

**Наталія Миколаївна Кізілова,**

д. фіз.-мат. н, проф., професор кафедри прикладної математики,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна,  
e-mail: [n.kizilova@gmail.com](mailto:n.kizilova@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9981-7616>;

**Наталія Львівна Ричак,**

к. геогр. н., доцент, кафедра екології та неоекології,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
e-mail: [rychak@ukr.net](mailto:rychak@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-1620-3059>;

**Дмитро Сергійович Чебукін,**

магістр екології, кафедра екології та неоекології,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
e-mail: [impressio1989@gmail.com](mailto:impressio1989@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0633-3661>;

**Маргарита Володимирівна Лукієнко,**

магістр екології, кафедра екології та неоекології,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
e-mail: [lukienko.m.v@gmail.com](mailto:lukienko.m.v@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5527-950X>

## ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД У БЕЗДОЩОВИЙ ПЕРІОД В УМОВАХ МІСЬКОГО ВОДОЗБОРУ

*Актуальність дослідження:* Процеси зміни клімату вносять потужні корективи показників річкового стоку та водного балансу водного об'єкту. Одним із основних чинників формування стоку води річок є кліматичні умови. І на першому місці - величина суми атмосферних опадів, що складає норму річного кліматичного стоку. Для України суттєво збільшились періоди без дощів, а зимовий період став традиційно без снігового покриву. Причому, слід відмітити, що в Україні два десятиліття спостерігається тенденція зниження кількості опадів у зручні-січні. Це призводить до зміни базатних гідрологічних показників і до звичних, в умовах помірного клімату, гідрологічних режимів. При збільшенні тривалості бездощового періоду відбувається збільшення тривалості меженого періоду, як зимового так і літнього. Це викликає зріст підземного живлення річки. В результаті відбувається надходження у води річок концентрацій хлорид- і сульфат- іонів і підвищується загальна мінералізація. Зростаюча частка у живленні річок підземними водами сприяє виносу легкокорозивних солей. В умовах міського водозбору ситуація ускладнюється потраплянням забруднюючих речовин у водний об'єкт, насамперед, завислих речовин, не тільки у результаті змиття їх дощовим та талими водами, але й перенесенням силою вітру. Наслідки таких дій прогнозовані - ризики екологічного стану водного об'єкту. Тому визначення екологічної оцінки стану водних об'єктів в умовах міського водозбору у бездощовий період є питанням малодослідженим і актуальним. Методи дослідження – польовий відбір проб води та донних відкладів для надання екологічної оцінки водного об'єкту; порівняння отриманих результатів з аналогічними, які були отримані за дощові періоди та при впливі на стан водойму талих вод, у різні гідрологічні режими; системний аналіз, який дає змогу відслідковувати зв'язки, що утворилися між об'єктами; хімічний метод, методи порівняння і узагальнення. У водах р. Лопань у бездощовий період спостерігається перевищення ГДК амоній-іони, БСК-5, розчинений кисень, нітрити, сульфати, фосфати, цинк, клас якості води – добрий; у водах р. Уди – встановлено перевищення зазальної жорсткості, вміст нітратів і хлоридів. Клас якості води (І класу води, ІЗВ) - «дуже чиста». В донних відкладах було виявлено перевищення за цинком, плюмбумом та кадмієм.

**Ключові слова:** поверхневі води, урболандшафтна геосистема, якість води, екологічний моніторинг, бездощовий період.

**Н. Н. Кизилова, Н. Л. Рычак, Д. С. Чебукин, М. В. Лукиенко. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В БЕЗДОЖДЕВОЙ ПЕРИОД В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОГО ВОДОСБОРА.** Актуальность исследования: Процессы изменения климата вносят достаточно мощные коррективы показателей речного стока и водного баланса водного объекта. Одним из основных факторов формирования стока воды рек являются климатические условия. И на первом месте - величина суммы атмосферных осадков, что составляет норму годового климатического стока. Для Украины существенно увеличились периоды без дождей, а в зимнее время - традиционно без снежного покрова. Причем, следует отметить, что в Украине два десятилетия наблюдается тенденция снижения количества осадков в декабре-январе. Это приводит к изменению многих гидрологических показателей и к привычным, в условиях умеренного климата, гидрологических режимов. При увеличении продолжительности бездождевого периода происходит увеличение продолжительности межениого периода, как зимнего, так и летнего. Это вызывает рост подземного питания реки. В результате происходит поступление в воды рек концентраций хлорид- и сульфат- ионов и повышается общая минерализация. Растущая доля в питании рек подземными водами способствует выносу легкорастворимых солей. В условиях городского водосбора ситуация осложняется попаданием загрязняющих веществ в водный объект, прежде всего, взвешенных веществ, не только в результате смыва их дождевыми и тальными водами, но и переносом с ветром. Последствия таких действий прогнозируемые – это риски экологического состояния водного объекта. Поэтому определение экологической оценки состояния водных объектов в условиях городского водосбора в бездождевой период является вопросом малоисследованным и актуальным. Методы исследования – полевой отбор проб воды и донных отложений для предоставления экологической оценки водного объекта; сравнение полученных результатов с аналогичными, полученными за дождевые периоды и периоды таяния снега в разные гидрологические режими; системный анализ, который позволяет отслеживать связи, образовавшиеся между объектами; химический метод, методы сравнения и обобщения. В водах р. Лопань в бездождевой период наблюдается превышение ПДК аммоний-ионы, БСК-5, растворенный кислород, нитриты, сульфаты, фосфаты, цинк, класс качества воды - хороший;

в водах р. Уды - установлено превышение общей жесткости, содержание нитратов и хлоридов. Класс качества воды (I класса воды, ИОП) - «очень чистая». В донных отложениях было обнаружено превышение по цинку, свинцу и кадмию.

**Ключевые слова:** поверхностные воды, урбололандшафтная геосистема, качество воды, экологический мониторинг, бездождевой период.

**Постановка проблеми.** Аналіз якості поверхневих вод (ПВ) річок України вказує на повторюваність екологічних проблем та ситуацій: відбувається кризове зниження самовідновлювальних властивостей річок, їх потенціалу, виявлена тенденція забруднення водних об'єктів шляхом потрапляння поверхневих вод атмосферного походження від населених пунктів [14, 29-31, 36, 37]. Зміна клімату вносить свої корективи. За останні десятиліття температура повітря зросла, кількість опадів і їх інтенсивність змінилися, бездошові періоди розширили свої часові і просторові рамки. За даними різних прогнозів зміни клімату передбачають у більшості районів підвищення температури на 1,5-3,5° С та зменшення опадів на 10-20% до 2050 р. [6]. Вже в 2030-х рр. міська територія, на яку вплинуть зміни клімату, складе ~5–20% загальної міської площі [5].

Перенесення забруднень в бездошовий період здійснюються за рахунок сильного вітру, ерозії ґрунтів, специфічних міських забруднень. Отже, проблема дослідження зумовлена тим, що забруднення відбувається не лише за рахунок поверхневого стоку водами атмосферного походження, але й за рахунок інших факторів у бездошовий період. Актуальність полягає в тому, щоб дослідити зміну якості поверхневих вод в бездошовий період в умовах міського водозбору.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Потреба у питній воді залежить від кількості жителів, метеорологічних та кліматологічних умов, наявності та ціни на питну воду, екологічної політики, яка спрямована на помірне вживання питної води. Потреби у технічній воді залежать від присутності у регіоні промислових виробництв, сільськогосподарських площин і зелених насаджень міста, які потребують зрошування, а також потреби безпосередньо інфраструктури міста і населення. Таким чином, їх можна розділити на промислові, сільськогосподарські і господарсько-питні

Згідно з даними<sup>1</sup> Всесвітнього Інституту Ресурсів (World Resources Institute), за останні 50 років використання води на планеті зросло на 600%. Сільське господарство та промисловість вилучають більшість прісних вод у світі (70% та 19% відповідно), але й попит домогосподарств стрімко зростає, так що в багатьох країнах і регіонах попит у воді значно перевищує локальні можливості. Для оцінки стану водопостачання використовують показники водного ризику, такі

як базовий водний стрес (БВС, Basic Water Stress), ризик посухи (РП, Drought Risk) і ризик прибережної повені (РПП, Riverine Flood Risk) [11].

БВС – це відношення загального водозбору до наявних джерел поновлюваної води. Забір води включає побутове, промислове, зрошувальне, споживче та неспоживче використання. Доступні поновлювані джерела води включають запаси ПВ і ґрунтових вод (ГВ) та враховують вплив великих дамб і споживачів води, які споживаються вище за течією. Вищі значення БВС вказують на більшу нестачу води та проблеми з водопостачанням. РП – це складний показник, який обчислюється з урахуванням ймовірності посухи, чисельності населення, запасів води, а також вразливості населення та водних ресурсів до несприятливих наслідків посухи. РПП дорівнює відсотку населення, який, як очікується, постраждає від повені прибережних територій в середньому за рік, враховуючи існуючі стандарти захисту від паводків.

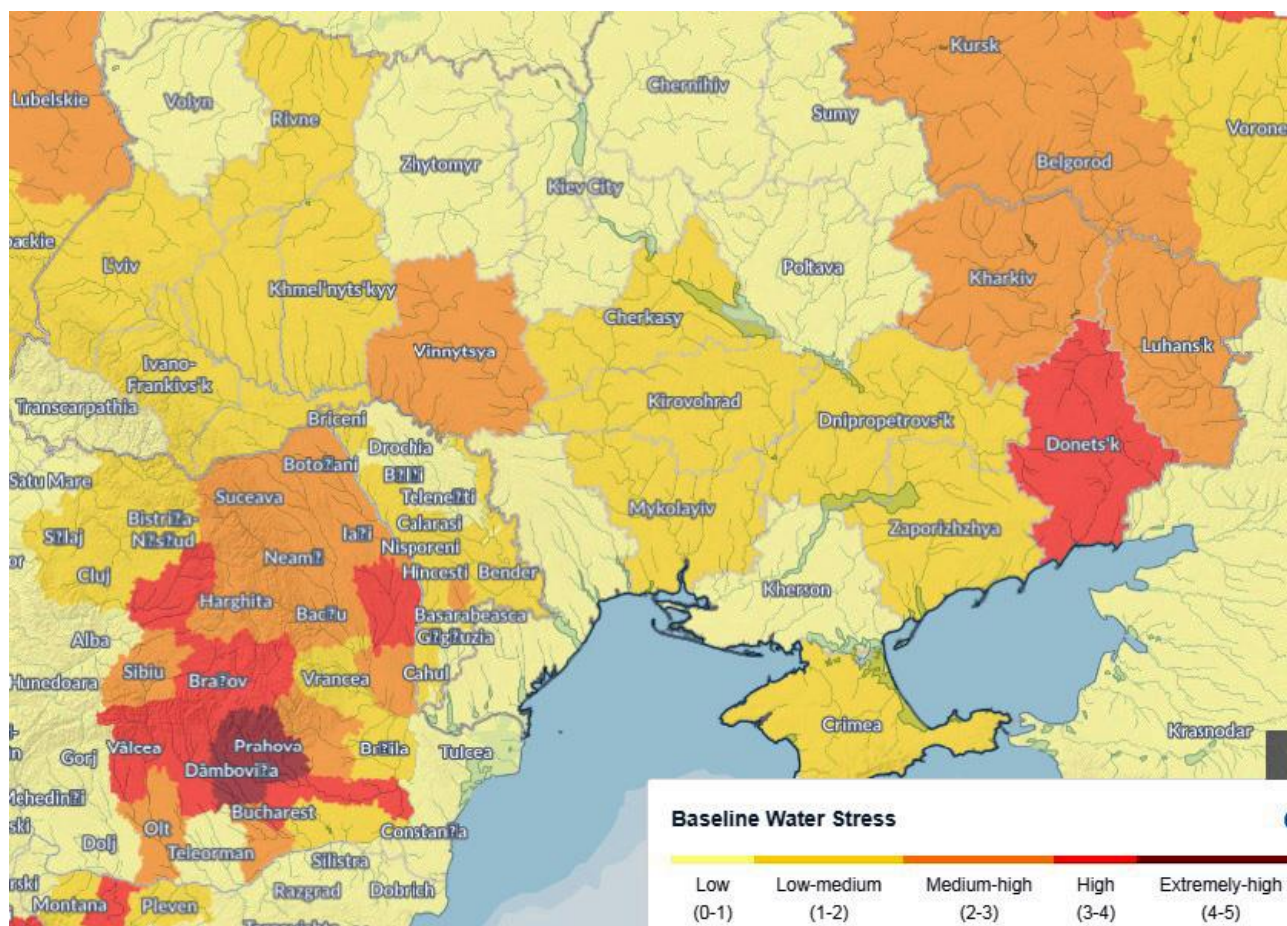
Згідно з даними за 2013 р., на території України є регіони з досить високими коефіцієнтами БВС (рис. 1а), РП (рис.1б) і РПП (рис. 1в). Видно, що Харківська область має досить високий показник БСВ=3-4 за 5-бальною шкалою, що говорить про проблеми з запасами води, очищенням та водопостачанням у порівнянні з іншими областями, крім Донецької, Луганської і Вінницької. Індекс РП має найбільші значення (РП=0.8-1) для всіх областей України, крім Дніпропетровської, Київської та західних областей України (рис. 1б), де рівень опадів залишається достатньо високим навіть в останні роки, коли наслідки потеплення клімату вже впливають на велику кількість країн світу. Індекс РПП для Харківської області має помірні значення РПП=2-3 за 5-бальною шкалою на відміну від областей, які розташовані на території водозбору р. Дніпро та низки інших (рис. 1в). Індeksi БСВ за різними статтями водопостачання на території України згідно з доступними даними відкритого ресурсу<sup>2</sup> за 2013 р. наведені на рис. 2.

Таким чином, Харківська область є третя в Україні за індексом водного стресу, причому найвищі значення пов'язані з потребами води для потреб населення і міських служб (3.42), а проблеми промисловості та сільського господарства мають близькі значення БВС (2.79 і 2.79 відповідно). У порівнянні з іншими країнами Європи (Італія, Іспанія, Греція, Туреччина) Укра-

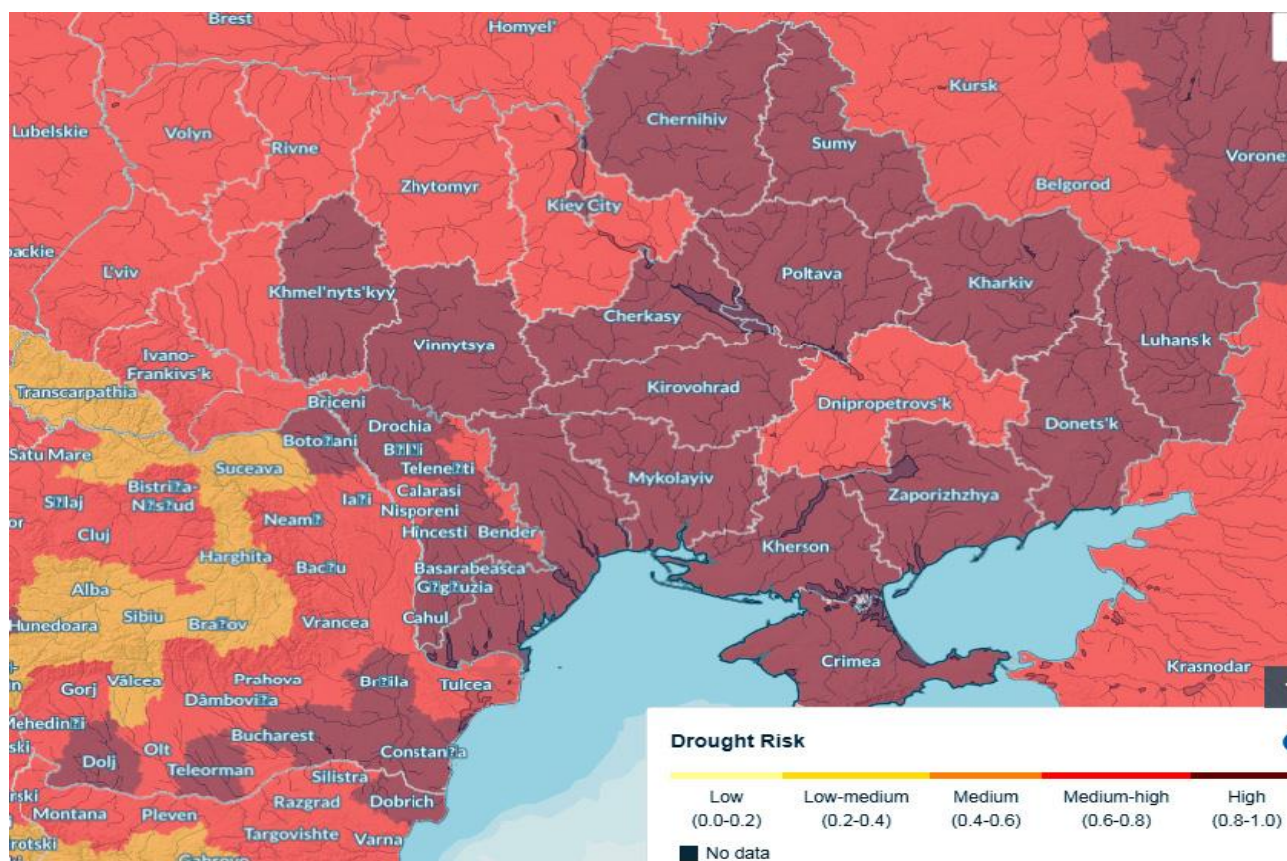
<sup>1</sup> <https://www.wri.org/>

<sup>2</sup> [www.wri.org](http://www.wri.org)





a



б



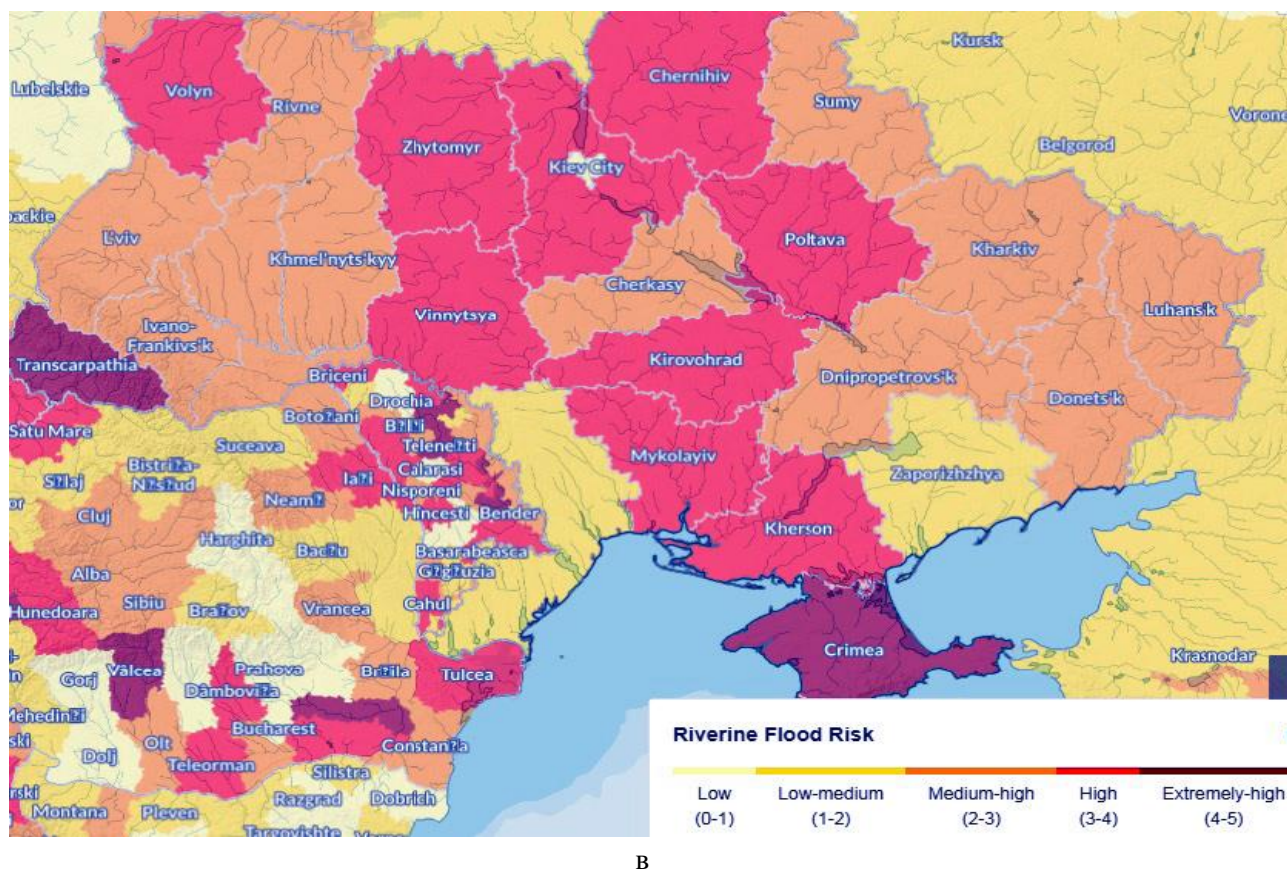


Рис.1. Схема розподілення коефіцієнтів БВС (а), РП (б) і РПП (в) між областями України з даними за 2013 р.<sup>3</sup>

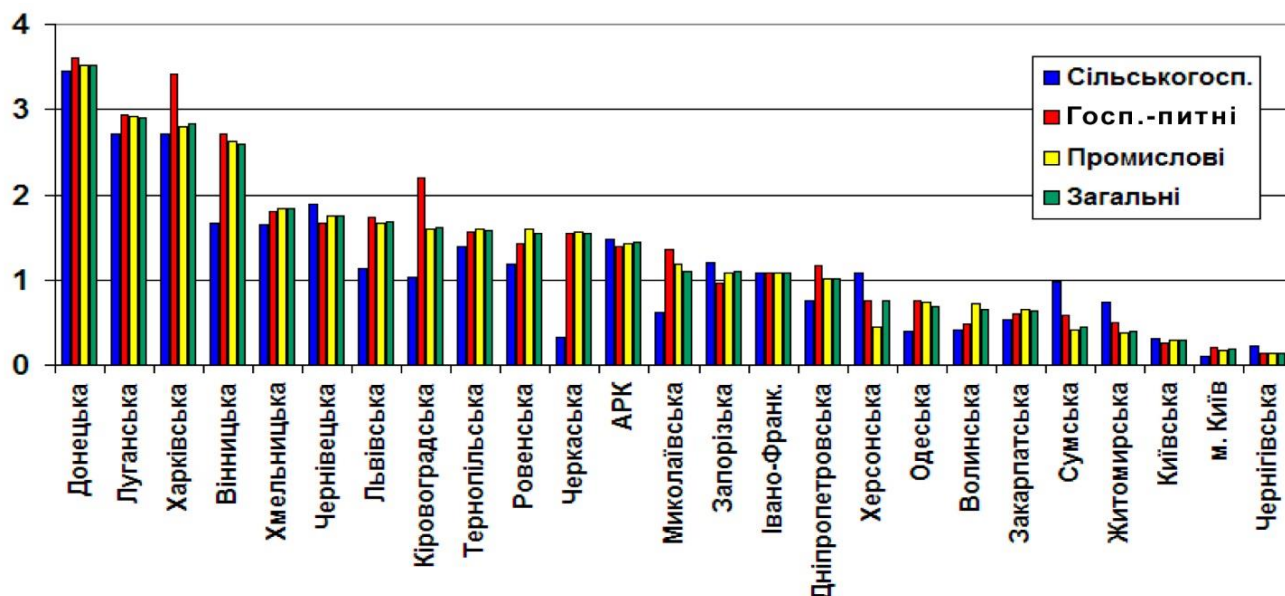


Рис.2. Індеси БВС по областям України і видам водокористання станом на 2013 р. (діаграму побудовано з використанням відкритого софту<sup>3</sup>)

<sup>3</sup> <https://www.wri.org/applications/aqueduct/country-rankings/?country=UKR>

їна має помірні значення БВС і РПП, але набагато вищі значення РП. Це означає, що саме Харківська та деякі інші області (рис.16) є найбільш уразливими під час подальших змін клімату стосовно підвищення середньорічних температур та сухості повітря, зменшення кількості опадів, висихання рослин на степових територіях, забруднення ПВ, ГВ і ґрунтів.

Безпечне водопостачання має життєво важливе значення для здоров'я населення та економіки. Як посухи, так і повені негативно впливають на кількість і якість стан ПВ і ГВ у регіоні. Забруднюючі речовини, що накопичуються на поверхні міської території, частково утворюються частинками пилу, сміттям, яке є природним або штучно створеним людиною, викидами транспортних засобів, а також поверхневих вод атмосферного походження.

Забруднюючі речовини, які потрапляють у воду, можуть бути розчинні у воді або прикріплені до осадів, що негативно позначається на якості ПВ. Протягом посушливих періодів між дощами навантаження та накопичення забруднюючих речовин на поверхні міського водозбору теж відбуваються, а накопичена частина забруднювачів поступово деградує. Осадження забруднень є неоднорідним, залежить від клімату, ландшафту місцевості, землекористування та людської діяльності. Механізми змиви залежать від місця розташування, інтенсивності опадів, нахилу, швидкості потоку, інтенсивності руху транспортних засобів тощо.

Поверхневі води атмосферного походження переносять у місцеві води сміття, паливо та інші токсичні хімічні речовини від транспортних засобів, добрива, бактерії, відходи від домашніх господарств, змиви забруднень з дахів, фарби на основі солей важких металів, анодованих та водовідштовхуючих поверхонь і т.п. Це забруднення загрожує чистій питній воді, здоров'ю населення і завдає шкоду довкіллю. У міських ландшафтах закриті поверхні, такі як тротуар, автодороги, тощо, збільшують зливові потоки, оскільки менше дощової води всмоктується в землю. Для оптимізації каналізаційних мереж використовуються методи математичного моделювання на детальних оцифрованих топографічних картах [1, 14].

**Міждисциплінарні дослідження задач переносу забруднень і підвищення якості води.** З вищезгаданого, постає теза, що проблеми постачання води та прийняття своєчасних заходів щодо поповнення її запасів, є складними і вирішуються в сучасній світовій науці шляхом спільної праці уряду з екологами, гідрологами, економістами, біо- і геофізиками, а також вимагають використання статистичних методів обробки і

аналізу численних даних вимірювань і розробки відповідних математичних моделей. Історично перші математичні моделі якості річкових вод користувалися методами лінійного [10,17] і динамічного програмування [15]. Сучасна потужна комп'ютерна техніка дозволяє розв'язувати складні задачі переносу багатокомпонентного потоку у відкритих руслах та пористих ґрунтах [3, 7-9, 18, 29-32, 36]. Особлива увага приділяється розробці багатосарових геоінформаційних систем, які містять базу «великих даних» геофізичної, кліматичної, екологічної, економічної і т.д. інформації, засоби її статистичної обробки і аналізу, математичні моделі для розрахунків параметрів переносу і накопичення забруднень і якості води, перевірки гіпотез і прийняття рішень, засоби 4D-візуалізації інформації (в просторі і за часом) та ін. [30-32]. Останнім часом для розв'язання задач переносу забруднень, підвищення чистоти води, ґрунту і повітря також використовуються теорія ігор [2], теорія графів [13], генетичні алгоритми, стохастичне програмування [4] та штучний інтелект [12].

Загальної формули для прогнозування попиту на питну воду не існує. Конкретні постачальники питної води, як правило, роблять прогнози на основі власного досвіду та ретроспективної інформації про попит на воду у своєму регіоні. Моделювання завантаження та скидання забруднюючих речовин у стічні води досі є дуже складною задачею. Вимірювання розповсюдження і накопичення забруднюючих речовин були покладені в основу емпіричних рівнянь, що представляють процеси завантаження та зливу забруднених вод, але на практиці рівень доступної інформації та складність процесів, що розглядаються, часто роблять ці моделі неробочими [11].

Найчастіше приймається проста гіпотеза накопичення забруднюючої речовини  $P$  з постійною масовою швидкістю  $m_p = \text{const}$  (кг/га/доба). Припускається, що ця величина може бути функцією координат  $m_p(x, y, z)$  і змінюватися залежно від типу ґрунту, землекористування, і т.п., хоч насправді  $m_p$  в кожній точці поверхні буде також функцією часу в залежності від насиченості ґрунту, наявності деградації тощо. Зі статистичної точки зору, часовий ряд навантажень може бути створений з одного або декількох розподілів ймовірностей спостережуваних навантажень, коли, наприклад, завантаження відрізняються у вихідні і робочі, в залежності від погодних умов та ін. Оскільки маси забруднюючих речовин накопичуються протягом сухого періоду, це також може впливати на значення  $m_p$ , приймають гіпотезу деградації накопиченої маси  $M_p$  речовини  $P$  з постійною швидкістю, так що

$$dM_p/dt = m_p - k \cdot M_p, \quad (1)$$

що відповідає експоненціальному зменшенню накопиченої маси забруднюючої речовини за рахунок деградації у вигляді

$$M_p(t) = M_p(0) \cdot e^{-kt} + (1 - e^{-kt}) \cdot m_p/k, \quad (2)$$

де  $M_p(0)$  – значення  $M_p$  на поверхні водозбору на початку сухого періоду ( $t=0$ ).

Таким чином, згідно з (2), у посушливий період з часом ( $t \rightarrow \infty$ ) маємо граничне накопичення  $M_p(\infty) = m_p/k$ , а якщо розпаду немає, то  $M_p(t) = M_p(0) + m_p t$  і граничне накопичення нескінченне.

Поверхневі води атмосферного походження важливі не тільки самі по собі, але й тому, що деякі інші забруднювачі можуть прикріплятися до них. Осадові відкладення, зазвичай, визначаються величиною середнього діаметру  $\langle d \rangle$  і моделюється як мінімум дві фракції осаду: одна груба речовина з високою щільністю (пісок) і одна дрібнодисперсна (органічні забруднення). Прийнято вважати, що у кожній з фракцій кожного класу розміру є встановлена  $n$  - кількість частинок забруднювача з масою частки які можуть до нього приєднатися. Тоді відношення загальної маси забруднювача  $M_p$  до маси осаду (кг/кг) є коефіцієнт потенції забруднювача в осаді.

Швидкість змиву забруднюючих речовин залежить від коефіцієнта ерозії  $\alpha_p$  і кількості  $M_p$  забруднювача  $P$ . Значення  $\alpha_p$  залежать від типу забруднювача, виду покриву та рельєфу конкретної частини басейну або осушуваної території. Вони можуть бути визначені на основі вимірних поверхневих навантажень маси забруднюючих речовин, що містяться в атмосферних опадах та стоках осадів у водозбірних басейнах, що нас цікавить. Оскільки отримати такі дані важко або, принаймні, достатньо вартісно, їх використання для чисельних розрахунків засновано на експериментах у лабораторіях.

Протягом дощового періоду забруднювачі видаляються із території водозбору, кількість існуючих забруднюючих речовин зменшується, отже, швидкість скидання забруднюючих речовин зменшується, навіть, при тому ж стоці. Коли відбувається стік, у ньому може міститися частка присутнього навантаження, яка буде залежати від ступеня стоку. Якщо частина поверхневого навантаження забруднювача прикріплена до осадів, його стік буде залежати від кількості стоку осаду, що, в свою чергу, залежить від кількості та швидкості поверхневого стоку води, так що часткова доля  $f_p(t)$  забруднювача  $P$  у стоці з інтенсивністю  $U(t)$  буде:

$$f_p(t) = \alpha_p \cdot U(t) / (1 + \alpha_p \cdot U(t)). \quad (3)$$

Масовий баланс навантажень забруднювачів визначає загальну накопичену кількість  $M_p$ , так що замість (2) можна записати з урахуванням (3)

$$M_p(t+1) = m_p + (1 - f_p(t)) \cdot e^{-k} \cdot M_p(t), \quad (4)$$

де крок  $t$  відповідає дискретній шкалі часу (1 день).

Загальна маса забруднювача  $P$  у стоці також повинна включати відповідні прикріплені фракції (коефіцієнти потенції), якщо такі є, для кожного модельованого класу розміру осаду. По мірі проходження осадів по системі, осади з різних джерел змішуються між собою і тому концентрації зв'язаних забруднювачів протягом моделювання змінюються за часом. Результати розрахунків за (1)-(3) можуть бути представлені як розподілення за часом і координатами масових концентрацій осаду, розчинених забруднюючих речовин та забруднювачів, які зв'язані з кожною фракцією осаду.

Математичні моделі дозволяють виявляти джерела забруднюючих речовин шляхом аналізу результатів лабораторних визначень інгредієнтів в пробах річкової води вздовж русла і розрахунків на математичній моделі [34], а також розв'язувати задачі багатокритеріальної оптимізації транспорту забруднень в річкових системах на заданому ландшафті [16].

**Моніторинг забруднення річкових вод на території України.** За проведеними раніше дослідженнями (2013-2020 рр.) стан стічних вод атмосферного походження, що формується на території міського водозбору р. Лопань характеризується як: прозорість 26/7 (у см, чисельник – це є максимальне значення, а знаменник - мінімальне), присутні плаваючі домішки, рН в інтервалі 8.2/4.3, завислі речовини 210/100 мг/дм<sup>3</sup>, сухий залишок 706/340 мг/дм<sup>3</sup>, фосфати 0.2/0.1 мг/дм<sup>3</sup>, нітриту 0.12/0.02 мг/дм<sup>3</sup>, хлориди 11.2/8 мг/дм<sup>3</sup>, азотовмісні речовини 1.5/0.35 мг/дм<sup>3</sup>, нафтопродукти 0.45/0.1 мг/дм<sup>3</sup>, [19, 33, 35].

В динаміці (2013-2020 рр.) досліджувався вміст важких металів [20, 21, 25]. Аналіз результатів показав, що у поверхневих водах атмосферного походження, які формуються на території урболандшафтною басейнової геосистеми р. Лопань, спостерігається суттєве збільшення вмісту феруму, плюмбуму та купруму. Потрапляння їх у поверхневі води р. Лопань призводить до погіршення якості води: збільшується вміст цинку, ніколу (нікелю), кадмію, мангану, феруму а перевищують ГДК р.г. вміст купруму у 2.5 – 3 рази, плюмбуму та феруму - у 1.5 рази. Сумарне забруднення важкими металами вод р. Лопань у відношенні без впливу поверхневого стоку з міського водозбору та з впливом - як 1:3.

Звичайно, таке забруднення впливає і на якість донних відкладів. Встановлено, що: найбільший вміст важких металів спостерігається у мулистих відкладах, максимальні концентрації характерні для феруму та мангану, а незначні –

для кадмію; вміст інших металів майже на однаковому рівні. При збільшенні органічної речовини вміст важких металів також збільшується. Важкі метали за виключенням феруму у донних відкладах знаходяться у вигляді нерозчинних сполук [21]. Були розраховані коефіцієнти донної акумуляції важких металів. Результати вказують на забруднення екосистеми та накопичення основної маси ΣMr забруднюючих речовин. Особливої уваги і моніторингу у поверхневих водах і донних відкладах вимагає ферум загальний, Zn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> [20].

Згідно даним вимірювань останніх років, такий стан поверхневих вод атмосферного походження сформувався в умовах урболандшафтною геосистеми басейну р. Лопань.

**Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми.** Таким чином, Харківська область має дуже великий індекс ризику посухи при середніх (але недостатньо низьких!) значеннях коефіцієнтів ризику повені та базового водного стресу. Вимірювання 2013-2020 рр. якості річкових вод басейну р. Лопань показали достатньо великий вміст важких металів та низки інших забруднень. Це означає, що за умовами поступового потепління клімату і зниженню кількості опадів накопичення забруднень буде зростати, що приведе до ще вищих показників БВС, РП і РПП. Аналіз сучасної літератури показує, що процеси переносу і накопичення забруднень в річкових водах, ПВ, ГВ, стічних водах у взаємозв'язку з кліматичними, погодними, економічними умовами та ін. факторами може бути проаналізований за допомогою математичних методів. Математичні моделі різних рівнів складності широко використовуються на прикладах різних ландшафтів, у тому числі в умовах великого міста, в той час як для урболандшафтних геосистем України вони використовуються рідко у зв'язку з відсутністю даних. В попередніх працях автори розробили інформаційну систему моніторингу стану якості води [31, 32]. В даній роботі проводиться вимірювання і аналіз даних для подальшого використання в рамках нових математичних моделей, розроблених саме для урболандшафтною геосистеми басейну р. Лопань-Харків-Уди.

**Формулювання мети статті.** Мета дослідження: надати екологічну оцінку стану поверхневих вод в умовах міського водозбору у бездошовий період на прикладі басейну р. Уди для подальшого використання в математичній моделі для оптимізації стану якості води у водотоці та покращення виконання її екологічних функцій.

**Методика і методи дослідження.** У бездошовий період були відібрані проби води у р. Лопань та р. Уди: у період межені та повені (2018 – 2019 рр.) та проби донних відкладів (2019 р.)

Для цілісності експерименту проби води відбирали у місцях попереднього відбору в роках 2003-2017. Визначено клас якості води та надана екологічна оцінка якості поверхневих вод [27]. Для донних відкладів було здійснено розрахунок сумарного показника забруднення за методикою Шарова А. Ю [38]. Коефіцієнт донної акумуляції було розраховано а методикою Хокасана А. Ю., 1980 р. [25].

Відбір проб води здійснювався згідно вимог ДСТУ ISO 5667-6:2009 [28]. Лабораторно-аналітичні дослідження проводилися у навчально-дослідницькій лабораторії аналітичних екологічних досліджень навчально-наукового інституту екології Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Каламутність, азотовмісні сполуки визначалися колориметричним методом згідно ДСТУ [22]. За допомогою електротричного методу визначалися рН та електропровідність [23]. Для визначення хлоридів, загальної лужності та окиснюваності було використано метод титрування [22, 23].

Атомно-абсорбційним методом з електротермічною атомізацією з використанням атомно-абсорбційного спектрометра модифікації МГА-915МД були отримані дані по специфічних показниках токсичної дії (Fe, Cu, Zn, Pb, Cd, Mn, Cr, Ni, Co) за ISO 8288. «Визначення кобальту, нікелю, міді, цинку, кадмію і свинцю». Градувальну характеристику встановлювали з використанням градувальних розчинів, які були отримані шляхом розведення стандартних зразків складу водних розчинів елементів [39].

Лабораторні дослідження проведено у відповідності з нормами для рибогосподарських водоймів (далі – ГДК р.г.) та санітарними нормами охорони поверхневих вод господарчопитного і культурно-побутового водокористування від забруднення [39]. Екологічну оцінку якості води здійснювали згідно з «Методикою екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями»,

**Результати вимірювань. Аналіз якості поверхневих вод та донних відкладів р. Лопань.** Аналіз води за хімічними показниками було проведено з вересня по грудень 2019 року. Точки відбору проб показані на рис. 3, а безрозмірні значення, нормовані на величину нормативного значення – на рис. 4.

За показниками важких металів спостерігається перевищення ГДК р.г. цинку у воді. Показник рН не перевищує норматив у 6.5-8.5. Показники прозорості та мутності також знаходяться у межах допустимих значень. Мінералізація води р. Лопань у нормі, перевищення вмісту солей не спостерігається. За показником жорсткості вода відповідає класу – жорстка.



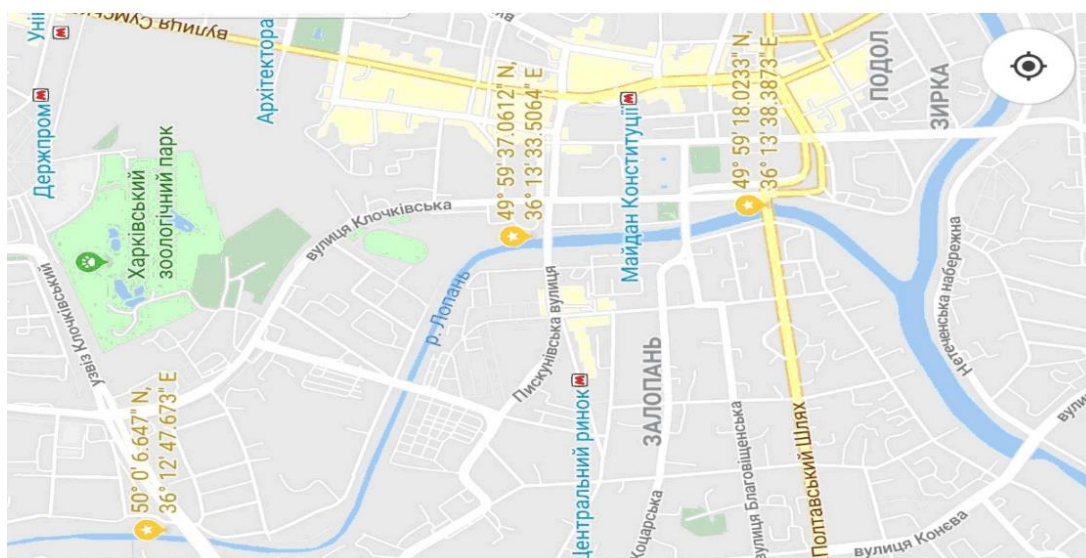


Рис. 3. Місця розташування точок відбору проб

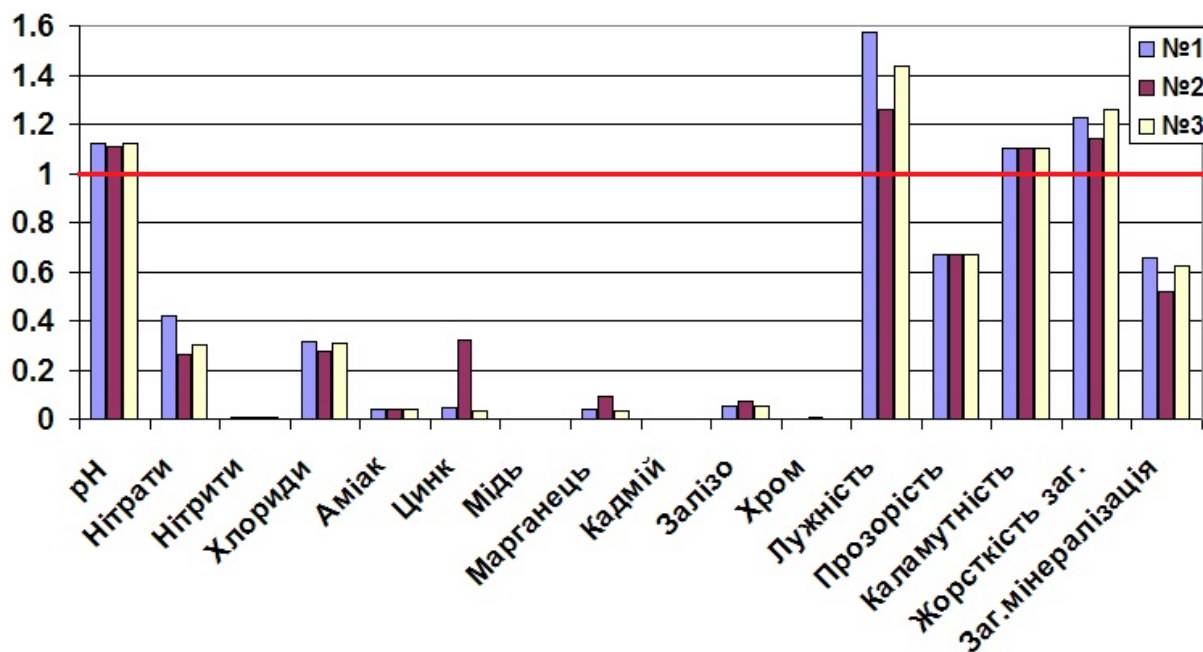


Рис. 4. Безрозмірні значення вимірних параметрів проб №1-3; червона лінія позначає ГДК

Формування якості води у водних об'єктах в значній мірі залежить від співвідношення процесів продукції і деструкції органічної речовини, які постійно відбуваються у водних екосистемах. Саме ці внутрішньоводоймні процеси є тими ключовими чинниками, які визначають якість природних вод, зокрема за трофо-сапробіологічними (еколого-санітарними) показниками: фосфор, розчинений кисень, завислі речовини та інші. Дані за усіма показниками з вересня по грудень 2019 наведені на рис. 5а. За отриманими даними спостерігається перевищення ГДК у кожному місяці за такими речовинами: амоній-іони, БСК-5, нітрити, розчинений кисень, сульфати, фосфати. На діаграмі можна простежити сезонні коливання концентрацій забруднень, пов'язані з кліматичними факторами. Статисти-

чний аналіз даних показав наявність кореляцій між вмістом завислих речовин та деякими з вимірюваних параметрів (рис. 5б). Коефіцієнт детермінації  $R^2 > 0.8$  відповідає статистично значущим кореляціям, а  $0.8 > R^2 > 0.5$  – вірогідним. Незначущі кореляції на рис.5б не наведені.

Для розрахунків загального екологічного індексу виміряні результати були доповнені даними щодо забруднення р. Лопань в межах міських ландшафтів м. Харків, отриманими Регіональним офісом водних ресурсів у Харківській області [26].

Оцінки індексу ГДК(ОБУВ) дають значення 1.86 і 2.9 відповідно. Таким чином, у досліджуваній період значної кількості забруднювачів з поверхневим стоком до р. Лопань не потрапляло і клас якості води можна оцінити як добрий.



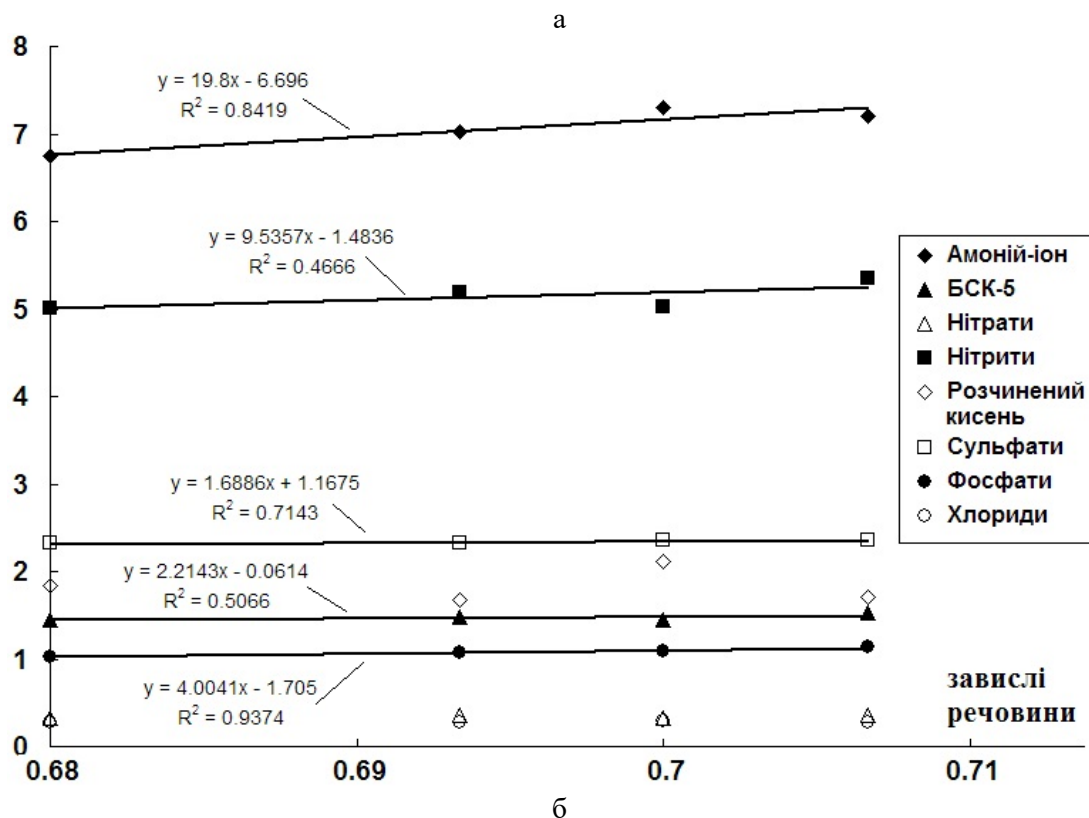
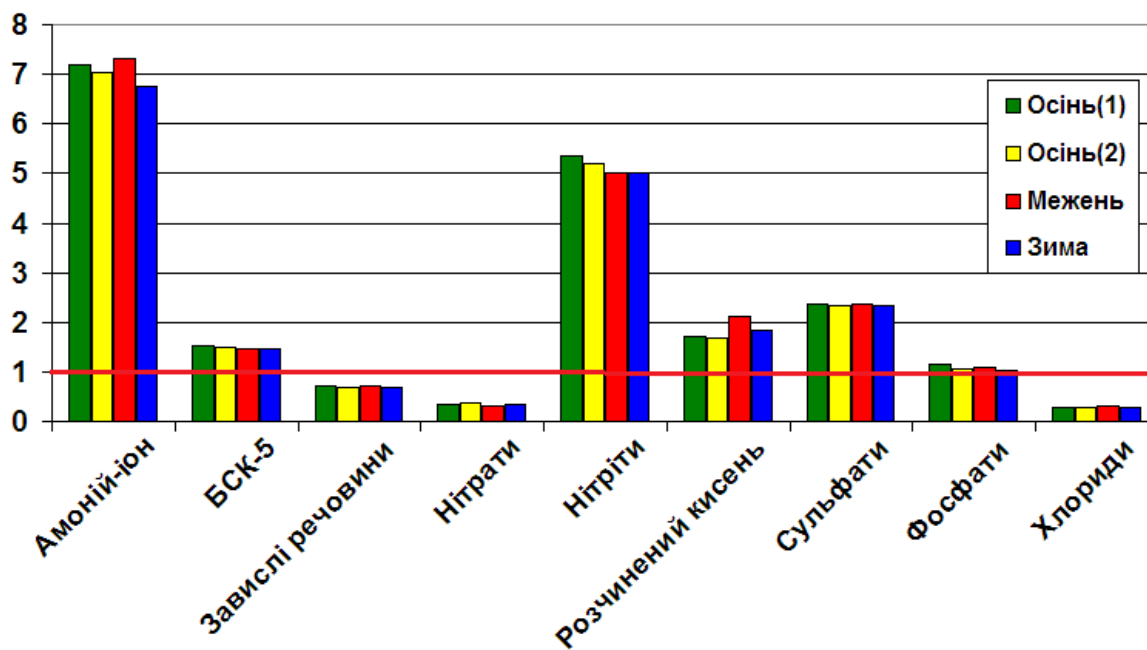


Рис. 5. Вміст деяких речовин в пробах води з р. Лопань в різні сезони ((а), червона лінія позначає рівень ГДК р.г.); значущі кореляції з місткістю завислих речовин (б)

**Результати вимірювань. Аналіз якості поверхневих вод та донних відкладів р. Уди.** Перший відбір проб був здійснений у період повені 15.03.2019 р. та проводився у локаціях №1-5 (рис. 6). Другий відбір води був проведений в період осінньої межени в 16.09.2019 р. Третій відбір проб води і проб донних відкладів проводився в період осінньої межени 13.11.19 р. Результати вимірювань, які були отримані в ході лабораторних досліджень, наведені в табл. 3, 4, 5,

6 відповідно.

Таким чином, всі показники не перевищують значень ГДЗ, індекс забруднення води в пробах №1-5 в період повені, склав 0.01-0.12, так що вода в р. Уди в період повені відповідала I класу якості. В пробах №3-5 виявлено перевищення ГДЗ в пробі 3 по нітратам. Всі інші досліджувані елементи та сполуки варіюють в рамках допустимих значень. Появлення нітратів можна пояснити тим, що при використанні нітритів в якості

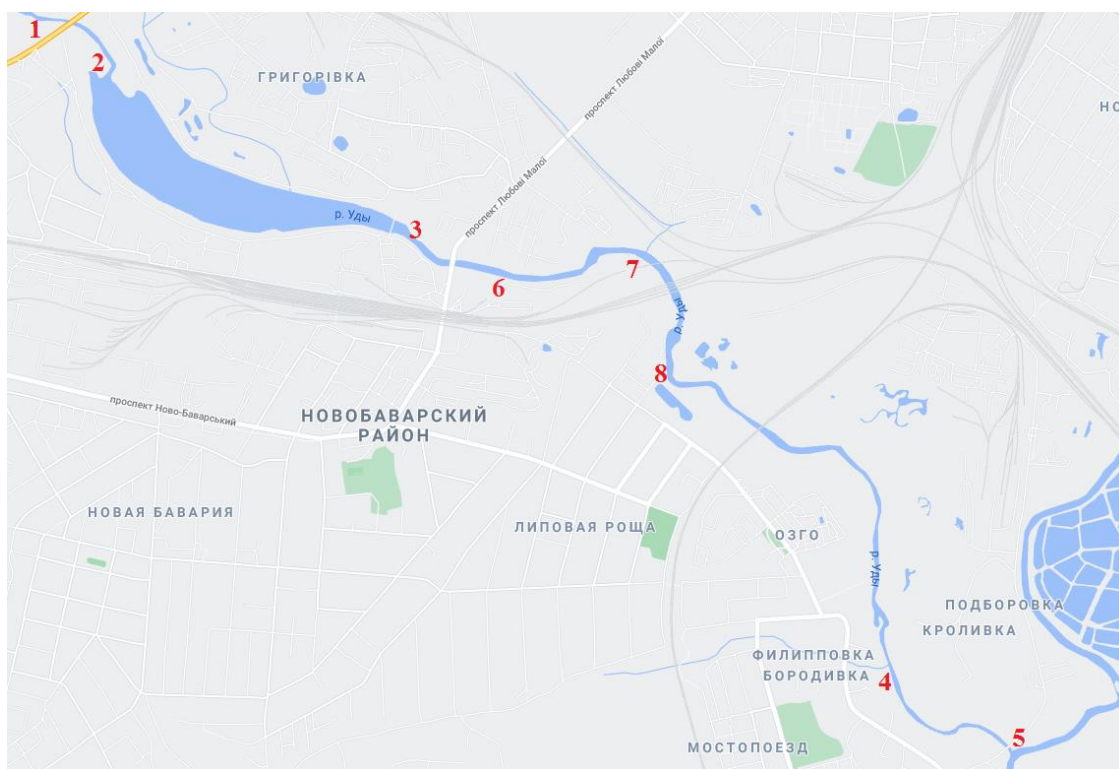


Рис. 6. Місця відбору проб води по р. Уди

інгібіторів корозії у водопідготовці технологічної води, вони потрапляють зі скидами стічних ПВ. Зазвичай нітрати знаходяться у ПВ в розчинній формі. Надмірний вміст можна пояснити процесом розкладу органічних речовин за умов повільнішого окиснення, а також тим, що період осінньої межени мав підвищену температуру, що і викликало активацію хімічних процесів і підвищення концентрації нітритів у водному об'єкті. Індекс забруднення води в пробах №3-5 період склав 0.17-0.28, тобто вода відповідала I класу якості.

Для подальшого дослідження було обрано чотири точки, які за попередніми дослідженнями є одними з найбільш забруднених, так як поблизу розташовані промислові та господарські площадки, а також недалеко проходить залізниця (рис. 6).

Встановлено, що всі проби води мають перевищення жорсткості загальної ( $> 7.0$ ). В пробах №6,8 – перевищення вмісту хлоридів; в пробах №3,7 вміст хлоридів близько до ГДЗ. Виявлення надмірного вмісту хлоридів являється показником того, що забруднення води відбувається промисловими стічними водами біля локації точок відбору проб. Індекс забруднення води склав 0.15-0.26. Це вказує, що навіть на найбільш забруднених ділянках вода в річці Уди відноситься до I класу якості.

Для порівняння безрозмірні значення рН, хімічних елементів і сполук проб річкової води, представлені графічно на рис. 7а-в.

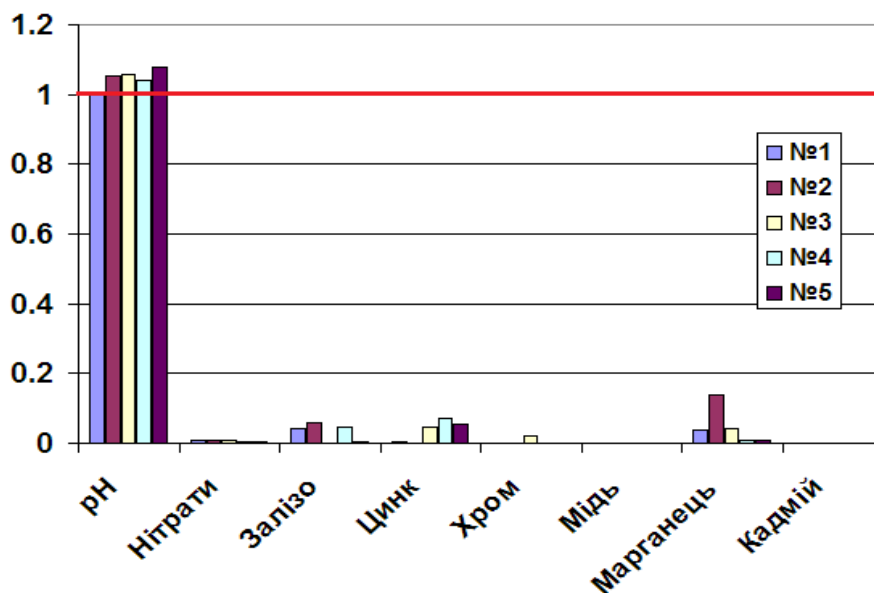
Крім того, на ділянці №3 в період осінньої межени 13.11.2019 р. також були відібрані і досліджені донні відклади. Перевищення вмісту у пробі донних відкладів були виявлені за елементами: цинк, плумбум та кадмій. Наслідком надмірного вмісту показників є поверхневі стічні води. Донні відклади є своєрідним «підводним ґрунтом», який впливає на хімічний склад води, так як є вторинним джерелом забруднення. Зміна хімічного складу води напряму залежить від складу донних відкладів.

Сумарний показник забруднення проби  $Z_c$ , розрахований за [38], склав  $Z_c=15$ . Таким чином, рівень забруднення є середнім. Був також розрахований коефіцієнт донної акумуляції, який використовується в якості індикатора забруднення водного об'єкту. Результати розрахунків свідчать, що р. Уди має невисокий рівень КДВ ( $102 < КДА < 103$ ), тобто концентрація важких металів є значною, а сорбуючі властивості донних відкладів – низькими.

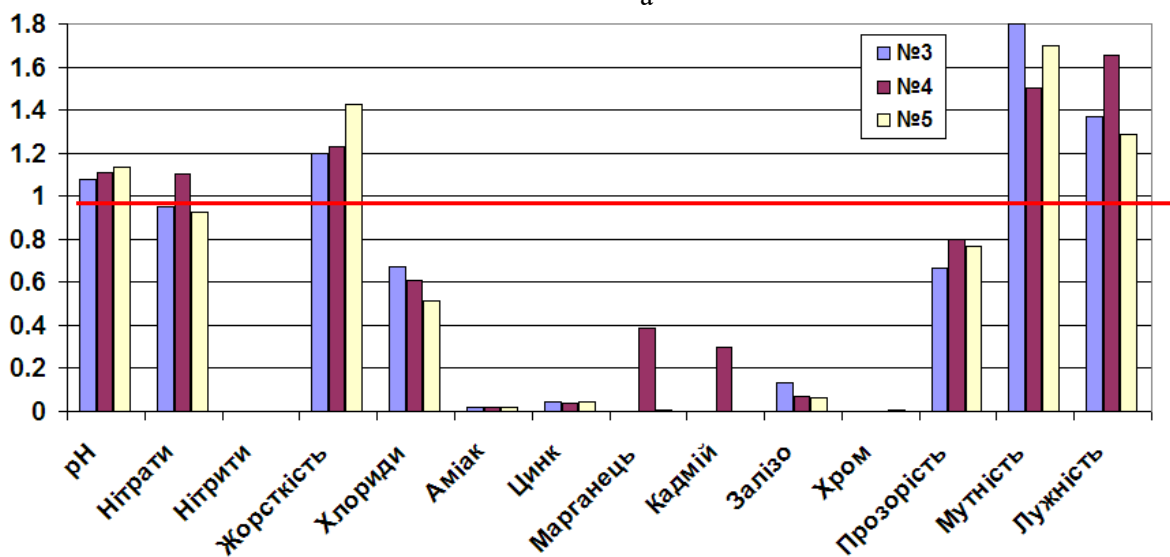
**Математичне моделювання переносу забруднень і оцінка якості води за умовами змін клімату.**

Результати вимірювань забрудненості води і коефіцієнту донної акумуляції, а також результати статистичних досліджень кореляцій між виміряними показниками дають можливість проводити розрахунки за рівнянням (4).

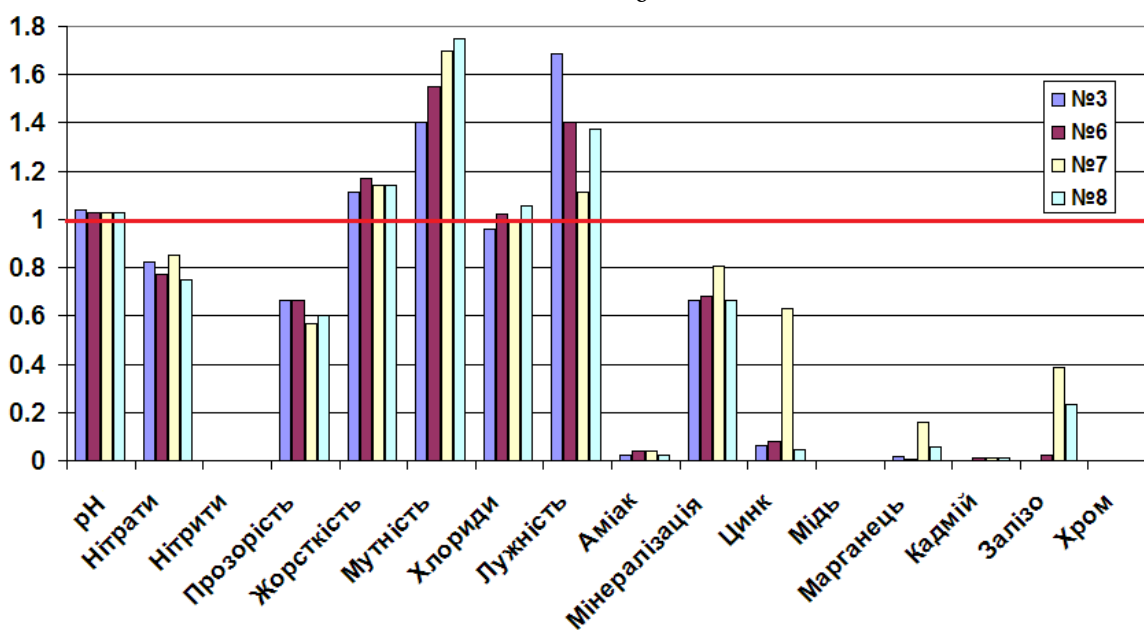
Шляхом ітерацій (4) з кроком  $t=1$  міс. Проводилися обчислення сумарної маси забруднень



а



б



с

Рис. 7. Безрозмірні хімічні характеристики проб води з табл. 3 (а), 4 (б), 5 (в); червона лінія відповідає ГДК



$$M_{\Sigma}(t) = \sum_{p=1}^N M_p(t) \text{ для всіх компонент із табл. 2-5.}$$

Коефіцієнти для компонент наведені в [18], а необхідні економіко-географічні дані – в [28, 41]. В якості можливих сценаріїв змін клімату приймалися поступові підвищення середньорічної температури  $T_{cp}$  повітря до 2030 р. на  $0.5^{\circ}\text{C}$  (сценарій 1),  $1^{\circ}\text{C}$  (сценарій 2),  $1.5^{\circ}\text{C}$  (сценарій 3) і  $2^{\circ}\text{C}$

(сценарій 4). Відповідні формули для обчислень кількості опадів, вологості повітря, значень випаровування і транспірації води як компонентів водого обміну [32], а також коефіцієнтів в (4) в залежності від значень  $T_{cp}$  наведені в [18]. Результати розрахунків прогнозованих на 10 років кривих представлені на рис. 8 для безрозмірних значень  $M = M_{\Sigma} / M_{\Sigma 0}$ , де  $M_{\Sigma 0}$  відповідає даним вимірювань 2019 р.

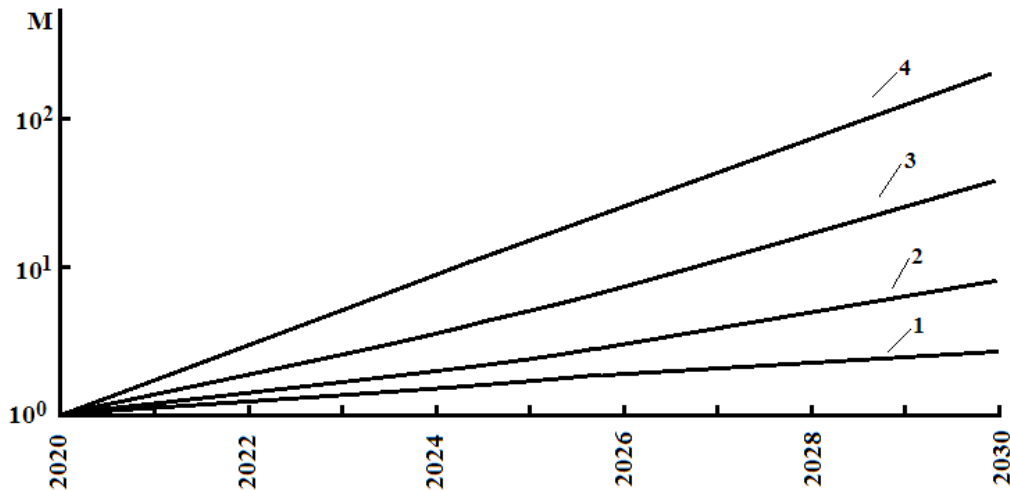


Рис. 8. Динаміка сумарних забруднень води в системі річок Лопань-Харків-Уди при різних сценаріях поступового потепління

Таким чином, навіть «найм'якший» сценарій з підвищенням  $T_{cp}$  на  $0.5^{\circ}\text{C}$  протягом 10 років приведе до майже двократного підвищення вмісту забруднень. Сценарії 1,2 є загрозливими, а сценарії 3,4 – критичним для розвитку Харківського регіону, який вже на сьогодні має значний попит на питну і технічну воду для різних цілей (рис. 2), а також дуже високий індекс ризику посухи (рис. 1б) і високі значення індексів водного стресу (рис. 1а) і ризику прибережної повені (рис. 1в). Механізмами підвищення вмісту забруднень і погіршення якості води є низький рівень опадів, поступове накопичення забруднень в ґрунтах, поверхневих і ґрунтових водах, підвищення ерозії ґрунтів, піщані бурі, загибель придонних і прибережних рослин, що разом приводить до порушень внутрішніх зв'язків і процесів в річковій системі, яка не може самовідновлюватися.

**Висновки.** Аналіз даних світових моніторингових систем по областях України у порівнянні з аналогічними даними по майже всім країнам світу, які знаходяться у відкритих джерелах, показує, що за даними 2013 р. Харківська область входить у трійку лідерів (Рис.2) з потреб у питній і технічній воді для різних цілей. При цьому область має максимальний індекс ризику посухи (0.8-1) і високі значення індексів водного стресу (2-3) і ризику прибережної повені (2-3).

Аналіз літератури показує, що в останні роки значна увага приділяється прогнозуванню

екологічної ситуації в регіоні/країні на основі даних моніторингу різних геофізичних, кліматичних, метеорологічних, екологічних та ін. параметрів. Значна кількість такої інформації знаходиться в базах даних у відкритому доступі для можливості проведення наукових досліджень, прогнозування, перевірки гіпотез та прийняття рішень на рівні уряду(ів). Найпростіша математична модель, яка наведена в роботі, дозволяє розраховувати накопичення забруднень з часом з урахуванням їх деградації та накопичення в ґрунтах і воді, а також при різних сценаріях змін у навколишньому середовищі, але для застосування цієї моделі на рівні урболандшафтної геосистеми річок Лопань-Харків-Уди необхідні початкові дані, а також наявні статистичні залежності між показниками, які визначені саме в локальній геосистемі.

Аналіз проб води, відібраних з різних частин р. Лопань і р. Уди у різні сезони показали, що деякі з показників перевищують відповідні значення ГДК, особливо у бездощові періоди, але в цілому індекси якості води відповідають 1-2 класу якості (в залежності від сезону) для р. Лопань і 1-му класу якості – для р. Уди. Чисельні розрахунки за запропонованою математичною моделлю з використанням лабораторних визначень показників показали, що потепління клімату на  $0.5-1^{\circ}\text{C}$  до 2030 р. приведе до помітного погіршення якості води та напруженості з досту-

пністю необхідної для регіону кількості питної і технічної води. Сценарій потепління на 1.5-2°C може привести до створення напружено-

катастрофічних умов проживання населення, що потребує невідкладних дій з менеджменту водними ресурсами [18, 29-32].

#### Література

1. Afshar A. Waste load reallocation in river-reservoir systems: simulation-optimization approach / A. Afshar, F. Masoumi. *Environmental Earth Sciences*. 2016. – Vol. 75, Article number: 53., <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4812-x>
2. Andik B. Waste load allocation under uncertainty using game theory approach and simulation-optimization process / B. Andik, M.H. Niksokhan. *Journal of Hydroinformatics*, 2020. – 22(4). – P. 815–841, <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.18>
3. Carmichael J.J. A multiple-organic-pollutant simulation/optimization model of industrial and municipal wastewater loading to a riverine environment / J.J. Carmichael., K.M. Strzepek. *Water Resources Res.* 2000. – Vol. 36(5). –P. 1325–1332, <https://doi.org/10.1029/2000WR900010>
4. Inexact two-stage stochastic partial programming: Application to water resources management under uncertainty. [Fan, Y.R.; Huang, G.H.; Guo, P.; Yang, A.L.]. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 2012. – 26 – P. 281–293, <https://doi.org/10.1007/s00477-011-0504-6>
5. Land-use and carbon cycle responses to moderate climate change: implications for land-based mitigation. [Humpenoder F., Popp A., Stevanovic M., et al.]. – Humpenoder F. – *Environ. Sci. Technol.* – 2015. – V. 49. – P. 6731–6739, <https://doi.org/10.1021/es506201r>
6. From climate change impacts to the development of adaptation strategies: challenges for agriculture in Europe [Iglesias A., Quiroga S., Moneo M., Garrote L.]. *Clim. Chang.* – 2011. – V. 112 – P.143–168. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0344-x>
7. The IWAS-ToolBox: Software coupling for an integrated water resources management [Kalbacher T., Delfs J.-O., Shao H., et al.] Kalbacher T. – *Environ Earth Sciences*. –2012. – V. 65. – P. 1367–1380. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1270-y>
8. Integrated water Resources management under different hydrological, climatic and socio-economic conditions [Kalbus E., Kalbacher T., Kolditz O., et al] – Kalbus E. – *Environmental Earth Sciences*. – 2012. – V. 65(5) – P. 1363-1366. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1330-3>
9. Capacity development as a key factor for integrated water resources management (IWRM): improving water management in the Western Bug River Basin, Ukraine [Leidel M., Niemann S., Hagemann N., et al.]. – *Environ Earth Sci.* – 2012. – V. 65(5). – P. 1415–1426. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1223-5>
10. Loucks D.P. Linear programming models for water pollution control/ D.P. Loucks, C.S. ReVelle, and W.R. Lynn. – *Manage Sci.* – 1967. – Vol. 16. – P. 166-181. <https://www.jstor.org/stable/2628682>
11. Loucks D.P. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications / D.P. Loucks., van Beek E. Springer. – 2017. – 630 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>
12. Meng Ch. An Optimization Model for Waste Load Allocation under Water Carrying Capacity Improvement Management, A Case Study of the Yitong River, Northeast China / Ch. Meng., X. Wang, and Yu Li. – *Water* 2017. – 9. – 573 p. <https://doi.org/10.3390/w9080573>
13. Saberi L. Optimal waste load allocation using graph model for conflict resolution / L.Saberi, M.H. Niksokhan. – *Water Sci. Technol.* –2017. – 75 (6). – P. 1512–1522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.429>
14. Schilling J. Estimation of Wastewater Discharges by Means of OpenStreetMap Data / J.Schilling, J. Tranckner. – *Water* 2020. – 12. – 628 p. <https://doi.org/10.3390/w12030628>
15. Shih C.S. System ptimization for river basin water quality management, / C.S. Shih. – *J. Water Pollut. Control Fed.* – 1970. – 42(10). –P. 1792-1804. <https://www.jstor.org/stable/25036799>
16. Skulovich O. Industry Effluent Disposal into Rivers: Coupled Multiobjective-Analytical Optimization Model / O. Skulovich, A. Ostfeld. – *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2018. – Vol. 144(2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000861](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000861)
17. Thomann R.V. Estuarine water quality management and forecasting / R.V. Thomann, M.J. Sobel. – *J. Sanit. Eng. Div. N.Y. Am. Soc. Civ. Eng.* – 1964. – 90. –P. 9-36.
18. Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Porous Media: Benchmarks and Examples. [Ed. By O. Kolditz, U.-J. Goerke, H. Shao, W. Wang]. – Springer Science Business Media. –2012. – 399p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27177-9>
19. Godecke-Tobias Blecken. Содержание взвешенных веществ и сухого остатка в поверхностных водах атмосферного происхождения на урбанизированной территории / Godecke-Tobias Blecken, Н.Л. Рычак, В.В. Остапенко: материалы II Междунар. науч. конф. студ., магистр., аспирант. и молодых ученых «Экология, неоекология, охрана окружающей среды и сбалансированное природопользование». – Харьков, 30 октября – 2 ноября 2013 г. – X.: Изд-во ХНУ имени В.Н. Каразіна, 2013 г. – С. 119-121.
20. Гура Н.П. Донні відклади та їх вплив на якість води у р. Лопань / Н.П. Гура, Н. Л. Ричак: матер. IV Міжнар. наук. – практик. конф. молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування», Харків, 3-4 грудня 2015 р. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. – С. 167-168.

21. Гура Н. Вплив поверхневого стоку з урбанізованої території на вміст важких металів в системі «поверхневі води – донні відклади» / Н. Гура, Н. Ричак: Матеріали I Міжнар. наук. – практ. конф. “Водопостачання та водовідведення: проектування, будова, експлуатація, моніторинг”, Львів, 4–6 листопада 2015 р. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, ЗУКЦ, 2015. – С.80-83.
22. ДСТУ 4077-2001 ISO 10523:1994, MOD. Якість води. Визначення рН. [Чинний від 2003-07-01]. – Київ: Держстандарт України, 2003. – 16 с. – (Національний стандарт України).
23. ДСТУ 7244:2011. Якість ґрунту. Спеціальні сировинні зони. Загальні вимоги. [Чинний від 2012-01-01]. Київ: Держстандарт України, 2012. – (Національний стандарт України).
24. ДСТУ 7525:014. Якість води. Вимоги і методи контролю якості. [Чинний від 2015-10-23]. Київ: Держстандарт України, 2015. – 12 с. – (Національний стандарт України).
25. Даувальтер В. А., Яцишин С. И. Халькофильные элементы в воде и донных отложениях озера Умборо / В. А. Даувальтер, С. И. Яцишин // Вестник МГТУ. – 2008. – № 3. – Т. 11. – С. 417-427.
26. Добренко О. О. Водогосподарські проблеми. Забруднення і евтрофікація: монографія / О. О. Добренко, А. В. Мирющенко. – Житомир: Меркурій, 2015. – 98 с.
27. Жемеров О. О. Оцінка якості поверхневих вод суші: [метод. посіб.] / О. О. Жемеров, В. Г. Доц. – Харків: АССА, 2011. – 35 с.
28. Карпець К. М. Оцінка стану малих річок території Харкова (на прикладі р. Харків): [навч. посіб.] / К.М. Карпець. – Харків: АССА, 2012. – 93 с.
29. Кизилова Н.Н. Математическое моделирование и прогнозирование динамики речного русла реки Харьков на территории г. Харькова / Н.Н.Кизилова, Н.Л. Рычак: сб. статей Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки, Гомель:, 2019. – Вып.12. – С. 94-99.
30. Кизилова Н.Н. Математическое моделирование и прогнозирование динамики участка речного русла реки Северский Донец /Н.Н Кизилова, Н.Л Рычак, А.А. Халин / Bulletin of V. Karazin Kharkiv National University, Series «Mathematical Modelling. Information Technology. Automated Control Systems». – 2019. – N43. – P. 30–37, <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2019-43-04>
31. Кізілова Н.М. Підхід системної динаміки до контролю за якістю води на урбанізованих територіях / Н.М. Кізілова, Н.Л. Ричак, Ю.І. Руднев // 36. наук. праць: Системи обробки інформації. –2019. – N4(159). – С. 87-92, <https://doi.org/10.30748/soi.2019.159.10>
32. Кізілова Н.М. Інформаційне супроводження системи менеджменту водними ресурсами на урбанізованих територіях / Н.М. Кізілова, Н.Л. Ричак// Системи обробки інформації. – 2020. – №4(163) – С. 37-47, <https://doi.org/10.30748/soi.2020.163.04>
33. Лукієнко М.В. Оптимізація стану водного об'єкту при навантаженні у бездоцовий період (на прикладі р. Уди) / М.В. Лукієнко, Н.Л. Ричак: матеріали VII Міжнар. наук. конф. молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування». – Харків, 28–29 листопада 2019 р. – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2019. – С. 16-18.
34. Інформаційна технологія пошуку можливих джерел підвищеного забруднення річки з використанням моделі ПРОФЕТ / [В.Б.Мокін, О.В. Слободянюк, О.М. Давидюк, Д.О. Шмундяк] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. –2020. – №4. – С. 15-24. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-151-4-15-24>
35. Остапенко В.В. Вміст нафтопродуктів у зливово-талому стоці транспортної підсистеми міста / В.В. Остапенко, Н.Л. Ричак: матеріали XXII міжнар. наук.-техн. конф. «Екологічна і техногенна безпека. Охорона водного і повітряного басейнів. Утилізація відходів», Харків, 24-25 квітня 2014р. – Харків: Харківський національний університет будівництва та архітектури, 2014. – С. 86.
36. Раціональне використання та відновлення водних ресурсів: монографія / за заг. ред. Феценка В.П. – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2016. – 250 с.
37. Ричак Н. Л. Розрахунок економічного збитку від поверхневих вод атмосферного походження (на прикладі житлової підсистеми) / Н. Л. Ричак, В.М. Московкін, В.В. Кузнєцова // Вісник Харківського університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія». – 2016. – Вып. № 44. – С. 177-183. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2016-44-25>
38. Саєт Ю. Е. Геохимия окружающей среды: [науч. пособ] / Ю.Е. Саєт. –Москва : Недра, 1990. –335 с.
39. Чебукін Д.С. Аналіз вкладу поверхневого стоку у загальний рівень забруднення вод р. Лопань / Д.С. Чебукін, Н.Л. Ричак: матеріали VII Міжнар. наук. конф. молодих вчених «Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування», Харків, 28 – 29 листопада 2019р. / Харків: Вид-во Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, 2019. – С. 105-107.
40. Голиков А. П. Харьковская область: региональное развитие: состояние и перспективы : монография / А. П. Голиков, Н. А. Казакова, М. В. Шуба / под ред. чл.-кор. НАН Украины, проф. В. С. Бакирова. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2011. – 328 с. <https://core.ac.uk/download/pdf/46593993.pdf>

Надійшла до редакції 25 грудня 2020 р.

Прийнята 21 лютого 2021 р.

**Внесок авторів:** Кізілова Н. М. – математичне моделювання, Ричак Н. Л. – обробка і аналіз проб, узагальнення результатів, Чебукін Д. С. – експериментальні дані, аналіз результатів, Лукієнко М. В. – експериментальні дані, аналіз результатів.



UDC 556.5: 556.167.6

**Natalia Kizilova,**

DSc (Physics and Mathematics), Professor, Department of Applied Mathematics,  
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine,  
e-mail: [n.kizilova@gmail.com](mailto:n.kizilova@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9981-7616>;

**Natalia Rychak,**

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Ecology and Neoeology,  
V. N. Karazin Kharkiv National University,  
e-mail: [rychak@ukr.net](mailto:rychak@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-1620-3059>;

**Dmitry Chebukin,**

Master (Ecology), Department of Ecology and Neoeology,  
V. N. Karazin Kharkiv National University,  
e-mail: [impressio1989@gmail.com](mailto:impressio1989@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0633-3661>;

**Margarita Lukienko,**

Master (Ecology), Department of Ecology and Neoeology,  
V. N. Karazin Kharkiv National University,  
e-mail: [lukienko.m.v@gmail.com](mailto:lukienko.m.v@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5527-950X>

## ECOLOGICAL ASSESSMENT OF SURFACE WATER QUALITY IN A RAINLESS PERIOD UNDER THE CONDITIONS OF URBAN WATER COLLECTION

**Problem formulation.** The global climate warming influences the balance of water reservoirs by lower precipitation, higher evaporation, erosion of soils and other changes. On the territory of Ukraine, the periods without rains, low snow level, warm winters and dry summers, strong winds and dust storms became frequent during the last decades. This led to a change in many hydrological parameters in comparison with the hydrological regimes usual in temperate climates. Therefore, the determination of the ecological assessment of the state of water reservoirs in the conditions of the urban drainage basin in the rainless period is an insufficiently studied and urgent issue.

**The aim of the article** is estimation of quality of the river water in the system of rivers Lopan-Kharkov-Udy on the urban landscape of Karkov region.

**Materials and methods.** Field sampling of water and bottom sediments to provide an environmental assessment of the water reservoir; comparison of the results obtained with similar ones obtained for rainy periods and periods of snow melting in different hydrological regimes, and statistical analysis of the measured data.

**Results.** Analysis of the open source data revealed that Kharkov region is among the top three in terms of drinking and technical water needs for various purposes. The region has a maximum possible drought risk index (0.8-1) and high values of water stress indices (2-3) and coastal flood risk (2-3).

Water samples taken from different sections of the Lopan and Udy rivers in different seasons showed that some of the parameters exceed the corresponding control values, especially in rainless periods, but in general water quality indices correspond to 1-2 quality classes (depending on the season) for the river Lopan and the 1st class of quality - for the river Udy. Numerical calculations on a mathematical model using the measurement data showed that global warming at 0.5-1° C by 2030 will lead to a significant deterioration in water quality and its availability as the required amount of drinking and industrial water for the region.

**Scientific novelty.** Novel mathematical model is proposed for simple estimations of the water pollution over time at different growth rate of the average temperature accounting for known number of pollutants.

**Practical significance.** The obtained results are useful for further development of the system of water management on urban territories, testing different hypothesis and scenarios.

**Keywords:** surface water, urban landscape geosystem, water quality, environmental monitoring, rainless period.

### References

1. Afshar A. & Masoumi F. (2016). *Environmental Earth Sciences*. vol.75, Article number, 53. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4812-x>
2. Andik B. & Niksokhan M.H. (2020). *Waste load allocation under uncertainty using game theory approach and simulation-optimization process*. *Journal of Hydroinformatics*, 22(4), 815–841, <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.18>

3. Carmichael J.J. & Strzepek K.M. (2000). A multiple-organic-pollutant simulation/optimization model of industrial and municipal wastewater loading to a riverine environment. *Water Resources Res.*, 36(5), 1325–1332, <https://doi.org/10.1029/2000WR900010>
4. Fan Y.R., Huang G.H., Guo P., Yang A.L. (2012). Inexact two-stage stochastic partial programming: Application to water resources management under uncertainty. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 26, 281–293, <https://doi.org/10.1007/s00477-011-0504-6>
5. Humpenoder F., Popp A., Stevanovic M., et al. (2015). Land-use and carbon cycle responses to moderate climate change: implications for land-based mitigation. *Humpenoder F.- Environ. Sci. Technol*, 49, 6731–6739, <https://doi.org/10.1021/es506201r>
6. Iglesias A., Quiroga S., Moneo M., Garrote L.(2011). From climate change impacts to the development of adaptation strategies: challenges for agriculture in Europe. *Clim. Chang*, 112, 143–168, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0344-x>
7. Kalbacher T., Delfs J.-O., Shao H., et al. (2012). The IWAS-ToolBox: Software coupling for an integrated water resources management. *Environ Earth Sciences*, 65, 1367–1380, <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1270-y>
8. Kalbus E., Kalbacher T., Kolditz O., et al (2012). Integrated water Resources management under different hydrological, climatic and socio-economic conditions. *Environmental Earth Sciences*, 65(5), 1363-1366, <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1330-3>
9. Leidel M., Niemann S., Hagemann N., et al (2012). Capacity development as a key factor for integrated water resources management (IWRM): improving water management in the Western Bug River Basin, Ukraine. *Environ Earth Sci*, 65(5), 1415–1426, <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1223-5>
10. Loucks D.P., ReVelle C.S. & Lynn W.R. (1967). Linear programming models for water pollution control. *Manage Sci*, 16, 166-181, <https://www.jstor.org/stable/2628682>
11. Loucks D.P. & van Beek E (2017). Water resources systems planning and management. *An Introduction to Methods, Models and Applications*. Springer, 630, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>
12. Meng Ch., Wang X., & Yu Li. (2017). An Optimization Model for Waste Load Allocation under Water Carrying Capacity Improvement Management, A Case Study of the Yitong River, Northeast China. *Water*, 9, 573, <https://doi.org/10.3390/w9080573>
13. Saberi L. & Niksokhan M.H. (2017). Optimal waste load allocation using graph model for conflict resolution. *Water Sci. Technol*, 75 (6), 1512–1522, <https://doi.org/10.2166/wst.2016.429>
14. Schilling J. & Tranckner J. (2020). Estimation of Wastewater Discharges by Means of OpenStreetMap Data. *Water*, 12, 628, <https://doi.org/10.3390/w12030628>
15. Shih C.S. (1970). System ptimization for river basin water quality management. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 42(10), 1792-1804, <https://www.jstor.org/stable/25036799>
16. Skulovich O. & Ostfeld A. (2018). Industry Effluent Disposal into Rivers: Coupled Multiobjective-Analytical Optimization Model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000861](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000861)
17. Thomann R.V. & Sobel M.J. (1964). Estuarine water quality management and forecasting. *J. Sanit. Eng. Div. N.Y. Am. Soc. Civ. Eng.*, 90, 9-36.
18. Kolditz O., Goerke U.-J., Shao H., Wang W. (2012). *Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Porous Media: Benchmarks and Examples*. Ed. By O. Kolditz, Springer Science Business Media, 399. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27177-9>
19. Godecke-Tobias Blecken, Rychak N.L. & Ostapenko V.V. (2013). The content of suspended solids and dry residue in surface waters of atmospheric origin in an urbanized area. "Ecology, neoecology, environmental protection and balanced use of natural resources", October 30-November 2, 2013. Kharkov, Ukraine. 119-121. [in Russian].
20. Gura N.P., Rychak N.L. (2015). Bottom sediments and their impact on water quality in the Lopan River "Ecology, neo-ecology, environmental protection and balanced nature management". December 3-4, 2015. Kharkiv, Ukraine. 167-168. [in Ukrainian]
21. Gura N., Rychak N. (2015). The influence of surface runoff from urban areas on the content of heavy metals in the system "surface water - bottom sediments". "Water supply and sewerage: design, construction, operation, monitoring". November 4–6, 2015. Lviv, Ukraine. 80-83. [in Ukrainian].
22. DSTU 4077-2001 ISO 10523: 1994, MOD. (2003). Water quality. Determination of pH. [Effective from 2003-07-01]. Kyiv, 16. (National standard of Ukraine). [in Ukrainian].
23. DSTU 7244; 2011. (2012). Soil quality. Special raw material zones. General requirements. [Effective from 2012-01-01]. Kyiv. (National standard of Ukraine). [in Ukrainian].
24. DSTU 7525: 014. (2015). Water quality. Requirements and methods of quality control. [Effective from 2015-10-23]. Kyiv. 12. (National Standard of Ukraine). [in Ukrainian].
25. Dauwalter V.A, Yashchishin S.I. (2008). Chalcophilic elements in the water and bottom sediments of Lake Umboro. *Moscow. Bulletin of the Moscow State Technical University*. 3(11), 417-427. [in Russian].
26. Dobrenko O.O, Myryushchenko A.V. (2015). Water management problems. Pollution and eutrophication: a monograph. Zhytomyr, Mercury. [in Ukrainian].
27. Zhemerov O.O, Doz V.G. (2011). Estimation of land surface water quality: method. way. Kharkiv, ACCA. [in Ukrainian].

28. Karpets K.M. (2012). *Assessment of small rivers in Kharkiv (on the example of Kharkiv): textbook*. way. Kharkiv, ACCA. [in Ukrainian].
29. Kizilova N.N., Rychak N.L. (2019). *Mathematical modeling and forecasting of the dynamics of the river bed of the Kharkiv River on the territory of Kharkiv. Mechanics. Scientific research and educational and methodical developments*, 12. Gomel, Belarus. 94-99. [in Russian].
30. Kizilova N.N., Rychak N.L., Khalin A.A. (2019). *Mathematical modeling and forecasting of the dynamics of the Seversky Donets riverbed. Bulletin of V. Karazin Kharkiv National University, Series «Mathematical Modeling. Information Technology. Automated Control Systems»*. (43). 30-37, <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2019-43-04> [in Ukrainian].
31. Kizilova N.M., Rychak N.L., Rudnev Y.I. (2019). *The approach of system dynamics to water quality control in urban areas. Information processing systems*, 4(159), 87-92, <https://doi.org/10.30748/soi.2019.159.10> [in Ukrainian].
32. Kizilova N.M., Rychak N.L. (2020) *Information support of the water resources management system in urban areas. Information processing systems*, 4(163), 37-48. <https://doi.org/10.30748/soi.2020.163.04> [in Ukrainian].
33. Lukienko M.V., Rychak N.L. (2019) *Optimization of the state of the water body during the load in the rainless period (for example, the river Uda). Ecology, neo-ecology, environmental protection and sustainable use of nature*. November 28 - 29, 2019. Kharkiv, Ukraine, 16-18. [in Ukrainian].
34. Mokin V.B., Slobodyanyuk O.V., Davydyuk O.M., Shmundyak D.O. (2020) *Shmundyak Information technology for searching for possible sources of increased river pollution using the PROPHET model. Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 4, 15-24, <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-151-4-15-24> [in Ukrainian].
35. Ostapenko V.V., Rychak N.L. (2014). *The content of petroleum products in the stormwater runoff of the transport subsystem of the city. Environmental and man-made safety. Protection of water and air pools. Waste disposal*. April 24-25, 2014. Kharkiv, Ukraine, 86. [in Ukrainian]
36. Feshchenko V.P. (edited). (2016). *Rational use and restoration of water resources*. Zhytomyr: ZhSU Publishing House I. Franko. [in Ukrainian]
37. Rychak N.L., Moskovkin V.M., Kuznetsova V.V. (2016) *Calculation of economic damage from surface waters of atmospheric origin (on the example of the housing subsystem). Bulletin of VN Karazin Kharkiv University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 44, 177-183. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2016-44-25> [in Ukrainian]
38. Saet Yu. E. *Geochemistry of the environment*. (1990). Moscow: Nedra. [in Russian].
39. Chebukin D.S., Rychak N.L. (2019) *Analysis of the contribution of surface runoff to the overall level of water pollution in the Lopan River. Ecology, neo-ecology, environmental protection and sustainable use of nature*. November 28 - 29, 2019. Kharkiv, Ukraine, 105-107. [in Ukrainian]
40. Bakirov V.S., Golikov A.P., Kazakova N.A., Shuba M.A. (2011). *Kharkiv region: regional development: state and prospects*. Bakirov V.S. (editor) Kharkiv: KhNU named after V.N. Karazin, 2011, <https://core.ac.uk/download/pdf/46593993.pdf> [in Russian].