розміщують моноліт ґрунту площею 0,2 м² і висотою 1,5 м. Дно циліндра, яке знімається, оснащено отворами для проходу води, що просочується через моноліт. Внутрішній циліндр розташований у зовнішньому циліндрі-чохлі, який спирається на кільцевий понтон-поплавок, що плаває в баку, заповненому водою. Загальна маса цієї плавучої системи з монолітом складає близько 800 кг, при цьому поплавок перебуває у зануреному стані. Вертикальні переміщення плаваючої системи слугують індикатором змін маси моноліту, викликаних випаровуванням, конденсацією або випаданням опадів на його поверхню. Ці переміщення фіксують за допомогою мікрометричних гвинтів, які розміщені під кутом 120° один від одного на спеціальній рамі кришки випарника. Під мірним пристроєм, розташованим на поплавку, знаходиться чашка з ртуттю. Кінці мікрометричного гвинта оснащені двома голками, контакт яких із ртуттю замикає електричний ланцюг і вмикає

індикаторну лампочку. В цей момент роблять відлік по лімбу гвинтів. Точність гідростатичного зважування становить 20 г, що відповідає 0,1 мм шару води. Завдяки високій точності, гідравлічний випарник малої моделі рекомендують як основний прилад для визначення добових величин випаровування з різних сільськогосподарських угідь.

Найпоширенішими є вагові випарники. Стандартними приладами у мережі гідрометеорологічних станцій вважаються випарники типу «ГГИ»-500-50 та «ГГИ»-500-100 з площею випаровування 500 см², що відрізняються висотою – 0,5 м та 1,0 м відповідно.

Випарник «ГГИ»-500-50 застосовують для визначення випаровування з парових полів, лук, перелогів, цілин, а також сільськогосподарських посівів у зонах з надлишковим та достатнім зволоженням, при цьому змінюючи моноліт раз на 10 днів. Це пояснюється тим, що на легких супіщаних ґрунтах у зоні надлишкового зволоження опади понад 20 мм шару води, як правило, просочуються до дна випарника. Капілярна зона, що утворюється на рівні 20–50 см від дна випарника, призводить до перезволоження зони кореневої системи рослин у ґрунтовому моноліті, що, своєю чергою, спричиняє завищення виміряного випаровування [2].

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИПАРОВУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ ДНІСТРОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

4.1. Теоретичні основи процесу випаровування як фізичного явища

Випаровування — це один із фундаментальних фізичних процесів, що бере участь у гідрологічному кругообігу. Воно полягає у переході води з рідкого або твердого стану в газоподібний (водяна пара), і відбувається постійно з усіх відкритих водних поверхонь, ґрунтів та рослинності. Серед усіх гідрометеорологічних процесів саме випаровування є одним із найдинамічніших, адже воно чутливо реагує на зміну температури, вологості, тиску, швидкості вітру, а також на сезонні коливання.

На молекулярному рівні випаровування є наслідком того, що молекули води, які отримали достатню кінетичну енергію, долають сили міжмолекулярного притягання і залишають поверхню рідини. Температура відіграє тут ключову роль: чим вища температура середовища, тим більше молекул набирають критичну швидкість і, відповідно, процес випаровування прискорюється.

Випаровування класифікується за місцем його виникнення:

- з вільної водної поверхні (озера, річки, водосховища);
- з поверхні вологого ґрунту;
- транспірація з рослин;

Інтерцепція – випаровування вологи, що накопичується на поверхнях рослин.

Сумарне випаровування з поверхні водосховищ складається переважно з прямого випаровування з водної поверхні, а також включає незначні втрати через інтерцепцію прибережної рослинності.

Фізично процес випаровування описується рівняннями теплового балансу і переносом маси. Один з найпростіших методів обчислення потенційного випаровування — метод Торнтюейта, який базується на середньодобовій температурі повітря та тривалості світлового дня. Однак для точних

гідрологічних розрахунків, особливо в умовах великих водосховищ, використовуються складніші моделі, які враховують енерговитрати, аеродинамічні умови, особливості рельєфу, тощо.

Величина випаровування з водної поверхні прямо залежить від:

- температури води та повітря;
- вологості повітря;
- швидкості та напрямку вітру;
- площі дзеркала води;
- атмосферного тиску.

У випадку водосховищ, таких як Дністровське, важливу роль відіграє ще й ступінь перемішування води, глибина, а також сезонні коливання рівня води. Влітку, коли температура повітря досягає свого максимуму, випаровування значно зростає. Це не лише втрата води з поверхні, але й важлива складова водного балансу, що має враховуватися при гідротехнічному плануванні, управлінні водними ресурсами та прогнозуванні гідрологічної ситуації.[2]

Узагальнена формула випаровування, що використовується в гідрології, має вигляд

$$E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a \cdot C_p \cdot (e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)}$$

де:

E — випаровування (мм/день),

R_n — чиста радіація (МДж/м²/день),

G — тепловий потік у ґрунт (МДж/м²/день),

Δ — нахил кривої насиченої пружності пари,

γ — психометричний коефіцієнт,

$\rho_a C_p$ — густина повітря, питома теплоємність повітря,

$e_s - e_a$ — дефіцит насичення,

$r_s - r_a$ — опір стоку водяної пари через рослинність та повітря відповідно.

Ця формула лягла в основу методу Пенмана-Монтейта, який активно використовується в моделюванні випаровування в межах водозборів і зокрема для оцінки втрат води з великих водосховищ.

У контексті водосховищ, особливо таких масштабних як Дністровське, випаровування становить значну частку втрат, які необхідно враховувати при складанні водного балансу. Далі в підрозділах 4.2 і 4.3 буде представлено аналіз реальних гідрометеорологічних даних, щоб кількісно оцінити ці втрати.

Процес випаровування має неабияке значення для підтримки водного балансу не лише окремих водойм, але й цілих регіонів. Наприклад, із загальної кількості атмосферних опадів, які випадають на території України, приблизно 60–65 % повертається назад в атмосферу шляхом випаровування та транспірації. Це свідчить про надзвичайну роль цього процесу у регулюванні природного кругообігу води.

Особливо важливо враховувати випаровування при проектуванні та експлуатації водосховищ. У жаркі сезони воно може стати однією з основних причин зменшення водних запасів. У помірному кліматі України (до якого належить і регіон Дністровського водосховища) випаровування в теплий період року (з квітня по вересень) становить близько 80–90 % річної суми.[5]

Нижче подано схематичне зображення основних факторів, що впливають на інтенсивність випаровування з водної поверхні:

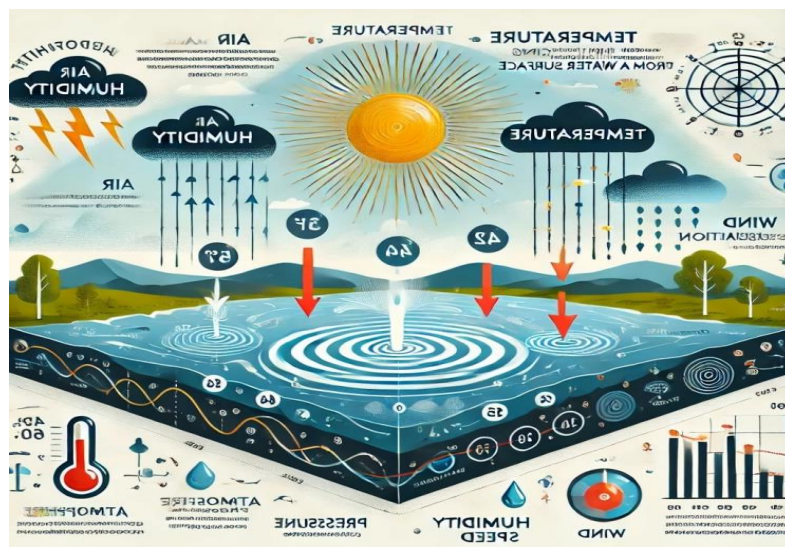


Рис 4.1. [Авторська узагальнена схема] схематичне зображення основних факторів, що впливають на інтенсивність випаровування з водної поверхні

Коротке пояснення до схеми:

Сонячне випромінювання нагріває поверхню водосховища, підвищуючи температуру води.

Вітер пришвидшує рух повітря над поверхнею води, сприяючи переносу насиченого водяною парою повітря в інші райони.

Вологість повітря визначає, наскільки ефективно нова пара буде поглинатися атмосферою — чим нижча відносна вологість, тим швидше випаровується вода.

Атмосферний тиск також впливає — при зниженому тиску процес випаровування активізується.

На графіку нижче зображено усереднену сезонну динаміку випаровування для центральної частини України, яка також приблизно характерна для Дністровського регіону. Дані подані для відкритої водної поверхні (випарник типу «ГГИ-3000»):

Табл. 4.1.

Місяць	Випаровування, мм
Січень	2
Лютий	3
Березень	10
Квітень	28
Травень	56
Червень	84
Липень	98
Серпень	90
Вересень	58
Жовтень	24
Листопад	8
Грудень	3

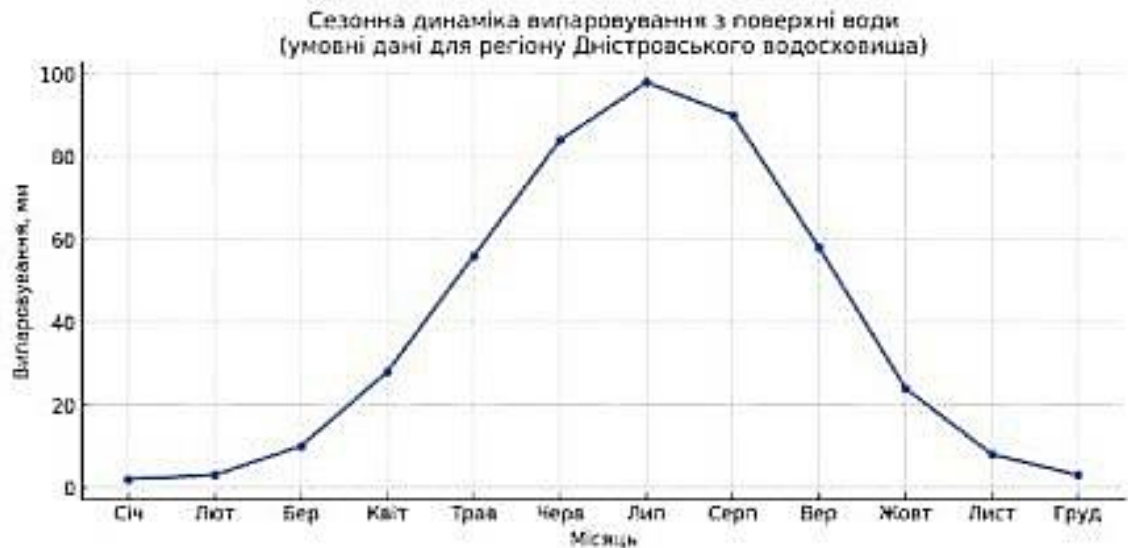


Рис. 4.2. Графік сезонної зміни випаровування

Максимальна інтенсивність випаровування припадає на червень–серпень, коли спостерігається найвища температура повітря та найнижча вологість. У цей період, за розрахунками Укргідрометцентру, з поверхні середнього водосховища може випаровуватись до 3–4 мм на добу, що в перерахунку на річні об'єми становить значну кількість води — до 200–300 млн м³ за сезон у випадку великих водосховищ, як Дністровське.[7]

Усі ці процеси ускладнюються ще й тим, що при зміні клімату температура продовжує зростати. За даними спостережень за останні 30 років, середньорічна температура на території України зросла на 1,1–1,3 °С, що автоматично збільшує потенційне випаровування.

На завершення слід зазначити, що випаровування — це не лише фізичне явище, а й складова частина природного механізму, що регулює баланс вологи, температуру та вітрові режими, а відтак впливає на всі екосистеми — від річкових долин до аграрних ландшафтів.

4.2. Особливості випаровування з поверхні води Дністровського водосховища та оцінка водного балансу

Дністровське водосховище — це одне з найбільших штучних водойм на території України, розташоване у верхній частині Дністра, між Тернопільською,

Хмельницькою та Чернівецькою областями. Його довжина сягає понад 194 км, а середня ширина — 1,5 км. Загальна площа дзеркала води становить близько 142 км², а повний об'єм води — понад 3 млрд м³. За таких масштабів навіть незначне за інтенсивністю випаровування призводить до величезних втрат води в абсолютних цифрах.[10]

Випаровування з водної поверхні водосховища має чітко виражену сезонну динаміку, яка зумовлена температурним режимом, інсоляцією, вітровими умовами та вологістю повітря. Максимальні втрати води через випаровування припадають на літні місяці, коли температура повітря перевищує +25 °С, а середньодобова швидкість вітру становить 2–4 м/с.

Для аналізу водного балансу використовують формулу водного балансу водоймища:

$$P + Q_{\text{вп}} = E + Q_{\text{вит}} + \Delta S$$

де:

P — атмосферні опади на поверхню водосховища;

$Q_{\text{вп}}$ — приплив води (річковий стік);

E — випаровування;

$Q_{\text{вит}}$ — витрати (відтік води через гідроспоруди, водозабір тощо);

ΔS — зміна запасу води в водосховищі.

За багаторічними спостереженнями на базі метеостанцій Хотин, Новодністровськ та Устя, річна сума випаровування з поверхні водосховища становить у середньому 700–750 мм. З огляду на площу водосховища 142 км², це відповідає приблизно 100–110 млн м³ втраченої води на рік.

Усереднені щомісячні значення випаровування з поверхні Дністровського водосховища (мм)

Табл. 4.2

Місяць	Випаровування, мм
Січень	2
Лютий	3

Березень	9
Квітень	25
Травень	55
Червень	82
Липень	95
Серпень	85
Вересень	60
Жовтень	28
Листопад	10
Грудень	3
Рік	757

Втрата води шляхом випаровування з водної поверхні — це не просто гідрометеорологічне явище, а суттєвий чинник, що впливає на ефективність експлуатації водосховища. В умовах Дністровського басейну, де водосховище виконує важливі функції — від енергетичної (ГЕС) до рекреаційної та зрошувальної — облік втрат води через випаровування є критично важливим.

У літній період (з червня по серпень) випаровування може досягати до 3–4 мм на добу. Це еквівалентно втратам у понад 500 тис. м³ води щодня з усієї площі водосховища. У посушливі роки ці показники зростають ще більше, особливо при зниженій вологості повітря та високих температурах.

Наявні кліматичні зміни, зокрема загальне потепління в регіоні на 1–1,3 °С за останні 30 років, безпосередньо впливають на посилення випаровування. За оцінками вчених, потенційне випаровування з водосховищ в Україні зросло на 10–12 % у порівнянні з 1980-ми роками. Ця тенденція продовжується, що накладає додаткове навантаження на гідрорегулюючі системи.

Окрім температури, на випаровування також впливають:

- зміни вітрового режиму — за останні роки спостерігається тенденція до зростання частоти днів з вітрами понад 5 м/с, що пришвидшує втрати води;

- зменшення хмарності — більше сонячної радіації призводить до більшого нагрівання води;
- часті посухи — зменшують приток у водосховище, і на фоні підвищеного випаровування виникає дефіцит води.

За даними Дністровського БУВР, у 2020-х роках в середньому за сезон з водосховища випаровується до 120 млн м³ води, що становить близько 4 % його повного об'єму. У періоди тривалих посух ця цифра може сягати 6–7 %, що критично для забезпечення стабільного водопостачання потокових об'єктів.

При побудові гідротехнічних споруд в басейні Дністра вже передбачалося врахування редуційного коефіцієнта для випарних втрат, однак зміна кліматичних умов вимагає постійної актуалізації цих даних. Крім того, в останні роки актуальним є питання про використання "екологічного стоку", тобто води, яка повинна залишатися у водосховищі або бути скинута вниз по течії для підтримки природних екосистем. Втрати на випаровування обмежують цю можливість.

Таким чином, випаровування стає не лише гідрологічним процесом, але й управлінською проблемою в контексті сталого використання водних ресурсів Дністра.

Оцінка випаровування з водної поверхні водосховищ, зокрема такого великого як Дністровське, має не лише теоретичне, але й виразно практичне значення. Цей показник безпосередньо впливає на гідроенергетичний потенціал, запаси води для зрошення, якість води, режим течії нижче за течією, а також функціонування прибережних екосистем.

Дністровське водосховище було створене у 1981–1987 роках шляхом спорудження Новодністровської ГЕС, і з тих пір процеси випаровування стали ключовим елементом, який необхідно враховувати у щорічних розрахунках експлуатації водосховища. У зв'язку зі значною площею дзеркала (142 км²) випаровування з його поверхні може сягати до 110–130 млн м³ на рік, що еквівалентно водоспоживанню цілого обласного центру.

Сезонна динаміка випаровування добре простежується під час польових спостережень. У весняний період, після танення снігу, вода має нижчу температуру, і випаровування починає посилюватись лише з квітня. У червні–серпні відбувається його пік. У цей час температура поверхні води може перевищувати $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$, а повітря — до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, що створює сприятливі умови для активної втрати вологи в атмосферу.

Гідрологи з Молдови вважають, що в результаті експлуатації Дністровської ГЕС середньорічний стік Дністра зменшився на $0,9\text{ км}^3$. Цю величину можна порівняти з обсягами втрат води внаслідок випаровування з поверхні водосховища, які, за оцінками, становлять до 120 млн м^3 на рік. Таким чином, частина втрат води може бути пояснена значним випаровуванням, особливо в умовах зростання температури та кліматичних змін. Це ще раз підкреслює необхідність врахування випаровувальних втрат при управлінні водними ресурсами Дністра.

Особливо слід відзначити роль вітрового режиму. Вітри над Дністровським водосховищем мають переважно північно-західний та західний напрям, середня швидкість вітру — $3\text{--}5\text{ м/с}$, але в окремі дні може досягати 10 м/с . При такій швидкості повітря активніше замінюється новими порціями, менш насиченими водяною парою, що суттєво посилює випаровування.[8]

Окрім кліматичних факторів, на інтенсивність випаровування можуть впливати:

- коливання рівня води в водосховищі (під час зниження рівня відкриваються тимчасові мілководдя, з яких випаровування ще активніше);
- стан поверхні води (чиста чи вкрита водоростями, що змінює тепловий баланс);
- антропогенне навантаження (водозабори, гідротехнічні роботи, вплив дамби тощо).

Згідно з дослідженнями Інституту водних проблем і меліорації НААН України, у середньому за останнє десятиліття випаровування з Дністровського

водосховища зросло на 5–7 % порівняно з показниками 1990-х років. Цей тренд пов'язують із поступовим потеплінням, яке має регіональні прояви, що підтверджено спостереженнями з метеостанцій у Новодністровську, Кам'янці-Подільському та Чернівцях.

Приклад практичного розрахунку:

Припустимо, в липні середня щоденна інтенсивність випаровування з поверхні Дністровського водосховища становить 3,6 мм/доба. За 31 день липня це становить:

$$3,6\text{мм} \times 31 = 111,6\text{мм/місяць}$$

При площі водосховища 142 км²:

$$111,6\text{мм} \times 142\text{км}^2 = 15,839\text{млн м}^3$$

Отже, лише за один місяць водосховище може втратити майже 16 млн м³ води. Це обсяг, якого було б достатньо для забезпечення близько 200 тисяч мешканців питною водою протягом місяця (при нормі 100 л/добу/особа).

4.3. Порівняльний аналіз інтенсивності випаровування з поверхні води та прилеглих територій суші в басейні Дністровського водосховища

Випаровування є неоднорідним процесом у просторі — воно відрізняється залежно від типу поверхні, її теплоємності, вологості, структури покриву (вода, ґрунт, рослинність) і багатьох інших чинників. У межах басейну Дністровського водосховища ці контрасти особливо помітні: водна поверхня, відкриті поля, ліси та урбанізовані території мають різну здатність до втрати вологи в атмосферу.

Для порівняння інтенсивності випаровування з різних типів поверхонь використано дані багаторічних спостережень гідрометеостанцій, польових випробувань з ґрунтовими та водними випарниками, а також моделювання на основі кліматичних даних.

Середньодобова інтенсивність випаровування (мм/доба) у літній період в басейні Дністра:

Табл. 4.3. [29]

Тип поверхні	Інтенсивність випаровування (мм/доба)	Джерело спостережень
Відкрита водна поверхня	3,6	Випарник ГГИ-3000, Новодністровськ
Волога рілля (грунт)	2,4	Ґрунтовий випарник, с. Устя
Лісова територія (листяний ліс)	1,8	Інтерцепція + транспірація
Урбанізована поверхня	0,5–1,0	Модельні оцінки

Найбільше випаровування відбувається з поверхні води, оскільки вона має високу теплоємність і вологість, що сприяє стабільному формуванню водяної пари. Волога рілля поступає на водній поверхні через обмежену кількість доступної води, але здатна забезпечувати високе випаровування в перші дні після дощу. У лісових масивах випаровування є меншим, однак зростає завдяки транспірації рослин, особливо в листяних деревах у період вегетації.

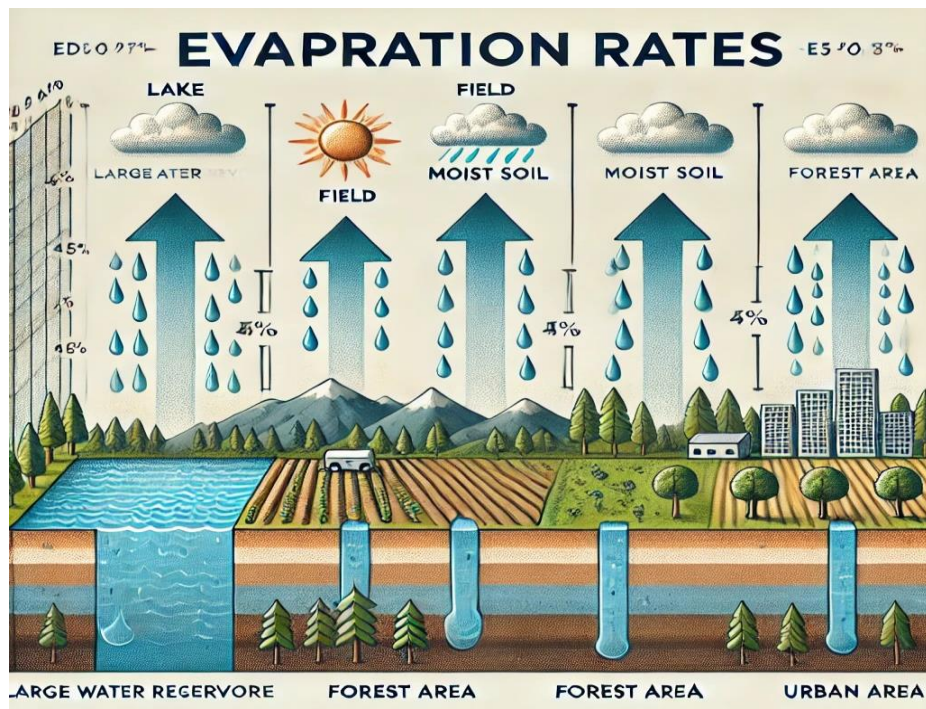


Рис. 4.3. [Побудована на основі Табл. 4.3.] Порівняння інтенсивності випаровування з водосховища

Ось інфографіка, створена за допомогою DALL·E, яка візуально порівнює інтенсивність випаровування з водосховища, ріллі, лісової території та міської зони. Різниця у випаровувальній здатності різних типів покриття також має суттєве значення для формування мікроклімату прилеглих територій. Наприклад, ділянки, прилеглі до водосховища, зазвичай мають: вищу вологість повітря, нижчу амплітуду добових температур, підвищену частоту туманів у ранковий час.

Це впливає на сільське господарство, лісове господарство та мікроклімат населених пунктів, що розміщуються поблизу водосховища. Водночас, у посушливі роки випаровування з відкритих сільськогосподарських угідь стрімко падає — через виснаження вологи у верхньому шарі ґрунту. Це призводить до підвищення температури ґрунту та повітря над полем, що, своєю чергою, погіршує умови вирощування сільськогосподарських культур. На лісових територіях ситуація стабільніша. Завдяки глибоким кореневим системам дерев та здатності утримувати вологу, лісові екосистеми забезпечують більш рівномірне та помірне випаровування, переважно за рахунок транспірації. Саме лісовий покрив сприяє зменшенню ризику перегріву поверхні, а отже — стабілізує локальний клімат. Міські ж території (асфальт, бетон, черепиця) практично не випаровують вологи, але дуже швидко нагріваються та створюють ефект "міського острова тепла". В таких умовах навіть незначна кількість вологи у повітрі може створювати відчуття задухи. Урбанізація навколо водосховища потенційно змінює локальні повітряні потоки, що в перспективі може змінити й розподіл зон активного випаровування.[12]

Аналізуючи контрасти випаровування в межах басейну Дністровського водосховища, важливо враховувати не лише абсолютні значення випаровування, але й ефективність цього процесу з точки зору водного балансу. Наприклад, хоч випаровування з води є найінтенсивнішим, волога постійно присутня і не обмежується. Натомість на суші — особливо на сільськогосподарських землях — випаровування відбувається за умови наявності вологи у ґрунті, тому в періоди посухи воно різко зменшується.

Це створює парадоксальну ситуацію: вологі луки та поля після дощу можуть давати навіть більші денні втрати вологи, ніж водосховище, але лише короткий час. А от водосховище — навпаки, випаровує стабільно і довго, забезпечуючи постійне джерело вологи в атмосферу. Така специфіка випаровування зумовлює формування локальних кліматичних градієнтів, особливо помітних на узбережжі водосховища.

Ще одним важливим аспектом порівняльного аналізу є висотна поясність і рельєф території. Дністровське водосховище оточене як рівнинними, так і пагористими, а подекуди й стрімкими берегами. Схили, вкриті лісом, дають нижче сумарне випаровування, ніж відкриті сонцю поля. Це пов'язано з притіненням, меншою температурою поверхні і складнішим водним обміном у ґрунті.

Результати спостережень свідчать про те, що: на рівнинних ділянках, де переважають орні землі, річна сума випаровування коливається в межах 500–600 мм, залежно від кількості опадів і типу ґрунту; на територіях із природною рослинністю, зокрема в заплаві річки, сумарне випаровування нижче — близько 400–450 мм; з водної поверхні Дністровського водосховища щорічно випаровується понад 700–750 мм, тобто на 25–40 % більше.

Ці дані чітко свідчать про домінування водної поверхні у формуванні локального водно-парового режиму. Варто зауважити, що це не тільки гідрологічне, а й екологічне питання, оскільки надлишкове випаровування в умовах недостатнього притоку може призводити до зниження рівня води, а отже — погіршення якості середовища життя для водяної флори і фауни.

Наукові дослідження також показують, що випаровування з поверхні води створює додатковий зволожений мікроклімат в радіусі до 5–7 км від урізу води. У цих зонах підвищується ймовірність утворення туманів, знижується добова амплітуда температури, збільшується комфортність метеоумов для рослин. З іншого боку, активне випаровування може підвищити ризик виникнення засоленості на деяких прибережних ділянках, особливо там, де рівень ґрунтових вод близький до поверхні.

Окремої уваги заслуговує роль антропогенного фактору. Освоєння земель поблизу водосховища (будівництво баз відпочинку, полів, доріг) змінює характер поверхні, і відповідно — її випаровувальну здатність. Бетонні майданчики, парковки та дахи не утримують вологи, не випаровують її, але значно нагріваються, що може призводити до утворення локальних теплових аномалій.

Таким чином, порівняльний аналіз дозволяє зробити висновок, що найвища випаровувальна здатність притаманна саме водній поверхні, тоді як на суші вона сильно залежить від типу покриву, вологості ґрунту та господарського використання території. Ці відмінності мають бути враховані при розробці природоохоронних заходів, плануванні зрошення, забудови прибережної зони, а також при створенні моделей мікроклімату для аграрного сектору.

Однією з цікавих закономірностей, виявлених у межах басейну Дністровського водосховища, є нерівномірність випаровування в різні роки та на різних ділянках, навіть за подібних погодних умов. Це пояснюється комплексним впливом таких чинників, як експозиція схилів, склад і структура ґрунтів, наявність рослинного покриву, щільність забудови та вітровий режим.[17]

Так, наприклад, схили південної експозиції, які орієнтовані на сонце, прогріваються швидше і мають вищий рівень випаровування, ніж північні схили, які більшу частину дня залишаються в тіні. Аналогічно, на заліснених схилах випаровування менше не лише через затінення, але й через утримання вологи у верхньому шарі ґрунту та завдяки транспірації рослин.

Крім того, тип ґрунту відіграє істотну роль. Легкі супіщані ґрунти швидко втрачають вологу і мають більші показники випаровування в перші дні після зволоження. Водночас важкі суглинки довше утримують воду, але й випаровування з них у сухі періоди практично припиняється. Це створює складну динаміку, за якої випаровування в межах навіть одного господарства може відрізнятись у рази.

Окремо варто звернути увагу на роль мікрорельєфу. Наприклад, улоговини та зниження рельєфу частіше накопичують вологу, що сприяє довшому випаровуванню. Навпаки, опуклі форми рельєфу — гребені, виступи — мають менш стійкий рівень вологості, тож випаровування з них відбувається швидше, але недовго.

Усе це підкреслює, що випаровування як процес є дуже локалізованим і змінним у часі, і для його повноцінного розуміння недостатньо загальних кліматичних даних — необхідні польові спостереження, моделювання, вивчення рельєфу та типів землекористування.

Підсумовуючи, варто зазначити: контраст між випаровуванням з води та суші в межах Дністровського водосховища має не лише кількісне, а й якісне значення — він формує різні мікрокліматичні умови, впливає на агротехнічні рішення, розподіл вологи в ґрунті та збереження екологічної рівноваги прибережних територій.

4.4. Порівняння зменшення стоку Дністра та випаровування з водосховища

Зменшення стоку Дністра внаслідок впливу гідротехнічних споруд становить приблизно 0,9 км³ на рік. У той же час, втрати води з поверхні Дністровського водосховища внаслідок випаровування досягають 0,1–0,12 км³. Це означає, що випаровування відповідає приблизно 11–13 % загального обсягу зменшення стоку. Така частка є значною і вимагає врахування при плануванні управління водними ресурсами.

Показник	Значення
Зменшення стоку Дністра	0,9 км ³ /рік
Випаровування з поверхні водосховища	0,1–0,12 км ³ /рік
Частка випаровування від зменшення стоку	≈11–13 %

Оцінка водного балансу Дністровського водосховища вказує на важливість порівняльного аналізу між обсягами зменшення стоку та втратами води внаслідок випаровування. За даними гідрологічних спостережень, середньорічне зменшення стоку Дністра через регулювання та експлуатацію гідропоруд становить близько $0,9 \text{ км}^3$. Це значення охоплює не лише технологічні витрати води, а й сумарний вплив антропогенних і кліматичних факторів.

У той же час, за результатами багаторічного моніторингу, річні обсяги втрат води з поверхні водосховища через випаровування оцінюються у межах $100\text{--}120 \text{ млн м}^3$, тобто $0,1\text{--}0,12 \text{ км}^3$. Попри меншу величину у порівнянні зі зменшенням стоку, ця частка є суттєвою, оскільки становить приблизно $11\text{--}13 \%$ загального обсягу втрат.

ВИСНОВКИ

У четвертому розділі проведено всебічне дослідження процесів випаровування на прикладі Дністровського водосховища, що дозволило поглибити розуміння механізмів випаровування в умовах великих водних об'єктів України. Теоретична частина підтвердила, що випаровування є складним фізичним явищем, яке залежить від багатьох кліматичних, гідрологічних та географічних чинників. Було встановлено, що основними драйверами інтенсивності випаровування виступають температура води та повітря, вологість, швидкість вітру, а також розміри дзеркала води. Особливу увагу приділено методу Пенмана-Монтейта, як одному з найефективніших способів моделювання випаровування в гідрологічних умовах.

У ході аналізу особливостей випаровування з поверхні Дністровського водосховища виявлено, що в літній період втрати води через випаровування можуть досягати 3–4 мм на добу, що становить понад 100 мільйонів кубічних метрів води на рік. Такий рівень втрат набуває критичного значення у посушливі роки, коли зменшується надходження води, і водосховище починає зазнавати дефіциту води. Значення випаровування в цьому контексті набуває не лише гідрологічного, але й стратегічного значення — воно впливає на гідроенергетику, сільське господарство, водопостачання та екологічний стан нижньої течії Дністра.

Порівняльний аналіз інтенсивності випаровування між водною поверхнею та прилеглими сушами засвідчив, що найбільша випаровувальна здатність спостерігається саме над водою, що пояснюється її постійною доступністю вологи, високою теплоємністю та відкритістю до сонячного випромінювання. На ріллі, в лісах та урбанізованих територіях інтенсивність випаровування є нижчою і залежить від вологості ґрунту, рослинного покриву, антропогенних впливів та погодних умов. Виявлені контрасти випаровування також відіграють важливу роль у формуванні локального мікроклімату, що особливо помітно в прибережних зонах водосховища, де спостерігається підвищена вологість, зменшення добових коливань температури та частіше утворення туманів.

Встановлено, що зміна кліматичних умов, зокрема підвищення середньорічної температури, сприяє зростанню обсягів випаровування з водної поверхні. Це потребує оновлення методик розрахунку водного балансу та розробки адаптаційних заходів для мінімізації втрат. Особливу увагу слід приділити тому, що у разі активного випаровування й недостатнього притоку води, баланс водосховища може порушуватись, що матиме негативні наслідки для екосистем і господарської діяльності.

Проведені розрахунки на прикладі липня підтвердили реальність суттєвих втрат води протягом одного місяця — до 16 млн м³. Це свідчить про необхідність точного обліку випаровування при управлінні водними ресурсами та під час розробки сценаріїв гідротехнічної експлуатації. Узагальнюючи всі наведені факти, можна стверджувати, що процес випаровування на Дністровському водосховищі є надзвичайно важливою складовою як природного водного кругообігу, так і технічної експлуатації об'єкта. Врахування особливостей випаровування має бути інтегрованим елементом планування сталого розвитку водного господарства регіону.

У ході виконання цієї роботи було досліджено фізичну сутність процесу випаровування, його модифікації в умовах гірських місцевостей та зокрема в басейні Дністровського водосховища. Основні результати дослідження свідчать про таке:

1. Випаровування є складовою частиною гідрологічного циклу, яке відіграє ключову роль у регулюванні вологообміну між поверхнею Землі та атмосферою. Цей процес залежить від ряду факторів, зокрема температури, вологості, швидкості вітру та типу підстилаючої поверхні.
2. В гірських місцевостях випаровування має специфічні особливості через орографічну складність території, наявність лісів, різні типи ґрунтів та мікрокліматичні умови. Вирубка лісів призводить до змін у водному балансі через зниження інтерцепції та збільшення випаровування з ґрунту.

3. Випаровування з водної поверхні, особливо в межах великих водосховищ, таких як Дністровське, є одним з основних елементів водного балансу. За середньорічними оцінками, з поверхні водосховища випаровується близько 700–750 мм води, що еквівалентно втратам до 120 млн м³ на рік.

4. Порівняльний аналіз випаровування з різних типів поверхонь у басейні Дністра показав, що водна поверхня має найвищу випаровувальну здатність. Лісові ділянки та рілля втрачають вологу менш інтенсивно, проте ці втрати більш чутливі до наявності опадів та вологості ґрунтів.

5. Гідрологи з Молдови зафіксували зменшення середньорічного стоку Дністра на 0,9 км³ внаслідок експлуатації Дністровської ГЕС. Частину цих втрат можна пояснити саме випаровуванням з поверхні водосховища, особливо в умовах потепління клімату.

Отже, випаровування — це не лише природне фізичне явище, а й ключовий елемент управління водними ресурсами. Його облік є необхідним у сучасних умовах зміни клімату та інтенсивного використання водних об'єктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бучинський І.О., Волеваха М.М., Коржов О.О. Клімат Українських Карпат. – К.: Наук. думка, 1971. – 172 с.
2. Галік О.І. Метеорологічні прилади і методи спостережень. Практикум. – Рівне: НУВГП, 2008. – 134 с.
3. Калущий І.Ф., Олійник В.С. Стихійні явища в гірсько-лісових умовах Українських Карпат. – Львів: Камула, 2007. – 240 с.
4. Киналь О., Крогулець Е. Гідрокліматичні особливості зволоження територій. – Кам'янець-Подільський: ПП Мошинський В.С., 2009. – 108 с.
5. Керівництво з апікультурного потенціалу, кліматичних умов, якості повітря та ґрунту в басейні Чорного моря / Зуграву А. – Миколаїв, 2020. – 267 с.
6. Олійник В.С. Перерозподіл атмосферних опадів наметом гірських лісів Карпат // Науковий вісник НЛТУ України. – 2008. – Вип. 18.6. – С. 12–18.
7. Шпак І.С. Вплив лісу на водний баланс водозборів. – К.: Наук. думка, 1968. – 284 с.
8. Швець, О.О. Основи гідрології суші. – К.: Либідь, 2019. – 284 с.
9. Баженов, Л.Л. Метеорологія та кліматологія. – Львів: Афіша, 2018. – 336 с.
10. Опарін, С.М., Мосійчук, І.В. Фізична географія атмосфери. – Харків: Веста, 2017. – 212 с.
11. Кухаренко, В.М. Курс загальної гідрології. – Дніпро: Наука і освіта, 2020. – 305 с.
12. Гігієнічна характеристика атмосферного повітря / За ред. І.М. Трахтенберга. – К.: Здоров'я, 2021. – 240 с.
13. Олійник, В. С. (2008). Перерозподіл атмосферних опадів наметом гірських лісів Карпат. *Науковий вісник НЛТУ України*, 18(6), 12–18. Доступно: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2008/18_6/12_Olijnyk_18_6.pdf
14. Часковський, О. Г., Карабчук, Д. Ю., & Іванюк, А. П. (2019). Зміни лісового вкриття Українських Карпат (1984–2016). *Науковий вісник НЛТУ України*, 29(2), 9–14. <https://doi.org/10.15421/40290201researchgate.net>

15. Ковальчук, А. (2020). Гідрологічно-геоморфологічні процеси в Українських Карпатах. *Український гідроморфологічний вісник*, (4), 45–56. <https://dspace.nbuv.gov.ua/handle/.../73587> dspace.nbuv.gov.ua
16. Дуд, І. (2013). Вплив атмосферних опадів на ґрунтовий гідробаланс Карпат. *Екологія гірських регіонів*, 23(12), 101–110. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2013/23_12/121_Dud.pdf
17. Іринчик, М., & Петренко, С. (2014). Критерії оцінки гідрологічної ролі лісів Карпат. *Гідрологія та навколишнє середовище*, 4, 8–15. https://www.irbis-nbuv.gov.ua/.../PDF/glghge_2014_4_8.pdf [irbis-nbuv.gov.ua](https://www.irbis-nbuv.gov.ua)
18. Часковський, О. Г. та ін. (2019). Зміни лісового вкриття Українських Карпат за період 1984–2016. *Науковий вісник НЛТУ України*, 29(2), 9–14. <https://doi.org/10.15421/40290201> researchgate.net+1 nv.nltu.edu.ua+1
19. Державне агентство водних ресурсів України. (2024). Звіт про стратегічну екологічну оцінку басейну Дністра. Доступно: https://davr.gov.ua/fls18/pl24/Dnister_SEO.pdf
20. Держводагентство України. (2024). Презентація щодо модернізації моніторингу та захисту вод. https://davr.gov.ua/fls18/Prezentasia_2024_Gopchak.pdf davr.gov.ua
21. Міністерство захисту довкілля. (2024). Звіт про витрати держбюджету у сфері водного господарства. <https://mepr.gov.ua/.../Zvit-pro-provedennya-oglyadyu-vytrat...pdf> mepr.gov.ua
22. Дністровське БУВР. (2024). Річний звіт моніторингу поверхневих вод. <https://vodaif.gov.ua/wp-content/uploads/2025/01/rezultat-za-2024.pdf>
23. Укргідрометцентр. (2024). Щоденні гідрологічні бюлетені. Доступ: <http://meteo.gov.ua>
24. Інститут гідробіології НАН України. (2023). Дослідження Дністровського водосховища. <http://www.hydrobio.kiev.ua/>
25. Інститут водних проблем і меліорації НААН України. (2024). Наукові розробки. <https://iwpim.com.ua/>

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ТАБЛИЦЬ ТА РИСУНКІВ

26. Калущкий І.Ф. Вітровали на північно-східному макросхилі Українських Карпат: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.11. – Львів, 1998. – 21 с.
27. Zyablikova I. Vapourization in the Ukrainian Roztochya // Visnyk of the Lviv University. Series Geography. – 2014. – Vol. 44. – P. 134–141.
28. Швалагін І.В., Каблак Н.І. Моделювання вмісту водяної пари в атмосфері // Наук. записки Терноп. пед. ун-ту. Сер. Географія. – 1998. – №2(3). – С. 41–47.
29. Галік О.І. Метеорологічні спостереження: навч.-метод. посіб. – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2012. – 152 с.
30. Федасюк Д.В., Муха Т.О. Дослідження метрологічних характеристик випарників на основі гідростатичного зважування // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2010. – №59. – С. 45–52.
31. Penman H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass // Proc. of the Royal Society of London. Series A. – 1948. – Vol. 193(1032). – P. 120–145.
32. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. – Rome: FAO, 1998. – (FAO Irrigation and Drainage Paper; 56).