

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-01>

УДК 556.53:504.4:519.24

В. Л. БЕЗСОННИЙ, канд. техн. наук, доц.,
доцент кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти
e-mail: bezsonnyi@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця,
пр. Науки, 9а, м. Харків, 61166, Україна

О. В. ТРЕТЬЯКОВ, д-р техн. наук, проф.,
професор кафедри цивільної та промислової безпеки імені Героя України О.С. Чуба
e-mail: mega_ovtr@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0457-9553>
"Державний університет "Київський авіаційний інститут",
пр. Любомира Гузара 1, м. Київ, 03058, Україна

А. Н. НЕКОС, д-р географ. наук, проф.,
завідувачка кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти
e-mail: nekos@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

Є. В. ЧІСТОВ, магістрант навчально-наукового інституту екології.,
e-mail: yehor.chistov@student.karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-4703-3825>
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ КИСНЕВОГО РЕЖИМУ Р. ДУНАЙ

Мета. Визначення динаміки кисневого режиму річки Дунай та створення моделі прогнозування кисневого режиму Дунаю на основі аналізу біохімічного споживання кисню (БСК) та процесів реаерації, що враховують багатфакторний вплив екологічних, гідрологічних та антропогенних чинників.

Методи. Статистичні, застосовано математичну модель Стрітера-Фелпса.

Результати. На підставі аналізу багаторічних даних державного моніторингу водних ресурсів р. Дунай за показниками розчиненого кисню (РК) та біохімічного споживання кисню (БСК₅) за період 2004–2023 років визначено загальне покращення кисневого режиму: всі пости спостереження демонструють стабільне зростання рівня РК, особливо після 2020 року, що може свідчити про зменшення органічного забруднення. Сезонний аналіз показав, що в холодний період рівень РК зростає, тоді як у теплий період спостерігається його зниження через підвищення біологічної активності. Модель Стрітера-Фелпса підтвердила здатність прогнозувати динаміку РК і БСК₅ з прийнятною точністю, хоча в деякі роки спостерігались розбіжності через короткострокові коливання органічного навантаження.

Висновки. Підтверджено ефективність використання моделі Стрітера-Фелпса для прогнозування кисневих показників р. Дунай. Дані прогнозу можуть бути використані для оцінки екологічного стану річки, планування заходів із покращення якості води та управління водними ресурсами. Розроблені рекомендації дозволять мінімізувати ризики кисневого дефіциту та сприятимуть збереженню екологічної рівноваги басейну р. Дунай.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кисневий режим, Дунай, біохімічне споживання кисню, реаерація, модель Стрітера-Фелпса, моніторинг води

Як цитувати: Безсонний В. Л., Третьяков О. В., Некос А. Н., Чістов Є. В. Прогнозування показників кисневого режиму р. Дунай. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2024. Вип. 42. С. 6-23. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-01>

In cites: Bezsonnyi, V. L., Tretyakov, O. V., Nekos, A. N., & Chistov, Ye. V. (2024). Prediction of oxygen regime indicators in Danube river. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (42), 6-23. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-01> (in Ukrainian)

© Безсонний В. Л., Третьяков О. В., Некос А. Н., Чістов Є. В., 2024



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Вступ

Річкові екосистеми є надзвичайно важливими елементами природного середовища, адже вони забезпечують біологічне різноманіття, є джерелом прісної води, а також відіграють важливу роль у процесах самоочищення води. Однією з найбільших та найважливіших річок Європи є річка Дунай, яка протікає через декілька країн та забезпечує водними ресурсами значну частину населення, а також є основою для численних економічних та екологічних процесів. Однак інтенсивний антропогенний вплив, зокрема через промислове, сільськогосподарське та побутове забруднення, створює значне навантаження на екосистему річки. Одним із ключових аспектів, що визначає якість водного середовища та здоров'я водних екосистем, є кисневий режим річки.

Кисневий режим річкових вод є показником, що відображає процеси окислення органічних речовин, біохімічне споживання кисню водними організмами, а також процеси реаерації, коли кисень надходить у воду з атмосфери. Концентрація розчиненого кисню у воді є життєво важливим фактором для підтримки екологічної рівноваги та життєдіяльності водних організмів, адже його нестача може призвести до деградації екосистеми та загибелі біоти. З огляду на це, моніторинг та прогнозування кисневого режиму річкових вод є надзвичайно важливим завданням для забезпечення екологічної стійкості річки та її раціонального використання.

Прогнозування кисневого режиму річкових екосистем є важливим напрямком гідроекологічних досліджень, оскільки концентрація розчиненого кисню у воді значною мірою визначає стан екосистеми та рівень її забруднення. Кисень у воді використовується на окислення органічних речовин, що надходять внаслідок антропогенної діяльності та природних процесів. Інтенсивність цих процесів залежить від ряду факторів, таких як температура води, наявність біогенних речовин, швидкість течії, а також вміст органічних речовин. Через це вивчення факторів, що впливають на кисневий режим, і розробка моделей для його прогнозування є предметом досліджень багатьох вчених.

Серед існуючих моделей прогнозування кисневого режиму особливе місце займає класична модель Стрітера-Фелпса,

розроблена у 1925 році. Ця модель базується на припущенні, що розпад органічних речовин, які потребують кисню для окислення, та процеси реаерації є основними факторами, які визначають зміну концентрації кисню у воді. Модель Стрітера-Фелпса є основою багатьох сучасних підходів до оцінки якості води, оскільки вона дозволяє прогнозувати, як змінюється концентрація розчиненого кисню на певних ділянках річки залежно від умов, що створюються на вхідному пункті.

Дунай, як друга за довжиною річка в Європі, має надзвичайно важливе екологічне та економічне значення. Її кисневий режим є ключовим індикатором екологічного стану, який впливає на біорізноманіття, якість води та загальний баланс екосистеми. Прогнозування показників кисневого режиму є складним завданням, що потребує інтеграції гідрологічних, кліматичних та антропогенних чинників. У сучасній науковій літературі значна увага приділяється використанню математичних моделей, методів машинного навчання та даних дистанційного зондування для аналізу та прогнозування змін у кисневому режимі.

Кисневий режим визначається взаємодією фізико-хімічних та біологічних процесів, що впливають на рівень розчиненого кисню у воді. Головними факторами є температура води, швидкість течії, концентрація органічних речовин, фотосинтетична активність водоростей і антропогенне забруднення [1].

Значний внесок у вивчення кисневого режиму зробили класичні роботи, присвячені моделюванню розчиненого кисню, зокрема рівняння Стрітера-Фелпса [2], яке враховує процеси споживання кисню під час окислення органічних речовин та його поповнення внаслідок реаерації.

Сучасні дослідження наголошують на важливості врахування змін клімату, зокрема підвищення температури, яке впливає на здатність води утримувати кисень [3]. Також звертається увага на підвищення евтрофікації, спричиненої надходженням фосфору та азоту зі стічних вод [4].

Прогнозування показників кисневого режиму базується на використанні моделей різного рівня складності. Традиційні математичні моделі (напр., QUAL2K) дозволяють моделювати просторово-часовий

розподіл кисню у воді, враховуючи фізико-хімічні параметри [5]. Однак їх застосування потребує значних обсягів даних та точного калібрування. Останнім часом набули популярності підходи, що використовують нейронні мережі, метод опорних векторів (SVM) та ансамблеві методи для прогнозування кисневого режиму на основі великих обсягів даних (Big Data) [6]. Такі методи дозволяють виявляти нелінійні залежності між змінними. Технології супутникового моніторингу надають великі масиви даних щодо температури поверхні води, концентрації хлорофілу та інших змінних, що використовуються у моделюванні [7]. Наприклад, модель MIKE 11 успішно застосовується для прогнозування якісних показників води, включно з кисневим режимом, враховуючи динаміку водного потоку [8].

Річка Дунай проходить через 10 країн і має складну екологічну структуру, що ускладнює прогнозування кисневого режиму. Згідно з дослідженнями, кисневий баланс у річці залежить від багатьох факторів. У літній період спостерігається зниження кисню через підвищення температури [9]. Промислові та сільськогосподарські стоки значно змінюють якісні характеристики води [10]. Регуляція водного потоку за допомогою дамб та каналів впливає на швидкість реаерації [11]. Сучасні моделі прогнозування для р. Дунай, такі як SWAT (Soil and Water Assessment Tool) та моделі, що інтегрують дані дистанційного зондування, показують високу ефективність у виявленні довгострокових тенденцій [12].

Річка Дунай, друга за довжиною в Європі, відіграє ключову роль у водних екосистемах та економіці багатьох країн. Моніторинг та прогнозування кисневого режиму цієї річки є критично важливими для забезпечення екологічної стабільності та якості водних ресурсів. Прогнозування кисневого режиму річки Дунай базується на комплексному аналізі гідрологічних, хімічних та біологічних параметрів. Сучасні дослідження використовують геоінформаційні технології для моделювання та прогнозування якості води. Зокрема, Васенко та ін. застосували метод Хольта для короткострокового прогнозування змін якості води, включаючи показники розчиненого кисню, у дельті Дунаю [13]. Антропогенне навантаження, зокрема скиди стічних вод та промислова діяльність, суттєво впливають на кисневий режим річки.

Спільні Дунайські Дослідження 4 (JDS4) виявили наявність понад 580 забруднюючих речовин у водах Дунаю, що може призводити до зниження рівня розчиненого кисню та погіршення екологічного стану [14]. Міжнародна комісія із захисту річки Дунай (ICPDR) координує зусилля з моніторингу та управління водними ресурсами басейну Дунаю. Реалізація Спільного Плану управління річковим басейном Дунаю спрямована на досягнення "доброго" екологічного стану вод, включаючи оптимізацію кисневого режиму [15]. Незважаючи на значні зусилля, прогнозування кисневого режиму річки Дунай стикається з викликами, пов'язаними з комплексністю екосистеми та впливом змін клімату. Подальші дослідження необхідні для вдосконалення моделей прогнозування та розробки ефективних заходів з управління якістю води.

Вплив гідрологічних процесів на кисневий режим річки Дунай є предметом численних досліджень. Варіації рівня води, швидкості течії та температури води безпосередньо впливають на кількість розчиненого кисню (РК) [16]. У роботі [17] показано, що сезонні зміни стоку та термічний режим річки спричиняють циклічні коливання РК, зокрема у літні місяці, коли високі температури та низька швидкість течії зменшують його рівень. Крім того, глобальні зміни клімату сприяють підвищенню частоти екстремальних явищ, таких як повені та посухи.

Водна біота, зокрема фітопланктон та макрофіти, відіграє ключову роль у регуляції кисневого режиму річок. Фотосинтетична діяльність водних рослин сприяє збагаченню води киснем, тоді як процеси дихання та розкладання органічної речовини можуть призводити до його дефіциту. Наприклад, у дослідженні [18] показано, що в літній період у дельті Дунаю спостерігаються значні добові коливання РК через активну фотосинтетичну діяльність фітопланктону вдень та посилене дихання вночі. Збільшення евтрофікації є ще одним важливим чинником. Внаслідок антропогенного впливу, такого як скиди сільськогосподарських стоків, річка отримує надлишкові поживні речовини, що спричиняє "цвітіння води". Це явище супроводжується збільшенням кількості органічної речовини, яка під час розкладання призводить до зниження рівня кисню у воді.

У роботі [19] пропонується новий метод оцінки екологічного стану річок, в тому числі і за кисневими показниками,

заснований на концепції ентропії, яка використовується для кількісної оцінки ступеня невизначеності або хаосу в екосистемі. Висока ентропія може свідчити про деградацію екосистеми, тоді як низька — про стабільність та впорядкованість. Автори розробили алгоритм, який дозволяє визначити ентропію системи та, відповідно, її екологічний стан.

Автори [20] досліджують методи оцінки екологічного стану водних об'єктів, базуючись на використанні кисневих показників. Основною метою є обґрунтування доцільності застосування біохімічного споживання кисню і розчиненого кисню як інтегральних індикаторів екологічного стану поверхневих вод.

Огляд літератури свідчить, що дослідження кисневого режиму річки Дунай є багатогранною і надзвичайно важливою сферою, яка потребує міждисциплінарного підходу. Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю розробки ефективних методів прогнозування кисневого режиму річки Дунай з метою оцінити можливі зміни

у якості води та спрогнозувати реакцію водної екосистеми на різні фактори впливу. Прогнозування кисневого режиму є також важливим для запобігання можливим екологічним кризам, зокрема через потенційні періоди дефіциту кисню, які можуть виникати внаслідок надходження органічних забруднень або зміни кліматичних умов. Таким чином, ця робота спрямована на вирішення актуальної наукової та практичної проблеми, пов'язаної з прогнозуванням кисневого режиму річки Дунай. Результати дослідження можуть бути використані екологічними та водогосподарськими установами для покращення моніторингу стану водних ресурсів та управління ними.

Мета дослідження – визначення динаміки кисневого режиму річки Дунай та створення моделі прогнозування кисневого режиму річки Дунай на основі аналізу біохімічного споживання кисню (БСК) та процесів реаерації води, що враховують багатофакторний вплив екологічних, гідрологічних та антропогенних чинників.

Об'єкти та методи дослідження

Вихідними даними для дослідження є частина набору даних державного моніторингу поверхневих вод, що містить первинну інформацію (дані спостережень) державного моніторингу поверхневих вод для р. Дунай в межах України. Держводагентство проводить державний моніторинг вод відповідно до Порядку здійснення державного моніторингу вод, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 19.09.2018 № 758, яким визначено перелік пунктів моніторингу, відповідальних виконавців, показники та періодичність вимірювань.

Для дослідження використано дані багаторічних спостережень чотирьох моніторингових постів (рис. 1):

1) Post_ID 27269, р. Дунай, 163 км, м. Рені, кордон з Румунією, координати 45.467233; 28.229450

2) Post_ID 27270, р. Дунай, 94 км, м. Ізмаїл, питний водозабір міста, координати 45.338508; 28.814842

3) Post_ID 27271, р. Дунай, 48 км, м. Кілія, питний в/з, координати 45.435156; 29.264058

4) Post_ID 27272, р. Дунай, 20 км, м. Вилкове, питний в/з, координати 45.401556; 29.571814

Дані представлені в розрізі постів моніторингу й дат відбору проб. Для оцінки тенденцій зміни кисневих показників, а саме БСК₅ та розчиненого кисню (РК) стану аналізувалися дані багаторічних спостережень з 2004 по 2023 рр. В таблиці 1 представлені вихідні дані, отримані шляхом усереднення за роками інформації з набору даних, що оприлюднюються Державним агентством водних ресурсів України.

Для прогнозування динаміки кисневих показників застосовано модель Стрітера-Фелпса, яка є класичною гідрохімічною моделлю, що описує процеси самоочищення водних об'єктів (річок, озер) внаслідок розпаду органічних речовин і насичення води киснем. Вона використовується для оцінки якості води та впливу забруднень на водойми. Основні процеси, які описує ця модель, включають:

– Розпад органічних речовин (біохімічне споживання кисню) – в річку потрапляють органічні речовини (відходи), які використовуються мікроорганізмами для їхнього метаболізму. У процесі цього метаболізму мікроорганізми споживають кисень; БСК визначає кількість кисню, необхідного для повного окислення

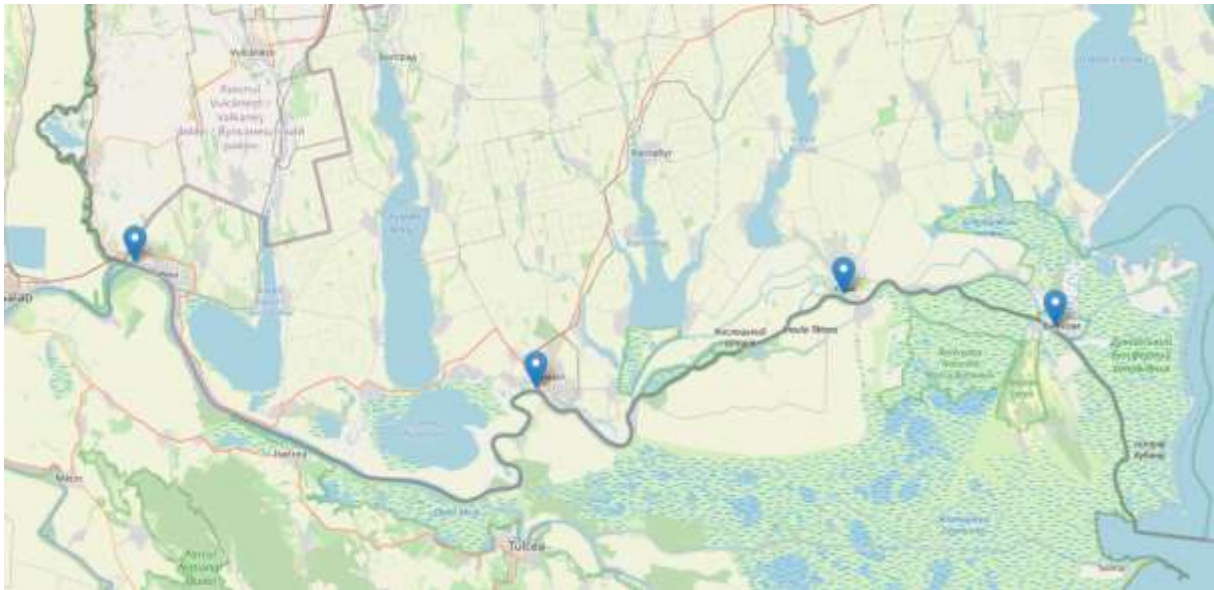


Рис. 1 – Схема розташування постів контролю якості води. (Карта: QGIS, OpenStreetMap)

Fig. 1 – Location of water quality monitoring stations. (Map: QGIS, OpenStreetMap)

Таблиця 1

Середньорічні значення БСК₅ та розчиненого кисню за пунктами моніторингу

Table 1

Annual average values of BOD₅ and dissolved oxygen by monitoring points

Пост моніторингу	п.1 Рені		п.2 Ізмаїл		п.3 Кілія		п. 4 Вилкове	
	БСК ₅	РК	БСК ₅	РК	БСК ₅	РК	БСК ₅	РК
2004	2,38	8,53	2,23	8,08	4,90	7,30	4,18	8,45
2005	3,00	6,69	1,83	7,01	3,80	7,55	1,70	7,80
2006	3,66	8,19	2,17	7,12	4,60	7,50	2,34	8,34
2007	2,63	7,11	2,86	7,27	3,09	6,47	2,47	7,00
2008	2,64	7,20	2,46	8,58	3,35	7,33	2,90	7,30
2009	3,23	8,60	3,31	8,09	4,55	7,30	3,34	8,41
2010	3,20	7,47	2,60	7,44	1,85	6,50	3,02	7,47
2011	2,96	8,73	3,90	8,34	2,60	8,35	2,39	8,34
2012	2,14	8,44	3,00	8,31	2,20	7,97	2,23	8,20
2013	3,15	8,39	2,70	7,82	1,93	8,53	1,37	8,24
2014	0,82	6,50	1,50	7,48	2,33	7,62	0,95	7,75
2015	1,40	8,44	2,43	8,34	1,23	8,73	1,09	8,16
2016	2,07	8,54	3,20	8,34	2,40	8,50	1,56	8,59
2017	2,66	8,36	3,09	8,57	1,25	8,05	1,73	9,10
2018	2,73	8,09	3,86	8,20	1,62	8,18	1,61	7,24
2019	3,05	7,47	2,60	7,67	2,07	7,90	1,55	7,67
2020	2,49	9,59	2,22	9,76	2,60	8,51	2,33	8,50
2021	1,79	9,57	2,48	9,88	2,26	9,54	2,31	9,69
2022	2,53	9,96	2,41	10,05	2,40	10,16	2,43	10,26
2023	2,78	9,43	2,46	10,15	2,64	9,44	2,60	9,56
Середнє	2,56	8,27	2,66	8,33	2,68	8,07	2,20	8,30

органічних речовин, що містяться у воді. БСК зменшується з часом у міру розкладання органіки.

- Насичення води розчиненим киснем (РК) – одночасно з процесом розпаду органіки відбувається процес відновлення кисню у воді. Кисень дифундує з атмосфери у воду, компенсуючи його втрати через метаболізм мікроорганізмів; швидкість цього процесу залежить від характеристик водного об'єкта (температури, турбулентності) і концентрації розчиненого кисню.

Математично модель описує ці два процеси за допомогою системи диференціальних рівнянь. Основні рівняння моделі мають вигляд:

1. Зміна БСК з часом:

$$\frac{dL}{dt} = -k_d * L$$

де: L — концентрація БСК у воді;

k_d — коефіцієнт розпаду органіки.

2. Зміна розчиненого кисню з часом:

$$\frac{dD}{dt} = k_d * L - k_a * D$$

де: D — дефіцит кисню (різниця між насиченою концентрацією кисню та фактичною);

k_a — коефіцієнт насичення киснем (реаерації).

У результаті цих процесів концентрація розчиненого кисню у воді спочатку знижується через розпад органіки, а потім поступово відновлюється завдяки дифузії кисню з атмосфери. Модель дозволяє розрахувати, як змінюється концентрація кисню та органічних речовин на певній відстані вниз за течією від джерела забруднення, що є корисним для оцінки екологічного стану річок. Основна суть моделі Стрітера-Фелпса — це баланс між розпадом органічних речовин, які споживають кисень, та відновленням кисню у воді через його дифузії з атмосфери, що дозволяє оцінювати, як змінюється якість води у процесі природного самоочищення. Для розрахунку за моделлю Стрітера-Фелпса потрібно вирішити диференціальні рівняння, що описують зміни біохімічного споживання кисню (БСК) та дефіциту кисню (D) вздовж річки.

Основні змінні та параметри:

1) L_0 — початкова концентрація органічних речовин (БПК) у пункті скиду, мг/л.

2) D_0 — початковий дефіцит кисню у пункті скиду, мг/л.

3) k_d — коефіцієнт розпаду органічних речовин, 1/день.

4) k_a — коефіцієнт реаерації (насичення киснем), 1/день.

5) t — час, що відповідає певній відстані вниз за течією, дні.

6) v — швидкість течії води, км/день.

7) C_s — концентрація розчиненого кисню в насиченому стані, мг/л (звичай близько 8-10 мг/л залежно від температури).

Модель Стрітера-Фелпса використовує два основні рівняння:

1. Розпад органічних речовин (БСК):

$$L(t) = L_0 * e^{-k_d * t}$$

де $L(t)$ — концентрація органічних речовин (БСК) через час (t).

2. Дефіцит кисню:

$$D(t) = \frac{(k_d * L_0)}{(k_a - k_d)} * (e^{-k_d * t} - e^{-k_a * t}) + D_0 * e^{-k_a * t}$$

де: $D(t)$ — дефіцит кисню через час (t).

Перший член відображає внесок розпаду органіки у дефіцит кисню, а другий — зменшення початкового дефіциту через реаерацію.

Оскільки в розрахунках часто цікава відстань, на якій змінюється дефіцит кисню, зв'язок між часом (t) і відстанню (x) встановлюється через швидкість течії:

$$t = x/v$$

де: x — відстань від точки скиду, км;

v — швидкість течії води, км/день.

Концентрацію розчиненого кисню $C(t)$ можна знайти через дефіцит кисню $D(t)$:

$$C(t) = C_s - D(t)$$

де: $C(t)$ — концентрація розчиненого кисню через час (t).

C_s — концентрація кисню в насиченому стані.

Результати та обговорення

Річка Дунай є другою за довжиною річкою Європи після Волги, простягаючись на 2857 км від витоків у Німеччині до гирла в Чорному морі. Бере початок у Шварцвальді

(Чорний ліс), де утворюється від злиття річок Бригах і Брег. Протікаючи через 10 країн, включаючи Німеччину, Австрію, Словаччину, Угорщину, Хорватію, Сербію, Румунію,

Болгарію, Молдову та Україну, річка охоплює численні природні та антропогенні ландшафти. Загальна площа басейну становить близько 817 000 км². Дунай відіграє ключову роль як важлива транспортна артерія, джерело водопостачання, зона рибальства, а також як регіон з унікальною біорізноманітністю. Басейн річки включає різноманітні екосистеми – від лісових та степових масивів до заболочених і заплавлених територій, які забезпечують проживання численних видів флори та фауни, багато з яких є рідкісними або зникаючими. Гідрологічний режим Дунаю характеризується значною сезонною мінливістю, з весняними повеннями, що обумовлені таненням снігу в Альпах, Карпатах та інших гірських регіонах. Влітку рівень води у Дунаї підтримується переважно за рахунок дощових опадів, тоді як восени і взимку рівень води знижується, що впливає на концентрацію розчиненого кисню, особливо у низов'ях. Поблизу гирла Дунаю розташований великий дельтовий регіон, який є важливою екологічною зоною. Дельта займає площу близько 4 152 км² і характеризується високою продуктивністю, багатим біорізноманіттям і значною екологічною цінністю. Завдяки природним процесам очищення, дельта допомагає зберегти якість води в Чорному морі, проте піддається загрозам через антропогенний вплив.

Клімат басейну р. Дунай варіюється від помірного морського на заході до континентального на сході. Ця різноманітність впливає на режим опадів, температуру та гідрологічний баланс річки. Західна частина басейну зазвичай має вологий клімат з частими дощами, тоді як східна частина (зокрема нижня течія) відзначається меншою кількістю опадів і помірними температурними коливаннями. Сезонна зміна кліматичних умов спричиняє коливання рівня води та концентрації розчиненого кисню, що є одним з основних показників екологічного стану річки.

Річка Дунай, через високий рівень антропогенного впливу, піддається різноманітним екологічним загрозам, зокрема забрудненню промисловими, сільськогосподарськими та побутовими відходами. Промислові стоки, які містять токсичні метали, нафтопродукти та інші шкідливі речовини, що негативно впливають на біорізноманіття і здоров'я водних екосистем. Використання добрив та пестицидів призводить до евтрофікації, що сприяє розвитку водоростей і зниженню рівня кисню, особливо в застійних ділянках річки. Каналізаційні стоки – навіть після очищення, залишкові домішки потрапляють у

річку, погіршуючи її якість. Через високий рівень забруднення в нижній течії Дунаю спостерігаються проблеми з якістю води, що негативно позначається на кисневому режимі та потребує впровадження моніторингових та регуляторних заходів. Басейн річки Дунай є середовищем існування для численних видів риб, водоплавних птахів, земноводних та багатьох інших видів. Серед унікальних видів – осетрові, які потребують специфічних умов кисневого режиму та якості води. Значну роль у збереженні природного стану басейну відіграють природоохоронні території, такі як Дунайський біосферний заповідник в Україні та інші резервати, розташовані вздовж течії. Проте, вплив антропогенних факторів, змін клімату та регулювання русла річки негативно впливають на збереження біорізноманіття.

Аналіз динаміки показників біологічного споживання кисню (БСК₅) та розчиненого кисню (РК) у воді річки Дунай за період з 2004 до 2023 року демонструє загальну тенденцію до покращення якості води. Результати вимірювань, проведені у чотирьох точках відбору проб — Рені, Ізмаїл, Кілія та Вилкове, показують стабільність та позитивну динаміку у рівнях кисню та БСК₅, що свідчить про зменшення органічного забруднення води.

Рівень кисню (РК) у всіх точках спостереження демонструє загальну тенденцію до зростання. Особливо виражене підвищення спостерігається з 2020 року, після якого рівень кисню залишається стабільно високим або навіть продовжує зростати. Наприклад, у точках Ізмаїл і Вилкове кисневі показники досягли пікових значень у 2022-2023 роках, перевищуючи позначку 10 мг/л, що може вказувати на покращення якості води або зменшення органічного забруднення в цих районах.

З іншого боку, показник БСК₅ залишається відносно стабільним протягом усього періоду спостереження, з незначною тенденцією до зниження. БСК₅ — це показник, що відображає кількість кисню, необхідну для біохімічного окислення органічних речовин у воді. Таким чином, зниження рівня БСК₅ свідчить про зменшення кількості органічних забруднень у воді, оскільки менше кисню споживається на процеси розкладання.

Детальний аналіз кожного пункту відбору проб дозволяє помітити специфічні особливості динаміки показників у різних частинах річки Дунай. У пункті Рені, що знаходиться на кордоні з Румунією, рівень кисню

залишався стабільно високим протягом усього періоду, з деяким підвищенням після 2020 року. Показники БСК₅ тут стабілізувалися на низькому рівні, що може свідчити про мінімальне органічне забруднення в цьому регіоні (рис. 2).

У пункті Ізмаїл (рис.3), де розташований питний водозабір міста, рівень кисню також зріс після 2020 року і досяг пікових значень у 2022-2023 роках. Показник БСК₅ демонструє незначні коливання, залишаю-

чись на відносно низькому рівні, що також вказує на низький рівень органічного забруднення у цій ділянці річки. У пункті Кілія (рис.4), що розташована на 48 км від гирла, рівень кисню протягом усього періоду залишався стабільним, однак після 2020 року спостерігається зростання. Значення БСК₅ тут було високим на початку періоду, проте з часом знизилася і стабілізувалася, що свідчить про зменшення органічного забруднення.

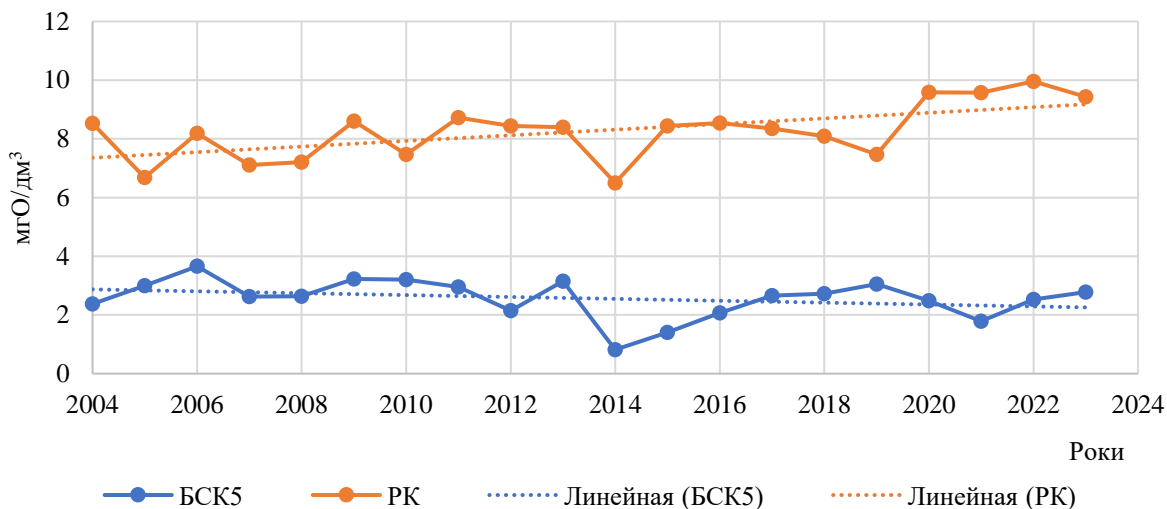


Рис. 2 – Динаміка та лінії тренду показників БСК₅ і розчиненого кисню для п.1 Рені
Fig. 2 – Dynamics and trend lines of BOD₅ and dissolved oxygen for p. 1 Reni

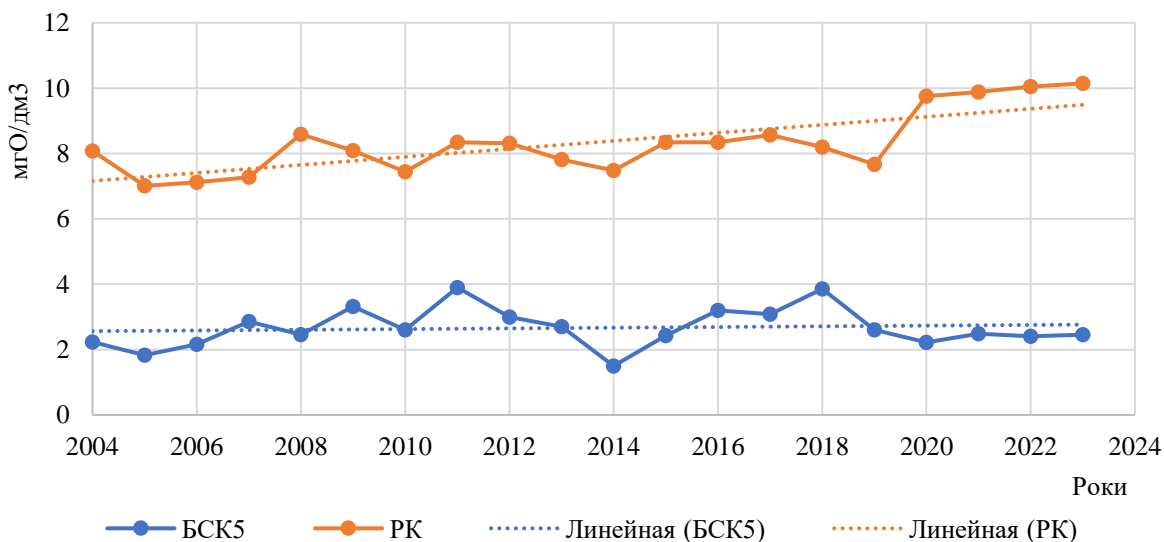


Рис. 3 – Динаміка та лінії тренду показників БСК₅ і розчиненого кисню для п.2 Ізмаїл
Fig. 3 – Dynamics and trend lines of BOD₅ and dissolved oxygen indicators for p. 2 Izmail

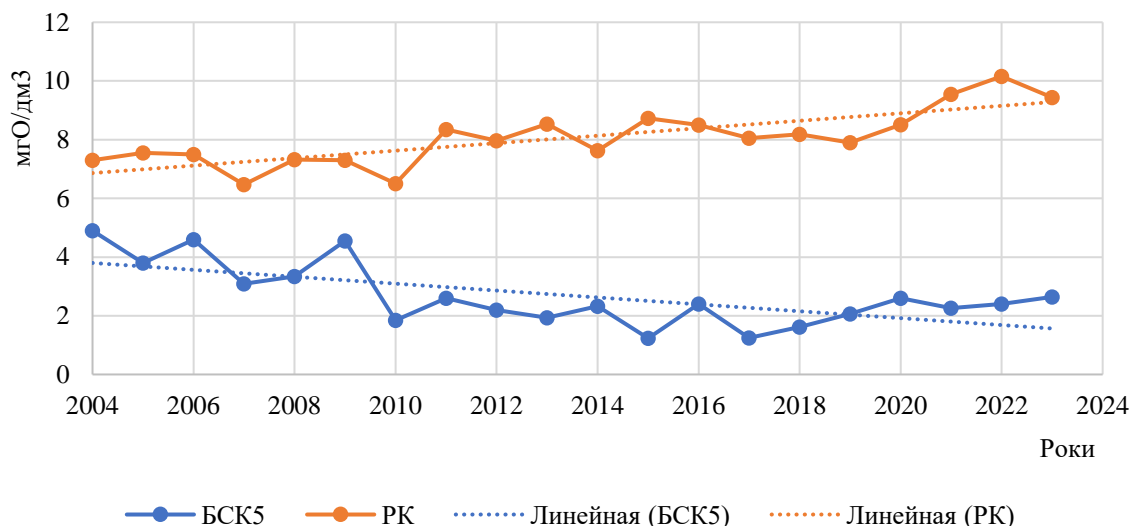


Рис. 4 – Динаміка та лінії тренду показників БСК₅ і розчиненого кисню для п.3 Кілія

Fig. 4 – Dynamics and trend lines of BOD₅ and dissolved oxygen indicators for p. 3 Kiliya

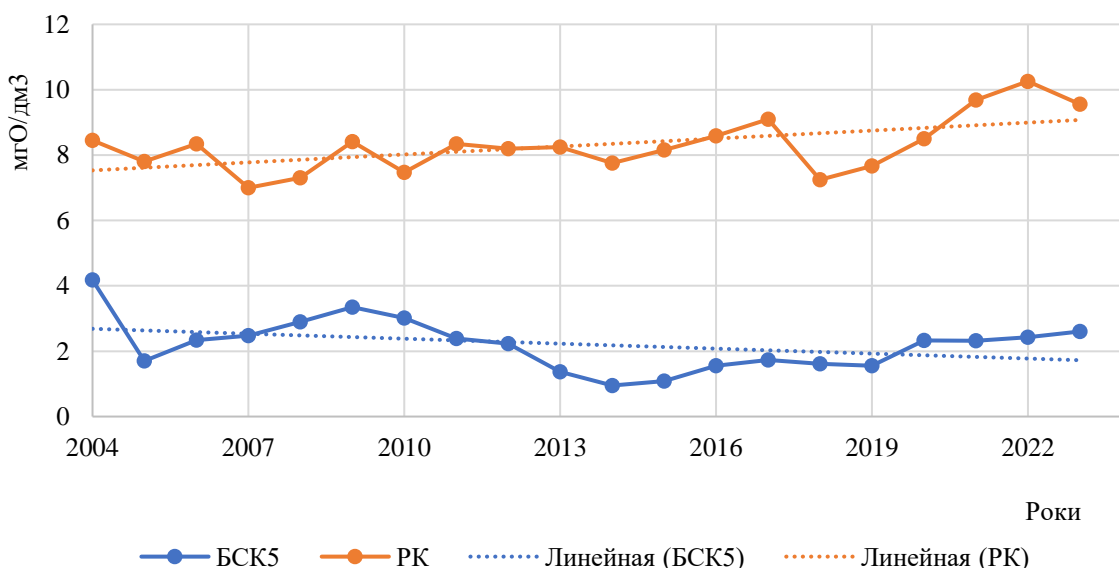


Рис. 5 – Динаміка та лінії тренду показників БСК₅ і розчиненого кисню для п. 4 Вилкове

Fig. 5 – Dynamics and trend lines of BOD₅ and dissolved oxygen indicators for p. 4 Vylkove

Пункт Вилкове (рис.5), що знаходиться на 20 км від гирла річки, також демонструє значне зростання рівня кисню з 2020 року, досягаючи пікових значень у 2022 році. Показники БСК₅ тут залишаються на низькому рівні, що свідчить про низький рівень органічного забруднення у цій частині річки Дунай.

Таким чином, динаміка показників БСК₅ та кисню у воді річки Дунай за період з 2004 до 2023 року свідчить про поступове покращення якості води. Підвищення концентрації кисню та стабілізація БСК₅ на

низькому рівні можуть вказувати на зменшення органічного забруднення, що позитивно впливає на екосистему річки та її здатність до самоочищення.

Зміни температури впливають на концентрацію кисню та рівень БСК₅. У холодний сезон (зимово-весняний період) нижча температура сприяє вищій розчинності кисню у воді та знижує біологічну активність мікроорганізмів, що зменшує споживання кисню для розкладання органічних речовин. У теплий сезон (літній період) вища температура стимулює біологічні процеси,

збільшує потребу в кисні та знижує його розчинність, що підвищує показник БСК₅ і знижує рівень кисню.

Тому проведений аналіз спостережень за теплим (квітень-жовтень) та холодним (листопад – березень) сезонами. Аналіз сезонних змін показників БСК₅ та РК у воді річки Дунай на основі даних для холодного і теплого сезонів демонструє помітні тенденції, що дозволяють зробити висновки про динаміку якості води в різні пори року.

У холодний сезон (зимовий період) значення кисню є значно вищими порівняно з теплим сезоном. Середні значення кисню у всіх пунктах перевищують 10 мг/л у холодний період, що може бути зумовлено зниженням біологічної активності та меншою швидкістю розкладання органічних речовин при нижчих температурах. Наприклад, у пунктах Рені та Ізмаїл (рис.6 та рис.7) середній показник РК у холодний сезон становить 11,02 та 10,69 мг/л відповідно, тоді як у теплий сезон ці значення знижуються до 8,27 та

8,22 мг/л. Зниження показника кисню в теплий сезон може бути пов'язане з активнішим споживанням кисню мікроорганізмами в процесі розкладання органічних речовин, яке прискорюється за підвищення температури.

Значення БСК₅ також змінюються залежно від сезону, хоча ця динаміка менш виражена порівняно з киснем. У теплий сезон середні показники БСК₅ є дещо вищими в усіх пунктах, що вказує на більшу біологічну активність, яка потребує більше кисню для окиснення органічних забруднень. Наприклад, середній показник БСК₅ у пункті Рені становить 2,81 мг/л у холодний сезон та 2,56 мг/л у теплий сезон, що свідчить про помірне зростання біологічного навантаження в теплу пору року. У пункті Ізмаїл це співвідношення ще більш помітне — 2,53 мг/л у холодний сезон та 2,71 мг/л у теплий.

Пункт Рені – в обох сезонах спостерігається стабільно високий рівень кисню (рис. 6). У холодний сезон він перевищує 11 мг/л,

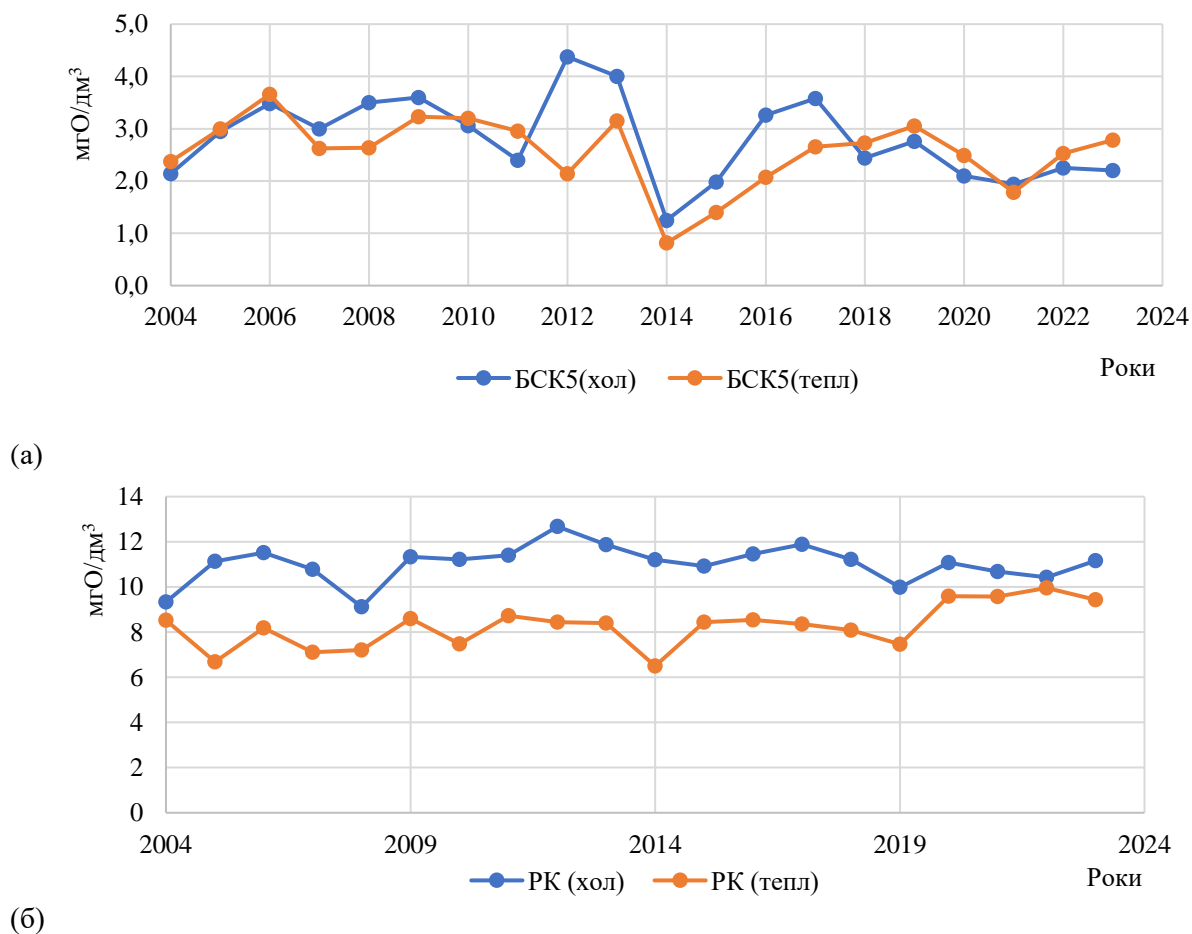


Рис. 6 – Динаміка у холодний і теплий сезону показників БСК₅ (а) і розчиненого кисню (б) для п. 1 Рені

Fig. 6 – Dynamics in the cold and warm seasons of BOD₅ (a) and dissolved oxygen (b) for p. 1 Reni

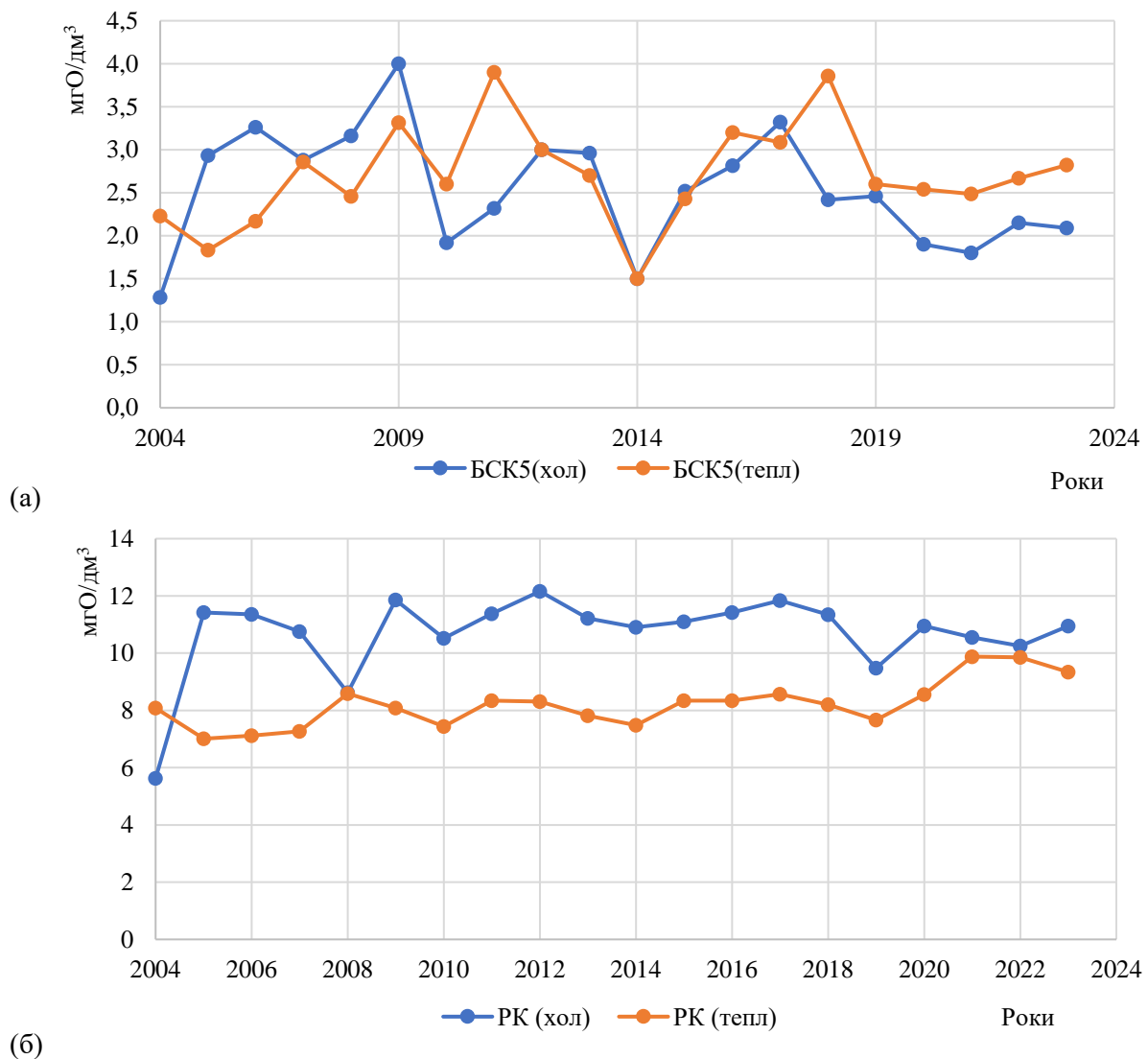


Рис. 7 – Динаміка у холодний і теплий сезону показників БСК₅ (а) і розчиненого кисню (б) для п. 2 Ізмаїл

Fig. 7 – Dynamics in the cold and warm seasons of BOD₅ (a) and dissolved oxygen (b) for p. 2 Izmail

тоді як у теплий сезон знижується, залишаючись на середньому рівні близько 8,27 мг/л. Показник БСК₅ дещо вищий у холодний період, що може бути наслідком зниження біологічної активності через нижчі температури.

Пункт Ізмаїл (рис.7) – значення кисню також є значно вищими у холодний сезон (середній показник 10,69 мг/л) порівняно з теплим (8,22 мг/л). БСК₅ у теплий період дещо підвищений (2,71 мг/л проти 2,53 мг/л у холодний), що свідчить про активніше споживання кисню на розкладання органіки в теплий період.

У пункті Кілія (рис. 8) в теплий період спостерігається відносно високий рівень БСК₅ (2,68 мг/л), що може вказувати на

підвищену біологічну активність у теплу пору року. Рівень кисню тут також знижується в теплий сезон (середній показник 8,07 мг/л проти 11,02 мг/л у холодний), що відповідає закономірностям активного розкладання органічних речовин.

Пункт Вилкове (рис.9.) – значення кисню залишається високим у холодний сезон (10,77 мг/л) та знижується до 8,30 мг/л у теплий сезон, що є типовим для цієї пунктки. БСК₅ у теплий період дещо нижчий (2,20 мг/л), однак різниця між сезонами тут є менш вираженою.

Дані демонструють, що у холодний сезон рівень кисню в усіх пунктках значно вищий, що пояснюється зменшенням біологічної активності та, відповідно, меншою потребою



Рис. 8 – Динаміка у холодний і теплий сезону показників БСК₅ (а) і розчиненого кисню (б) для п. 3 Кілія
Fig. 8 – Dynamics in the cold and warm seasons of BOD₅ (a) and dissolved oxygen (b) for p. 3 Kiliya

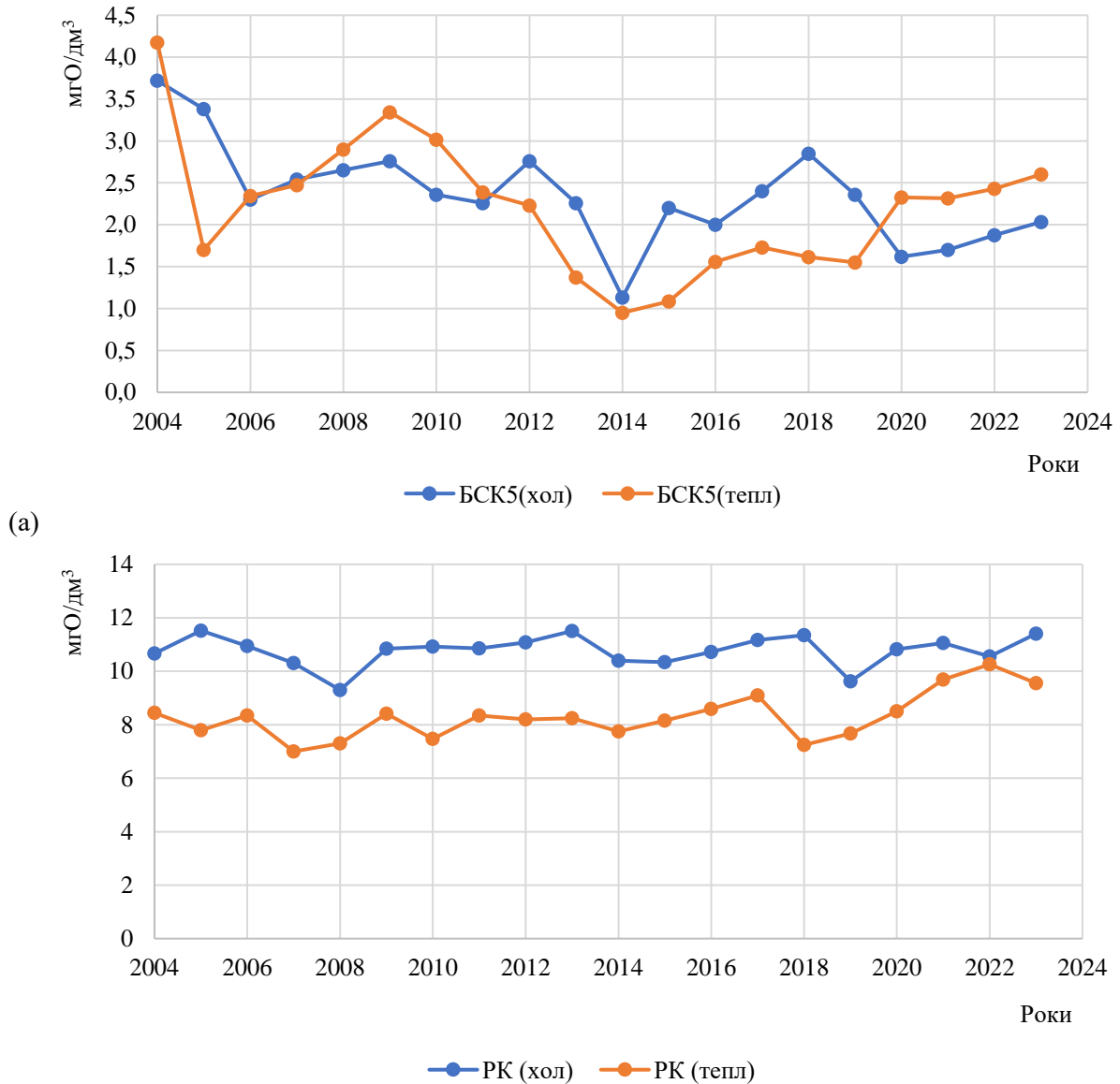
у кисні для окиснення органічних речовин. У теплий сезон відбувається зниження концентрації кисню та деяке підвищення показника БСК₅, що є результатом посиленої біологічної активності при підвищенні температури води. Це свідчить про те, що екосистема річки Дунай зазнає сезонних змін у біологічному навантаженні та здатності до самоочищення, що є важливим аспектом для моніторингу якості води та планування заходів з покращення стану річки.

При застосуванні моделі Стрітера-Фелпса були розраховані коефіцієнти k_a та k_d на основі значень концентрації БСК і кисню. В якості початкових значень були прийняті концентрації БСК₅ та розчиненого кисню для пункту м. Рені, в результаті

розрахунку отримано значення для коефіцієнтів для трьох ділянок р. Дунай: Рені – Ізмаїл, Ізмаїл – Кілія, Кілія – Вилкове. Як початковий пункт для вихідних значень, «нульових» значень є п.1 Рені (табл. 2).

На рис. 10 – 12 подано розраховані на основі прогнозної моделі Стрітера-Фелпса значення для БСК₅ та розчиненого кисню за пунктами спостережень, що йдуть після Рені – Ізмаїл, Кілія, Вилкове.

Для п.2 Ізмаїл (рис. 10) показано, що прогнозні значення БСК₅ та РК (позначені пунктирними лініями) здебільшого слідує за фактичними даними, проте спостерігаються певні розбіжності у різні роки, зокрема, у період з 2004 по 2010 роки модель досить точно відображає зміну рівнів БСК₅, однак у деякі роки прогнозне значення трохи



(б) **Рис. 9** – Динаміка у холодний і теплий сезону показників БСК₅ (а) і розчиненого кисню (б) для п. 4 Вилкове

Fig. 9 – Dynamics in the cold and warm seasons of BOD₅ (a) and dissolved oxygen (b) for p. 4 Vylkove

Розраховані коефіцієнти k_d аерації та реаерації k_a

Таблиця 2

Calculated coefficients of aeration k_d and reaeration k_a

Table 2

Ділянка водотоку	Відстань	k_d	k_a
Рені – Ізмаїл	48,01	-0,048271712	-0,071922868
Ізмаїл – Кілія	36,78	-0,01231745	-0,581070682
Кілія – Вилкове	24,38	0,489593871	2,184982103

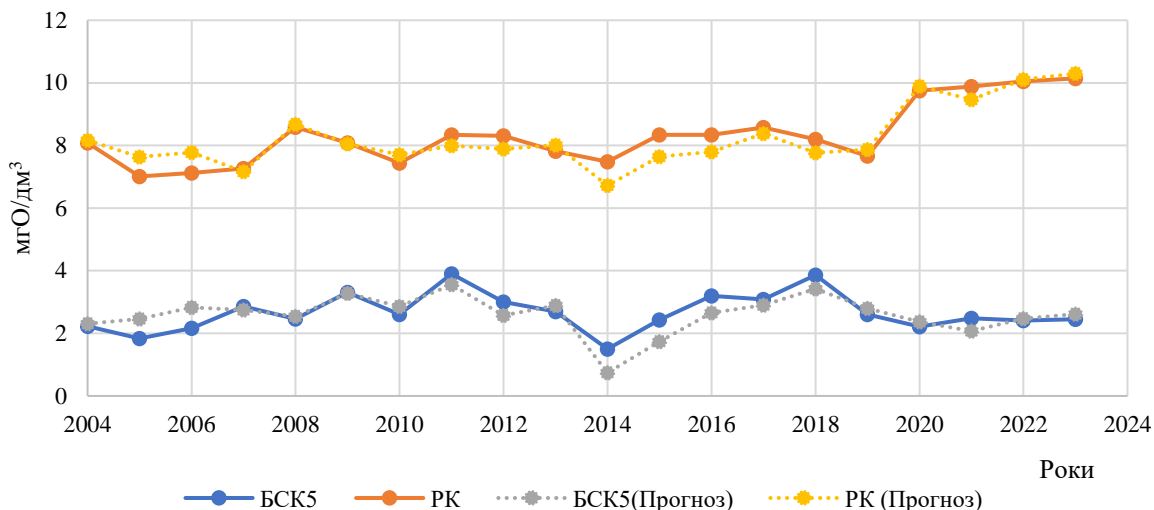


Рис. 10 – Прогнозні значення показників БСК₅ і розчиненого кисню для п. 2 Ізмаїл
Fig. 10 – Predicted values of BOD₅ and dissolved oxygen for p. 2 Izmail

вище за фактичне. Це може свідчити про недосконале врахування швидкості розкладання органіки в моделі. Для показників розчиненого кисню модель також показує прийнятний рівень відповідності фактичним значенням, хоча після 2020 року прогнозний рівень кисню трохи занижений порівняно з фактичним, що може свідчити про підвищення реальної швидкості реаерації або зниження забруднення в цей період.

У пункті Кілія (рис.11) спостерігається схожа тенденція, прогнозні значення

БСК₅ здебільшого відповідають фактичним, хоча у деякі роки (наприклад, 2015-2017) спостерігаються відсутні розбіжності, що може бути пов'язано з короткостроковими змінами в органічному навантаженні, які модель не враховує. Прогноз кисню також наближається до фактичних значень, хоча у деякі періоди (особливо у 2018-2020 роках) модель недооцінює фактичний рівень кисню, що може бути пов'язано з особливостями гідродинаміки річки на цьому відрізку.

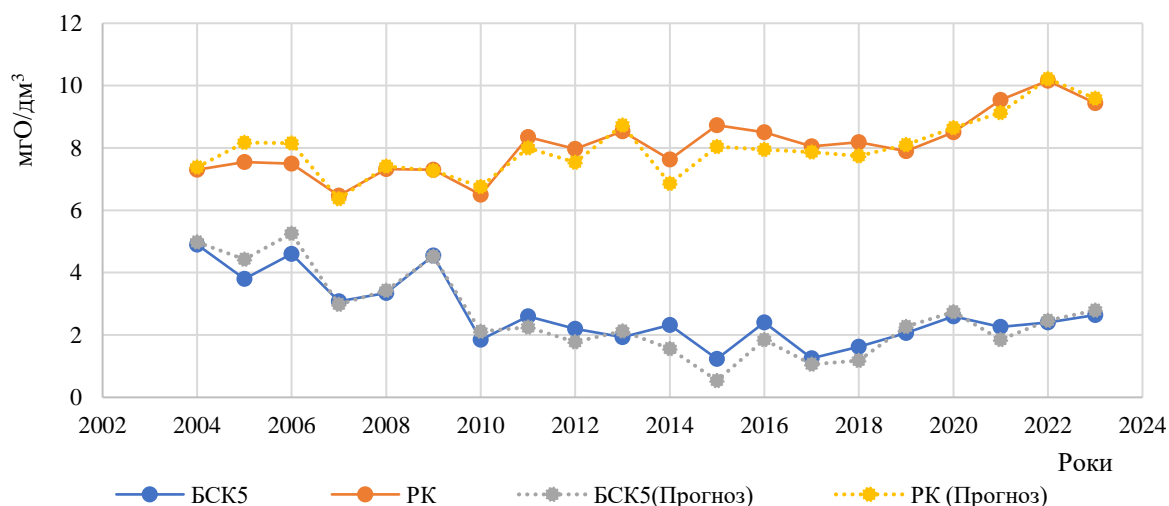


Рис. 11 – Прогнозні значення показників БСК₅ і розчиненого кисню для п. 3 Кілія
Fig. 11 – Predicted values of BOD₅ and dissolved oxygen for p. 3 Kiliya

Для пункту Вилкове (рис.12) прогнозна модель також показує загалом прийнятну відповідність фактичним даним, проте розбіжності в прогнозах БСК₅ та кисню помітніші, прогноз БСК₅ занижений у кілька років, зокрема у періоди 2015-2018 та 2021-2023, що може

свідчити про додаткові джерела органічного забруднення, не враховані в моделі. Прогноз кисню після 2020 року недооцінює фактичні показники, що може бути зумовлено зростанням швидкості реаерації або зниженням біологічного споживання кисню.

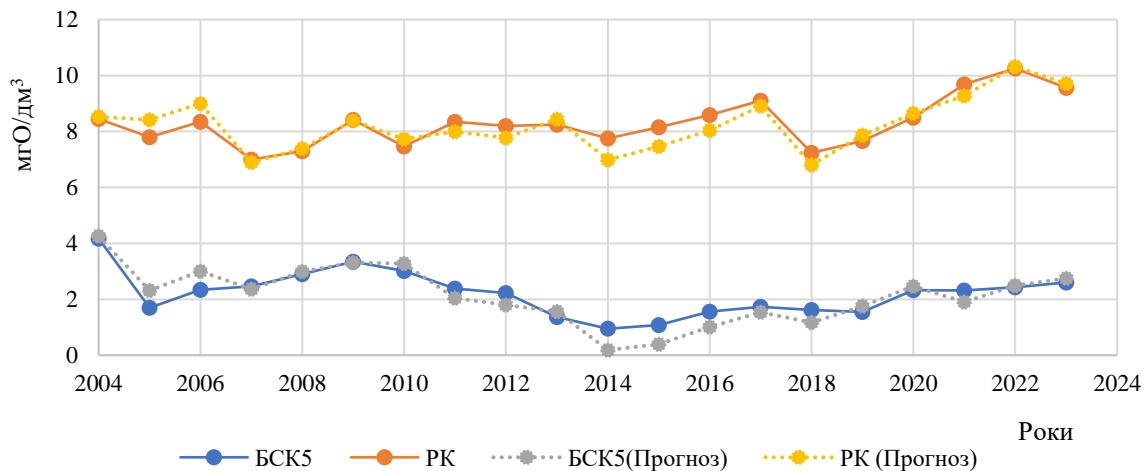


Рис. 12 – Прогнозні значення показників БСК₅ і розчиненого кисню для п. 4 Вилкове

Fig. 12 – Predicted values of BOD₅ and dissolved oxygen for p. 4 Vylkove

Модель Стрігера-Фелпса загалом показує прийнятну точність у прогнозуванні рівнів БСК₅ та кисню в пунктах спостереження, хоча існують окремі розбіжності, які можуть бути пов'язані зі змінами в органічному навантаженні, які модель не завжди точно враховує, впливом гідродинамічних умов, які змінюються залежно від річкових відрізків, можливими змінами в швидкості реаерації, що

пов'язано з кліматичними та екологічними умовами, зокрема після 2020 року. Модель є корисною для загального прогнозування кисневого балансу у водних об'єктах, проте для підвищення її точності можна врахувати додаткові фактори, такі як короточасні зміни у забрудненні, гідродинамічні особливості конкретних ділянок річки, а також сезонні зміни в швидкості реаерації.

Висновки

Результати багаторічного моніторингу показали стабільне підвищення рівня кисню в річці Дунай, особливо після 2020 року, що свідчить про певне покращення якості води та зниження органічного забруднення. Показники біохімічного споживання кисню (БСК₅) також демонструють позитивну динаміку – тенденцію до зниження, що вказує на зменшення органічного навантаження.

Встановлено значні сезонні коливання концентрації кисню та БСК₅. У зимово-весняний період спостерігаються підвищені рівні кисню через знижену біологічну активність мікроорганізмів, тоді як у літній період споживання кисню зростає, зумовлюючи його зниження. Цей аспект є важливим для оцінки річкової здатності до самоочищення та для розробки рекомендацій щодо водокористування.

Застосування моделі Стрігера-Фелпса дозволило провести прогноз концентрації кисню на різних ділянках річки. Модель загалом підтвердила відповідність фактичним даним моніторингу, хоча в окремі роки спостерігались розбіжності, які можуть бути спричинені короточасними змінами органічного забруднення та місцевими гідродинамічними умовами.

На основі результатів дослідження розроблено рекомендації щодо підвищення ефективності моніторингу та управління якістю води. Використання прогнозних даних дозволяє визначити зони потенційного кисневого дефіциту, оптимізувати заходи з очищення та забезпечити раціональне використання водних ресурсів.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Wetzel R. G. Limnology: Lake and River Ecosystems. *Academic Press*. 2001 URL: <https://archive.org/details/limnologylakeriv0003wetz>
2. Streeter H. W., Phelps E. B. A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River. *US Public Health Service Bulletin*. 1958. URL: <https://udspace.udel.edu/items/03d5883b-d6e7-4cf6-8a35-e14f9190302f>
3. Kundzewicz Z.W., Krysanova V. Climate change and stream water quality in the multi-factor context. *Climatic Change* 2010. 103, 353–362 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9822-9>
4. Smith V.H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. *Environ Sci & Pollut Res* 200310, 126–139. <https://doi.org/10.1065/espr2002.12.142>
5. Chapra, S. C. Surface Water-Quality Modeling. *Waveland Press*. 2008. URL: <https://pdfcoffee.com/surface-water-quality-modeling-chapra-pdf-free.html>
6. Rustam F., Ishaq A, Kokab S.T, de la Torre Diez I, Mazón J.L.V, Rodríguez C.L., Ashraf I. An Artificial Neural Network Model for Water Quality and Water Consumption Prediction. *Water*. 2022; 14(21):3359. DOI:<https://doi.org/10.3390/w14213359>
7. Jakovljevic G., Álvarez-Taboada F., Govedarica M. Long-Term Monitoring of Inland Water Quality Parameters Using Landsat Time-Series and Back-Propagated ANN: Assessment and Usability in a Real-Case Scenario. *Remote Sensing*. 2024; 16(1):68. DOI:<https://doi.org/10.3390/rs16010068>
8. DHI. *MIKE 11: A Modelling System for Rivers and Channels*. User Manual. 2017. URL:https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Water_Resources/MIKE11_UserManual.pdf
9. Thingstad T., Frede Hagst røm Åke, Rassoulzadegan Fereidoun. Accumulation of degradable DOC in surface waters: Is it caused by a malfunctioning microbialloop? *Limnology and Oceanography*, 1997. 42. DOI: <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.2.0398>
10. ICPDR. *Danube River Basin Management Plan*. International Commission for the Protection of the Danube River. 2021. URL: <https://dev.icpdr.org/tasks-topics/tasks/river-basin-management/danube-river-basin-management-plan-2021>
11. Slobodnik J., von der Ohe P.C. Identification of the Danube River Basin Specific Pollutants and Their Retrospective Risk Assessment. In: Liska, I. (eds) *The Danube River Basin. The Handbook of Environmental Chemistry*, 2015. vol 39. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/698_2015_378
12. Arnold J.G., Fohrer N. SWAT2000: Current Capabilities and Research Opportunities in Applied Watershed Modelling. *Hydrological Processes*, 2005. 19, 563-572. DOI:<https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
13. Васенко О. Г., Брук В. В., Карлюк А. А., Свиридов Ю. В. Прогнозування якості води в річках Дунай та Сіверський Донець за допомогою геоінформаційних технологій. *World Science*. 2019; 11(51). С. 45-49. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30112019/6766
14. Спільні Дунайські Дослідження 4: результати наймасштабнішого дослідницького моніторингу поверхневих вод у світі. Державне агентство водних ресурсів України. 2021. <https://davr.gov.ua/news/spilni-dunajski-doslidzhennya-4-rezultati-najmasshtabnishogo-doslidnickogo-monitoringu-poverhnevih-vod-u-sviti>
15. Спільний План управління річковим басейном Дунаю: міжнародний досвід. Державне агентство водних ресурсів України. 2022. URL: <https://davr.gov.ua/news/spilnij-plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-dunayu-mizhnarodnij-dosvid>
16. Savu, E.A. & Drobot, R. 2D Hydrodynamic Model Development for a Critical Sector of the Danube River. *Modelling in Civil Environmental Engineering*, 2021, Sciendo, vol. 16 no. 1, pp. 12-24. DOI: <https://doi.org/10.2478/mmce-2021-0002>
17. Topa C., Murariu G., Calmuc V., Calmuc M., Arseni M., Serban C., Chitescu C., Georgescu L. A Spatial–Seasonal Study on the Danube River in the Adjacent Danube Delta Area: Case Study—Monitored Heavy Metals. *Water*, 2024. 16(17), 2490. DOI:<https://doi.org/10.3390/w16172490>
18. Stanković I., Hanžek N., Mischke U. et al. Phytoplankton biomass and functional composition in the Danube River and selected tributaries: a case study Joint Danube Survey 4. *Hydrobiologia* 2024. 851, 973–998. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10750-023-05359-4>
19. Безсонний В. Л., Третьяков О.В., Пляцук Л.Д., Некос А.Н. Ентропійний підхід до оцінки екологічного стану водотоку. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2022. Вип. 27. С. 6–19. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-01>
20. Безсонний В. Л., Пономаренко Р. В., Третьяков О. В., Калда Г. С., Асоцький В. В. Моніторинг екологічної безпеки водотоків за кисневими показниками. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. 2021, 10 (2/2021) С. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2021.2.12>

V. L. BEZSONNYI, PhD (Technical), Associate Prof.,

Associate Professor of the Department of Environmental Safety and Environmental Education

e-mail: bezsonny@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>

V. N. Karazin Kharkiv National University,

4, Svobody Sq, Kharkiv, 61022, Ukraine

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

O. V. TRETIAKOV, DSc (Technical), Prof.,

Professor of the Department of Civil and Industrial Safety named after Hero of Ukraine O.S. Chub

e-mail: mega_ovtr@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0095-5846>

State university «Kyiv Aviation Institute»

1, Liubomyra Huzara ave., Kyiv, 03058, Ukraine

A. N. NEKOS, DSc (Geography), Prof.,

Head of the Department of Environmental Safety and Environmental Education

e-mail: alnekos999@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

V. N. Karazin Kharkiv National University,

4, Svobody Sq, Kharkiv, 61022, Ukraine

Ye. V. CHISTOV, master's student of the Karazin Institute of Environmental Science

e-mail: yehor.chistov@student.karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-4703-3825>

V. N. Karazin Kharkiv National University,

4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

PREDICTION OF OXYGEN REGIME INDICATORS IN THE DANUBE RIVER

Purpose. To identify the dynamics of the oxygen regime of the Danube River and to develop a model for forecasting the oxygen regime of the Danube based on the analysis of biochemical oxygen demand (BOD) and reaeration processes, taking into account the multifactorial influence of ecological, hydrological, and anthropogenic factors.

Methods. Statistical, the Streeter-Phelps mathematical model was applied.

Results. The study used long-term data from the state monitoring of water resources of the Danube River on indicators of dissolved oxygen (DO) and biochemical oxygen demand (BOD₅). The research showed an overall improvement in the oxygen regime of the Danube River during the period 2004–2023. All observation points demonstrated a stable increase in DO levels, especially after 2020, which may indicate a reduction in organic pollution. Seasonal analysis revealed that DO levels increase in the cold period and decrease in the warm period due to heightened biological activity. The Streeter-Phelps model confirmed its ability to predict the dynamics of DO and BOD₅ with acceptable accuracy, although discrepancies were observed in some years due to short-term fluctuations in organic loading.

Conclusions. The results of the study confirmed the effectiveness of using the Streeter-Phelps model to forecast the oxygen indicators of the Danube River. The forecast data can be used to assess the ecological state of the river, plan measures to improve water quality, and manage water resources. The developed recommendations will help minimize the risks of oxygen deficiency and support the preservation of ecological balance in the Danube River basin.

KEYWORDS: *oxygen regime, Danube, biochemical oxygen demand, reaeration, Streeter-Phelps model, water monitoring*

References

1. Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*. Academic Press. Retrieved from <https://archive.org/details/limnologylakeriv0003wetz>
2. Streeter, H. W., & Phelps, E. B. (1958). A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River. *US Public Health Service Bulletin*. Retrieved from <https://udspace.udel.edu/items/03d5883b-d6e7-4cf6-8a35-e14f9190302f>
3. Kundzewicz, Z.W., Krysanova, V. (2010). Climate change and stream water quality in the multi-factor context. *Climatic Change* 103, 353–362 <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9822-9>.
4. Smith, V.H. (2003). Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. *Environ Sci & Pollut Res* 10, 126–139 <https://doi.org/10.1065/espr2002.12.142>
5. Chapra, S. C. (2008). *Surface Water-Quality Modeling*. Waveland Press. Retrieved from <https://pdfcoffee.com/surface-water-quality-modeling-chapra-pdf-free.html>

6. Rustam, F, Ishaq, A, Kokab, ST, de la Torre Diez I, Mazón, JLV, Rodríguez, CL, Ashraf I. (2022). An Artificial Neural Network Model for Water Quality and Water Consumption Prediction. *Water*; 14(21):3359. <https://doi.org/10.3390/w14213359>
7. Jakovljevic, G, Álvarez-Taboada, F, Govedarica, M. (2024). Long-Term Monitoring of Inland Water Quality Parameters Using Landsat Time-Series and Back-Propagated ANN: Assessment and Us ability in a Real-Case Scenario. *Remote Sensing*., 16(1), 68. <https://doi.org/10.3390/rs16010068>
8. DHI. (2017). *MIKE 11: A Modelling System for Rivers and Channels*. User Manual. Retrieved from https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Water_Resources/MIKE11_UserManual.pdf
9. Thingstad T. Frede , Hagström Åke , Rassoulzadegan Fereidoun , (1997), Accumulation of degradable DOC in surface waters: Is it caused by a malfunctioning microbialloop?, *Limnology and Oceanography*, 42. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.2.0398>
10. ICPDR. (2021). *Danube River Basin Management Plan*. International Commission for the Protection of the Danube River. Retrieved from <https://dev.icpdr.org/tasks-topics/tasks/river-basin-management/danube-river-basin-management-plan-2021>
11. Slobodnik, J., von der Ohe, P.C. (2015). Identification of the Danube River Basin Specific Pollutants and Their Retrospective Risk Assessment. In: Liska, I. (eds) *The Danube River Basin. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 39. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/698_2015_378
12. Arnold, J.G. & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: Current Capabilities and Research Opportunities in Applied Watershed Modelling. *Hydrological Processes*, 19, 563-572. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
13. Vasenko O. G., Brook V. V., Karluk A. A., & Sviridov Yu. V. (2019). Prohnozuvannia Yakosti Vody v Richkakh Dunai ta Siverskyi Donets za Dopomohoiu Heoinformatsiinykh Tekhnolohii. *World Science*. 11(51). https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30112019/6766 (in Ukrainian).
14. Joint Danube Studies 4: results of the largest surface water monitoring research in the world. (2021). State Agency of Water Resources of Ukraine.. Retrieved from <https://dav.gov.ua/news/spilni-dunajski-doslidzhennya-4-rezultati-najmasshtabnishogo-doslidnickogo-monitoringu-poverhnevih-vod-u-sviti> (in Ukrainian).
15. Joint Danube River Basin Management Plan: International Experience (2022). State Agency of Water Resources of Ukraine. Retrieved from <https://dav.gov.ua/news/spilnij-plan-upravlinnya-richkovim-basejnom-dunayu-mizhnarodnij-dosvid> (in Ukrainian).
16. Savu, E.A. & Drobot, R. (2021). 2D Hydrodynamic Model Development for a Critical Sector of the Danube River. *Modelling in Civil Environmental Engineering*, 16(1), 12-24. Retrieved from <https://sciendo.com/it/article/10.2478/mmce-2021-0002>
17. Topa, C., Murariu, G., Calmuc, V., Calmuc, M., Arseni, M., Serban, C., Chitescu, C., & Georgescu, L. (2024). A Spatial–Seasonal Study on the Danube River in the Adjacent Danube Delta Area: Case Study—Monitored Heavy Metals. *Water*, 16(17), 2490. <https://doi.org/10.3390/w16172490>
18. Stanković, I., Hanžek, N., Mischke, U., Krisa, H., Velická, Z., T-Krasznai, E., Kiss, K.T., Belkinova, D., Bălan, M., Amăriucăi, V., Diaconu I. & Borics G. (2024). Phytoplankton biomass and functional composition in the Danube River and selected tributaries: a case study Joint Danube Survey 4. *Hydrobiologia*, 851, 973–998. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05359-4>
19. Bezsonnyi, V. L., Tretyakov, O. V., Plyatsuk, L. D., & Nekos, A. N. (2022). Entropy approach to assessment of the ecological state of a water course. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Ecology"*, (27), 6-19. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-01> (in Ukrainian).
20. Bezsonnyi, V., Ponomarenko, R., Tretyakov, O., Kalda, G., & Asotskyi, V. (2021). Monitoring of ecological safety of watercourses by means of oxygen indicators. *Technogenic and ecological safety*, 10(2/2021), 75–83. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/13942> (in Ukrainian).

The article was received by the editors 22.09.2024

The article is recommended for printing 25.11.2024