

УДК 556.5:528.94:51-71

Пічура В. І., докторант, к.с.-г.н., доцент кафедри екології та сталого розвитку (Херсонський державний аграрний університет)
E-mail: pichuravitalii@gmail.com

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВІ ТЕНДЕНЦІЇ ЗМІНИ ТРОФІЧНОГО СТАНУ ВОДОСХОВИЩ РІЧКИ ДНІПРО

Проблеми раціонального водокористування та оцінки якості води є пріоритетними завданнями багатьох держав, особливо в басейнах транскордонних річок. Створення і функціонування каскаду дніпровських водосховищ спричинило корінну трансформацію гідрологічного режиму річки Дніпро. В наслідок цього відбулося значне погіршення фізичних, хімічних і біологічних характеристик якості поверхневих вод, підвищення трофічного їх статусу, зниження ефективності роботи та стабільності функціонування водної екосистеми басейну Дніпра, яке визначається переважно антропогенними чинниками. В результаті дешифрування серії космічних знімків (серпень, 1986-2016 рр.) супутників Landsat-5, Landsat-7 та Landsat-8 із просторовим дозволом в 30 метрів, встановлена просторово-часова тенденція зміни фізичних (прозорість води), гідрохімічних (концентрації вмісту у воді загального фосфору), біологічних (хлорофіл-а) властивостей акваторій водосховищ. В дослідженнях використаний індекс трофічного стану, який розроблений Флоридським департаментом захисту довкілля і використовується для класифікації всіх типів водної поверхні, включаючи річки. Встановлено, що значення індексу трофічного стану у водоймах водосховищ розподілено достатньо нерівномірно від 26,5 до 56,5 із рівнем варіації за роками досліджень в межах 2,1-10,5%, що обумовлено інтенсифікацією або «хімізацією» сільського господарства та змінами клімату, які підсилюють прояви небезпеки акумуляції біогенних речовин в результаті ґрунтово-ерозійних процесів та провокують «цвітіння» води при підвищенні температури у водоймах. Рівень трофічного статусу в межах окремих водосховищ розподілений достатньо нерівномірно і переходить від оліготрофного та мезотрофного в зонах наявності течії, до евтрофного в зонах застою води з підвищеним температурним режимом, що займають до 40% площі каскаду дніпровських водосховищ. Низов'я Дніпра має високий ступінь зарегулювання, на окремих ділянках акваторії індекс трофічного стану перевищує значення 70, що відповідає гіпертро-

фному статусу. Тривале підсилення евтрофікації водоймищ дніпровського каскаду сприяє збільшенню концентрації біогенних елементів, домінуванню в фітопланктоні синьо-зелених водоростей, зниженню прозорості, зростанню вмісту органічної речовини, значному погіршенню екосистеми і зниженню біопродуктивності річки Дніпро. Представлені дослідження трофічного статусу каскаду дніпровських водосховищ мають високу науково-практичну цінність для визначення проблемних ділянок їх акваторій та подальшої першочергової розробки обґрунтованих просторово-адаптивних комплексних і системних природоохоронних заходів та підвищення екологічної стійкості і поступового оздоровлення екосистеми басейну річки Дніпро.

Ключові слова: фізичні, гідрохімічні, біологічні властивості води, трофічний стан, річка Дніпро, дніпровські водосховища, просторово-часові зміни, дешифрування, дистанційне зондування Землі.

Погіршення екологічного стану водних об'єктів веде не тільки до їх деградації, а й до проблем їх водогосподарського використання. Відбувається це на фоні скорочення мережі спостережень в системі державного моніторингу і ослаблення контролю за впливом на водні об'єкти антропогенної діяльності. Тому ефективно управління водними ресурсами є одним з важливих глобальних завдань, що стоїть перед людством. Проблеми раціонального водокористування та оцінки якості води є пріоритетними завданнями багатьох держав, особливо в басейнах транскордонних річок. Вивчення якості води проводяться на основі регулярних натурних вимірювань показників, що є достатньо трудомістким і економічно витратним процесом, який не охоплює всю площу водного об'єкта, крім того, спостереження мають дискретний характер і, при інтерполяції експериментальних даних, результати мають низьку просторову точність. Системне використання, поряд з натурними вимірами, мультиспектральних супутникових знімків являється необхідним для оптимізації досліджень та розширення масивів даних про стан водних об'єктів [1]. Тому важливим напрямком у моніторингу екологічного стану водних об'єктів є застосування космічних даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що забезпечує унікальну можливість безконтактного дослідження та широкомасштабної просторово-часової оцінки стану водних об'єктів для створення інформаційної бази спеціалізованих водних геоінформаційних систем. Екологічний стан водного об'єкта характеризується рядом ознак, які добре виявляються і кількісно вимірюються за допомогою мультиспектральних космічних знімків. Для більшості водосховищ актуальна проблема погіршення властивостей води в

результаті евтрофікації – різкого підвищення біологічної продуктивності зелених водоростей (найчастіше спровокованою антропогенною діяльністю), що призводить до негативних наслідків для всієї екосистеми водойми. Вибіркові польові дослідження, проведені у акваторії, дозволяють безперешкодно перейти до чисельних показників обсягу зважених часток в разі механічного і біологічного забруднення. Біологічне забруднення водойм обумовлено накопиченням у водній масі з'єднань так званих біогенних речовин – сполук фосфору і азоту, які впливають на різке зниження вмісту кисню у воді, підвищення рН, випадання в осад карбонату кальцію, гідроксиду магнію. Вміст усіх цих речовин має пряму або зворотну просторову кореляцію з об'ємом та ступенем біологічного забруднення водойм і на основі вибіркового відбору проб на хімічний аналіз може бути оцінено і зафіксовано картографічними методами по всій акваторії водоймища [2].

В наукових роботах багатьох вчених [3-6] представлені методологічні підходи, алгоритми обробки даних дистанційного зондування Землі, їх перспективи використання та практичні переваги для оцінки змін прибережної зони водосховищ, комплексного вивчення змін властивостей та екологічного стану водних об'єктів (температура прогріву, мутність або прозорість, концентрації хлорофілу-а, біогенних речовин, трофічний стан тощо), в тому числі для окремих водосховищ річки Дніпро.

Мета досліджень – визначити просторово-часову тенденцію зміни трофічного стану водосховищ річки Дніпро за останні 30 років на основі даних космічних знімків дистанційного зондування Землі.

Матеріали і методи досліджень. В дослідженнях використано індекс трофічного стану (ІТС), який розроблено Флоридським департаментом захисту довкілля для класифікації всіх типів водної поверхні, включаючи річки. Шкала цього індексу є числовою (табл. 1) і кожна основна область трофічного ділення представляє собою подвоєння концентрації поверхневої біомаси фітопланктону, яка робить класифікацію трофічного стану більш прийнятною. Кількісний опис стану водойми надзвичайно важливий при виборі стратегії охорони його екосистеми. Більшість озерних екосистем ділять континуум трофічного стану водойм на п'ять класів: ультраоліготрофне, оліготрофне, мезотрофне, евтрофне і гіперевтрофне [7].

Значення ІТС можна розрахувати за трьома показниками: фізичними (прозорість води, яка визначається за індексом Секі – ПДС), гідрохімічними (концентрації вмісту у воді загального фосфору – Р), біологічними і біохімічними (хлорофіл-а – Хла, біомаса фітопланктону – Б_ф) [8].

Таблиця 1

Шкала індексу трофічного стану (ІТС) і зв'язок із нею індикаторів трофічного стану водних об'єктів

Тип трофічного статусу	ІТС	Прозорість води за диском Секі (ПДС), м	Фосфор (P), мкг/дм ³	Хлорофіл «а» (Хла), мкг/дм ³
Ультраоліготрофний, дуже чиста	0	64	0,75	0,04
	10	32	1,5	0,12
Оліготрофний, чиста	20	16	3	0,34
	30	8	6	0,94
Мезотрофний, слабо забруднена	40	4	12	2,6
	50	2	24	6,4
Евтрофний, помірно забруднена	60	1	48	20
	70	0,5	96	56
Гіперевтрофний, брудна	80	0,25	192	154
	90	0,12	384	427
	100	0,062	786	1183
Розрахунок ІТС на основі окремих показників			Розрахунок показників трофічного стану водних об'єктів на основі ІТС	
$ITS = 60 - 14,41Ln(ПДС)$ $ITS = 4,15 + 14,42Ln(P)$ $ITS = 30,6 + 9,81Ln(Хла)$			$ПДС = 64,31 \exp(-0,0695ITS)$ $P = 0,748 \exp(0,0694ITS)$ $Хла = 0,042 \exp(0,1025ITS)$	

Значення вмісту загального фосфору дає можливість визначити та оцінити характер впливу різних антропогенних джерел на біогенне забруднення і процес евтрофікації у всіх типах водних об'єктів. Це дає можливість спрогнозувати потенціальну біомасу первинної продукції у водоймах в результаті антропогенної евтрофікації із застосуванням ДЗЗ. В основі дешифрування космічних знімків є дослідження світлопоглинаючих та світлорозсіюючих властивостей природних вод, саме ступінь прозорості води забезпечує можливість визначити трофічний стан каскаду водосховищ. Антропогенна евтрофікація водосховищ проявляється в просторовій неоднорідності розвитку планктонних водоростей, що призводить до значного зниження прозорості води, яка в основному обумовлена вмістом в ній різних окрашених розчинених та зважених речовин. Варіація концентрації хлорофілу-а змінює відбивну здатність води – із збільшенням його концентрації зменшується відбивна можливість води у синіх і збільшує в зелених довжинах хвиль.

Індекс трофічного стану каскаду дніпровських водосховищ розрахований за формулою Ф.Т. Шумакова [9]:

$$ITC = 82,02 - 31,88TM1/TM2 + 1,13TM4; r = 0,85, r^2 = 0,73,$$

де $TM1$ і $TM2$, $TM4$ – значення яскравості відбивного каналу.

Просторово-часова оцінка трофічного стану здійснена на основі дешифрування серій космічних знімків (серпень, 1986-2016 рр.) супутників Landsat-5, Landsat-7 та Landsat-8 із просторовим дозволом в 30 метрів. Для дешифрування та створення тематичних карт використані ліцензійні програмні продукти ENVI+IDL 4.4 і ArcGIS 10.1.

Результати досліджень та їх обговорення. До створення каскаду водосховищ зміна рівня води в р. Дніпро характеризувалося яскраво вираженою високою весняною повінню, низьким рівне стояння в літню і зимову межені та невисокими осінніми паводками, але створення каскаду водосховищ із загальною площею дзеркала 6981 км² докорінно змінив гідрологічний режим річки Дніпро, який набув озерних рис. Водосховища указані за напрямком течії р. Дніпро: Київське (заповнено у 1964-1966 рр., площа – 922 км²) → Канівське (заповнено у 1974-1976 рр., площа 675 км²) → Кременчуцьке (заповнено у 1959-1961 рр., площа – 2252 км²) → Дніпродзержинське (побудовано у 1964 р., площа – 567 км²) → Дніпровське (побудовано у 1932 р., відновлено після Другої світової війни у 1948 р., площа – 410 км²) → Каховське (заповнено у 1955-1958 рр., площа – 2155 км²). У водосховищах різко знизилася швидкість течії води – від 0,6-0,8 м/с до 0,3-0,02 м/с. Залежно від морфометричних особливостей, положення в каскаді водосховища та сезону року, зменшився водообмін і проточність до 24 разів, що зумовило створення застійних зон.

Збільшення температури води відбувається від верхнього Київського водосховища до пригребливої частини нижнього Каховського водосховища. Це збільшення в різні місяці коливається від 0,2 до 7,4° С. Відповідні гідрологічні та температурні зміни режиму призводять до просторово-часової інтенсифікації проявів антропогенного впливу на евтрофікаційний стан водойм, що спричиняє розвиток планктонних водоростей, значного зниження прозорості води та погіршення трофічного стану водосховищ. Принциповим моментом при оцінці процесу евтрофікації є визначення трофічного стану водойм, яке фактично відображає метаболізм екосистеми (надходження, накопичення і витрачання енергії) та екологічний стан. Надходження

надлишкової кількості біогенних речовин в результаті антропогенного забруднення призводить до суттєвих змін в екосистемах водосховищ і прискоренню сукцесійних процесів. Евтрофікація водосховищ залежить не тільки від навантаження на водойми біогенних речовин, але і від умов розвитку автотрофних гідробіонтів, тобто від кліматичних, гідродинамічних і морфологічних особливостей водойм. Лімітувати цвітіння при достатній концентрації поживних речовин можуть низька температура, недостатня сонячна радіація, високі швидкості течій, велика глибина, мутність води і інші екологічні чинники. Найбільш сильно евтрофікація відбувається в добре прогрітих і освітлених мілководних ділянках, що займають до 40% площі каскаду дніпровських водосховищ. Процес евтрофікації розглядається як наслідок порушення стійкості водних екосистем, що принципово відрізняє його від поняття забруднення.

Сьогодні екосистемі річки Дніпро завдано значної шкоди. Висока сільськогосподарська освоєність, скидання стічних вод, інтенсивна забудова прибережних смуг та інше призводить до інтенсифікації процесів антропогенної евтрофікації у водах каскаду дніпровських водосховищ і без впровадження необхідних природоохоронних заходів настане час, коли ці процеси стануть вже незворотними. У водосховищах процеси антропогенної евтрофікації досягають меж, які перевищують можливість самоочищення природних вод в процесі природного біотичного кругообігу.

Одним із найбільш інформативних показників оцінки рівня та встановлення трофічного статусу водних об'єктів є вміст хлорофілу-а. Встановлено, що найбільшу статистичну залежності з матеріалами дистанційного зондування мав вміст хлорофілу-а – основний пігмент зелених рослин, в тому числі одноклітинних водоростей (фітопланктону). З кількох десятків пігментів, що містяться в фотосинтетичному апараті водоростей, хлорофілу-а відведена найважливіша роль в процесі фотосинтезу. Інформація про концентрацію хлорофілу-а і її зміни у водному об'єкті є критерієм для оцінки запасів і продукції біомаси фітопланктону, а також індикатором забруднення вод. За роки досліджень концентрація хлорофілу-а (Хла) в серпні у водах каскаду дніпровських водосховищ находилась в межах 0,2-31,7 мкг/дм³: Київське (Хла – 1,0-15,1 мкг/дм³) → Канівське (Хла – 0,2-17,3 мкг/дм³) → Кременчуцьке (Хла – 0,5-31,7 мкг/дм³) → Дніпродзержинське (Хла – 0,5-17,5 мкг/дм³) → Дніпровське (Хла – 0,5-18,2 мкг/дм³) → Каховське (Хла – 0,4-17,4 мкг/дм³). Важливою характеристикою, яка використовується при оцінці трофічного стану водойми є сезонний хід динаміки фітопланктону. Так, для оліготрофних

водойм характерна наявність одного невеликого максимуму біомаси навесні, для мезотрофних – наявність на початку літа депресій на фоні помірного розвитку водоростей, а в евтрофних водоймах протягом усього сезону може спостерігатися дуже значна біомаса фітопланктону [10].

Вміст основного пігменту зелених рослин хлорофілу-а вважається універсальною еколого-фізіологічною характеристикою розвитку і фотосинтетичної активності водоростей, що дозволяє представляти біомасу в одиницях цього найважливішого компонента рослинної клітини. Раніше визначені [11] рекомендовані розрахункові величини вмісту хлорофілу-а в одиниці біомаси фітопланктону (Хл/Б) для водойм різної трофності: для оліготрофних вод – 0,18; мезотрофних і евтрофних – 0,40; високоевтрофних або гіперевтрофних вод – 1,03.

Комунально-побутові і сільськогосподарські стічні води, що надходять у водосховища, містять значну концентрацію азоту і фосфору, в результаті чого у дніпровських водосховищах накопичується значна кількість забруднюючих речовин, що сприяє «цвітінню» води. Оцінка трофічного статусу водойми, як правило, базується на кількісних залежностях показників біологічної продуктивності вод від вмісту в них елементів мінерального живлення (азоту і фосфору), забезпеченість якими має значний вплив на розвиток і фотосинтез фітопланктону [12; 13]. Результати численних досліджень евтрофікації природних вод показують, що у водоймах пріоритет віддається фосфору – за сучасними оцінками в більш ніж 80% досліджених водойм первинне продукування лімітується цим елементом, до того ж зниження концентрації фосфору у водоймах не супроводжується швидким падінням їх біологічної продуктивності та інтенсивності впливу на розвиток фітопланктону. За даними дешифрування космічних знімків в період досліджень концентрація фосфору (P) в серпні у водах каскаду дніпровських водосховищ находилась в межах 2,5-66,4 мкг/дм³: Київське (P – 6,5-40,2 мкг/дм³) → Канівське (P – 2,5-44,8 мкг/дм³) → Кременчуцьке (P – 4,1-66,4 мкг/дм³) → Дніпродзержинське (P – 4,1-44,4 мкг/дм³) → Дніпровське (P – 3,8-45,7 мкг/дм³) → Каховське (P – 3,6-44,3 мкг/дм³). Надходження загального фосфору в прибережні води Чорного моря зі стоком річки Дніпро за останні 60 років збільшилося в 6,7 разів (з 1,7 до 11,4 тис. т/рік) [14-16], що є результатом посилення евтрофікації во-

досховищ дніпровського каскаду та підтримки необхідного рівня мінерального живлення надлишкового фітопланктону.

З фізичних показників для оцінки трофічного стану водних екосистем враховується лише прозорість води, яка визначається за глибиною видимості диска Секі. Через простоту цей метод широко використовується для наближеної оцінки стану водойм. Зв'язки між прозорістю, біологічними та гідрохімічними показниками трофічного стану водних об'єктів всебічно представлені у працях О.П. Мусатова [17]. Запропоновані ним статистичні залежності дозволяють описати розвиток окремих трофічних ланцюгів водних екосистем за різними індикаторами трофічного статусу, потокам енергії через екосистеми і взаємозв'язкам окремих параметрів. За результатами дешифрування космічних знімків визначено, що за останні 30 років в серпні місяці прозорість за диском Секі (ПДС) вод каскаду дніпровських водосховищ варіювало в межах 1,1-19,4 метри: Київське (ПДС – 1,2-7,4 м) → Канівське (ПДС – 1,1-19,4 м) → Кременчуцьке (ПДС – 0,7-11,6 м) → Дніпродзержинське (ПДС – 1,1-11,6 м) → Дніпровське (ПДС – 1,0-12,6 м) → Каховське (ПДС – 1,1-13,0 м).

Серія тематичних растрових моделей та статистичні характеристики просторово-часової неоднорідності розподілу індексу і показників трофічного стану каскаду дніпровських водосховищ у серпні представлена на рис. 1-7. Використання картографічного матеріалу дозволили відстежити процес просторово-часових змін впливу антропогенної діяльності на трофічний стан води у шести водосховищах за 1986-2016рр. Спостерігаються зональне тренд-циклічне збільшення індексу трофічного стану (рис. 1) від верхнього Київського водосховища до пригребливої частини нижнього Каховського водосховища.

Це переважно є наслідком перенесення біогенних речовин і їх додаткового надходження за течією річки Дніпро в результаті господарської діяльності. Найбільші значення ІТС по всьому каскаду водосховищ спостерігалось у 2010 р., найменші – 2001 р.

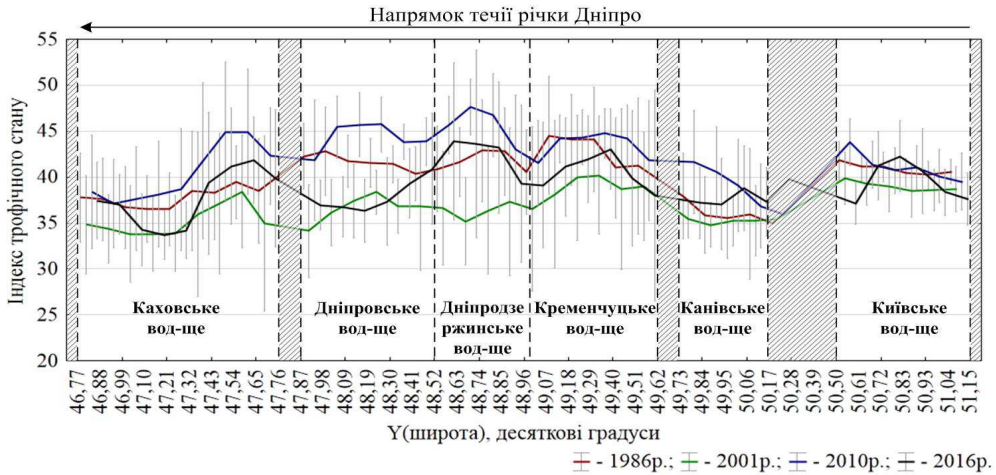


Рис. 1. Зональний розподіл індексу трофічного стану у каскадах дніпровських водосховищ за серпень 1986-2016 років

За останні 30 років стік річки Дніпро та розораність її басейну практично не змінилися, тому основними чинниками варіації ІТС за окремими роками є інтенсифікація або «хімізація» сільського господарства та зміни клімату, які підсилюють прояви небезпеки акумуляції біогенних речовин в результаті ґрунтово-ерозійних процесів та провокують «цвітіння» води при підвищенні температури у водоймах. Більш холодна температура водної поверхні та низькі значення ІТС свідчать про наявність течії, а зони застою води мають підвищений температурний режим, який призводить до акумуляції біогенних речовин, активного розвитку планктонних водоростей і підвищення значення ІТС у водоймах. На прикладі Каховського водосховища встановлено міцну степеневу кореляційну залежність впливу температури повітря (T) на формування трофічного стану (ІТС) водойм, яка має вигляд: $ІТС = 7,95 \cdot 10^{-15} T^{10,56} + 36,0; r^2 = 0,71$.

Каскад водосховищ широко використовуються для рибальства, рекреаційних цілей, а також для господарчо-побутових потреб. Тому для оцінки перспектив водокористування особливе значення має визначення продуктивності водоймищ, яку можна характеризувати мірою трофності вод. Значення ІТС у водосховищах варіює в межах 26,5-56,5, що відповідає оліготрофному ($ІТС \leq 30$), мезотрофному ($30 < ІТС \leq 50$) і евтрофному ($50 < ІТС \leq 70$) статусу водних об'єктів.

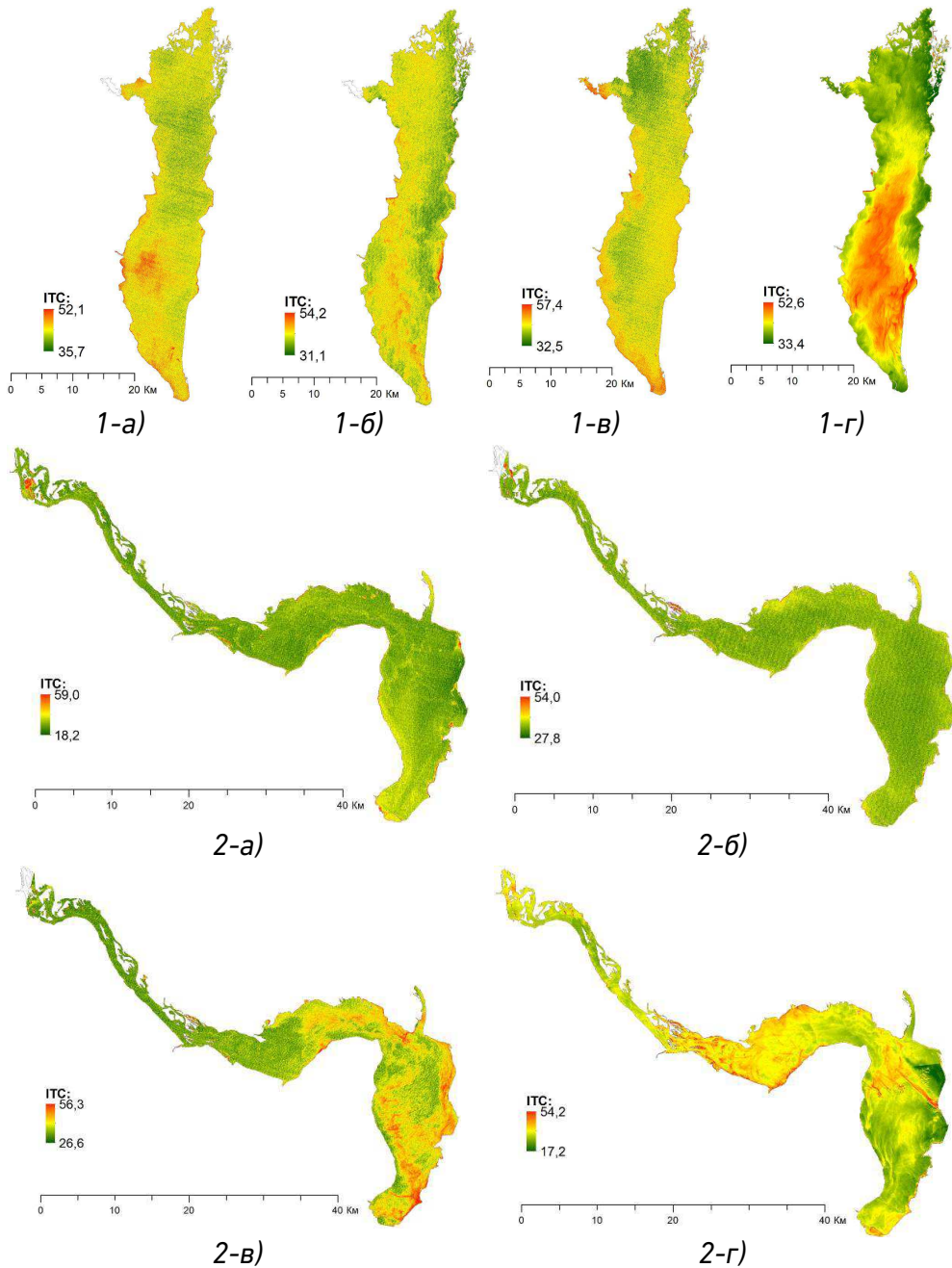


Рис. 2. Закономірності просторово-часової зміни індексу трофічного стану (ІТС) в серпні у Київському (1) та Канівському (2) водосховищах за 1986-2016 роки на основі даних ДЗЗ: а) 1986 р., б) 2001 р., в) 2010 р., г) 2016, д) просторовий розподіл ІТС за роками досліджень

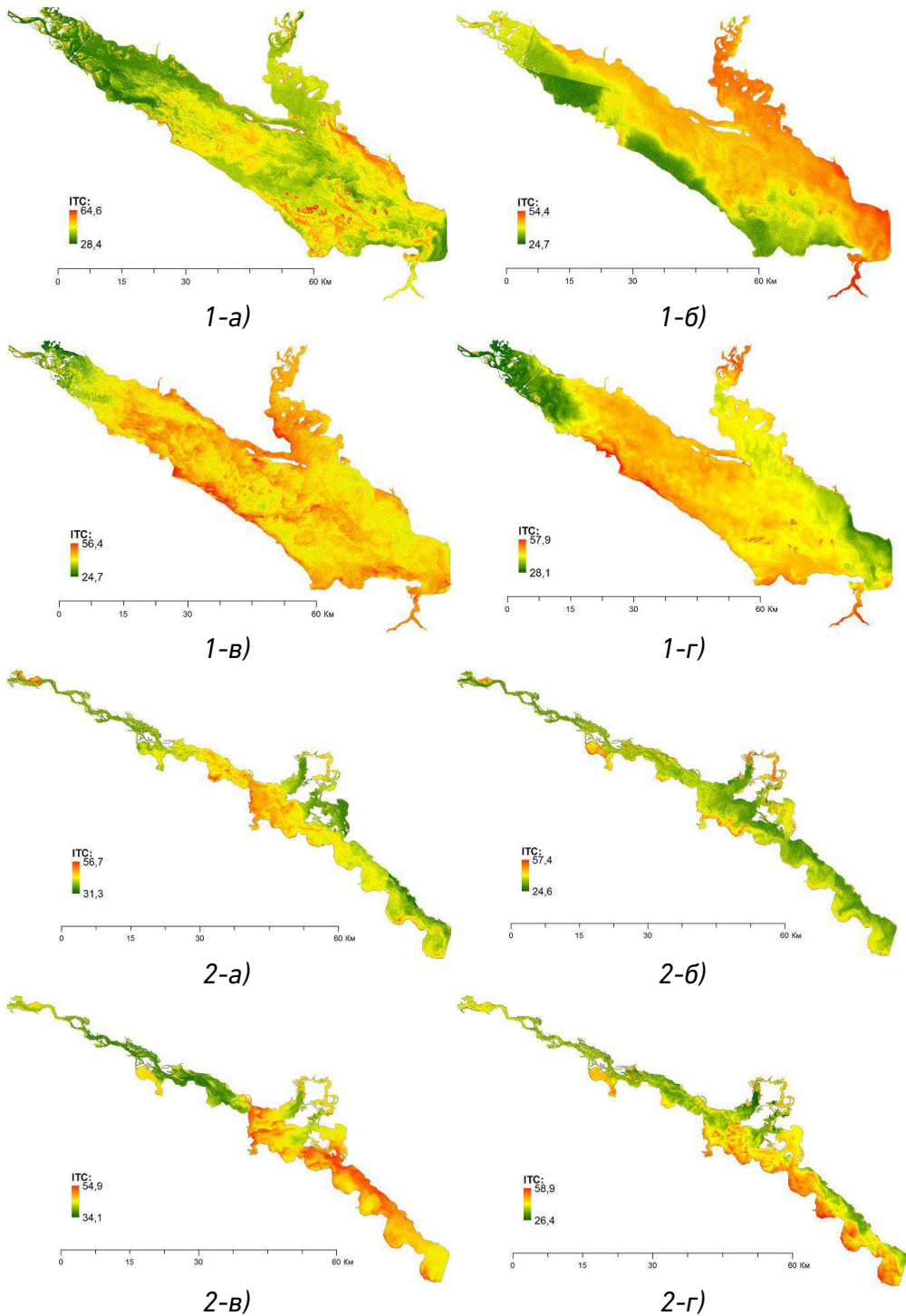


Рис. 3. Закономірності просторово-часової зміни індексу трофічного стану (ІТС) в серпні у Кременчуцькому (1) та Дніпродзержинському (2) водосховищах за 1986-2016 роки на основі даних ДЗЗ: а) 1986 р., б) 2001 р., в) 2010 р., г) 2016, д) просторовий розподіл ІТС за роками досліджень

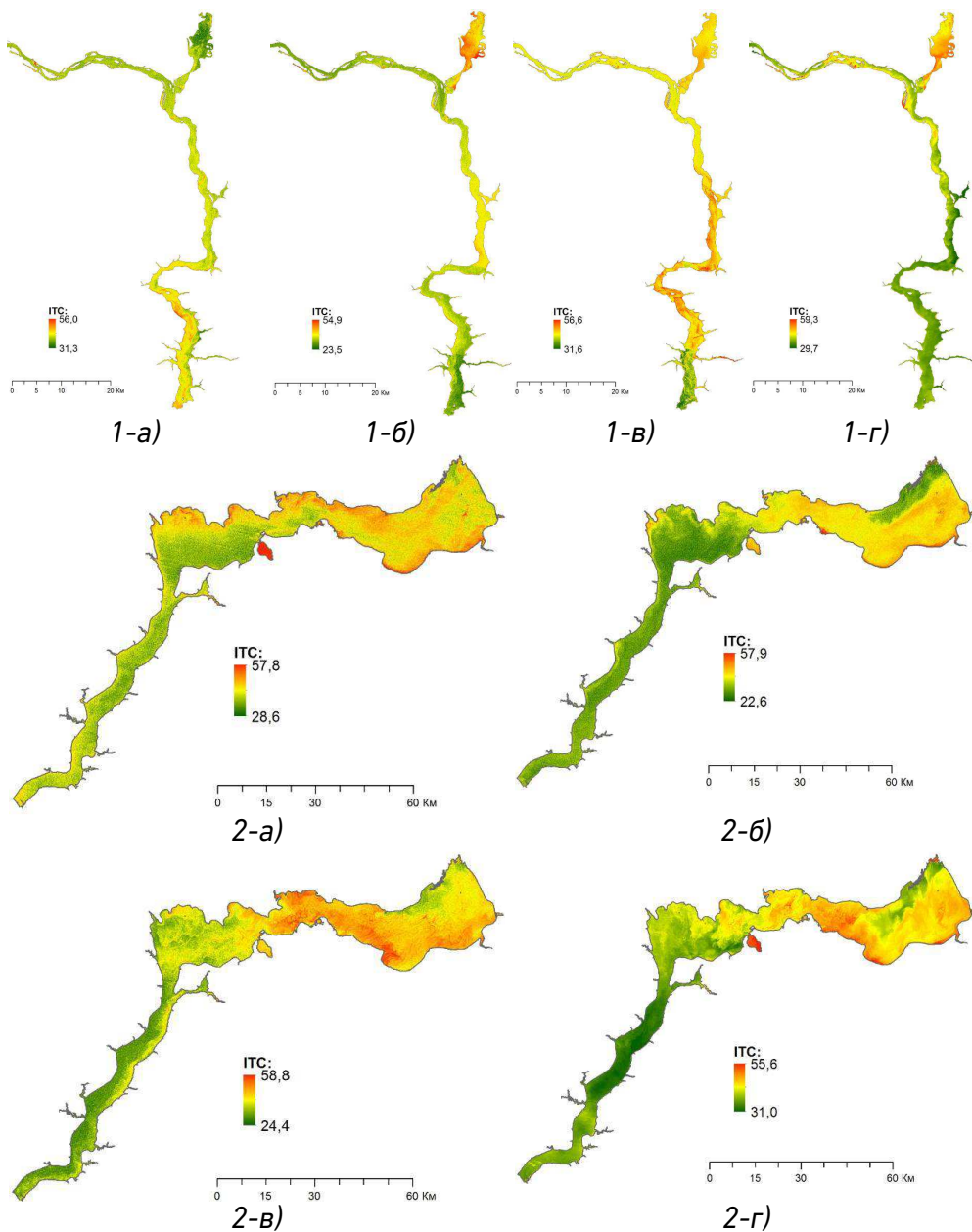


Рис. 4. Закономірності просторово-часової зміни індексу трофічного стану (ІТС) в серпні у Дніпровському (1) та Каховському (2) водосховищах за 1986-2016 роки на основі даних ДЗЗ: а) 1986 р., б) 2001 р., в) 2010 р., г) 2016 р., д) просторовий розподіл ІТС за роками досліджень

Середнє значення (\bar{X} (min-max)) і рівень варіації (V , %) ІТС в каскаді дніпровських водосховищ за роками досліджень становило: Київському \bar{X} – 38,8-40,7 (31,1-57,4), V – 2,12-6,34%; Канівському \bar{X} – 35,1-38,0 (17,2-59,0), V – 3,88-7,03%; Кременчуцькому \bar{X} – 39,4-44,3

(24,7-64,6), V – 3,94-9,60%; Дніпродзержинському \bar{X} – 36,3-45,3 (24,6-58,9), V – 6,08-11,08%; Дніпровському \bar{X} – 36,8-44,3 (23,5-59,3), V – 4,97-8,10%; Каховському водосховищі \bar{X} – 36,8-43,3 (22,6-58,8), V – 6,58-10,45%. Оліготрофний і мезотрофний статус водосховищ забезпечує здорові умови для розвитку гідробіонтів, рекреаційного та господарчо-побутового використання, евтрофні води є помірно забрудненими та прийнятні для лову риби і рекреаційного використання. Низов'я Дніпра, яке розташоване нижче дамби Каховського водосховища, має високий ступінь зарегулювання і на окремих ділянках досліджень ІТС становить більше 70 і мають гіпертрофний стан, що не відповідає рибогосподарським, рекреаційним і господарчо-побутовим критеріям використання цих вод.

Для захисту водних об'єктів басейну Дніпра від забруднення біогенними речовинами при сільськогосподарської діяльності пропонується комплекс організаційно-господарських, агротехнічних і спеціальних заходів. *Організаційно-господарські заходи* – встановлення оптимального співвідношення сільськогосподарських угідь, раціональне використання і захист від ерозії орних земель шляхом введення польової сівозміни; підвищення продуктивності, раціональне використання і охорона від ерозії природних кормових угідь шляхом введення сінокісних оборотів, посіву багаторічних трав та ін.; регулювання стоку талих і зливових вод. *Агротехнічні заходи* – впровадження ґрунтозахисних сівозмін; використання науково обґрунтованої системи удобрення ґрунту. *Гідротехнічні та гідромеліоративні заходи* – створення протиерозійних гідротехнічних споруд на водозабірній площі, а також у верхніх і нижніх частинах ярів; створення ставків-накопичувачів дренажного стоку; будівництво біоінженерних споруд, використання дренажно-скидних вод для повторного зрошення. *Лісомеліоративні заходи* – створення полезахисних лісових смуг, водозахисних регулюючих лісонасаджень на ярових системах, зрошуваних землях, на берегах річок і каналів, біля водоймищ, ставків, на осушуваних землях і пасовищах; збереження і відновлення заростей очерету, рогозу, осоки та інших рослин на берегах річок і озер, біля водозабірних споруд у вигляді фільтраційних смуг, а також створення таких смуг на шляху скидання стічних і дренажних вод.

Висновки. Дані дистанційного зондування Землі мають важливу роль у вирішенні завдань моніторингу екологічного стану великих водних об'єктів (зокрема, водосховищ), які із достатньо високим ступенем функціональної апроксимації забезпечують можливість створення тематичних карт та визначення просторово-часових закономірностей зміни екологічного стану водних екосистем. Створення і фу-

нкціонування каскаду дніпровських водосховищ спричинило корінну трансформацію гідрологічного режиму річки Дніпро. В наслідок цього відбулося значне погіршення фізичних, хімічних і біологічних характеристик якості поверхневих вод, підвищення трофічного їх статусу, зниження ефективності роботи та стабільності функціонування водної екосистеми басейну Дніпра, яке визначається в більшій мірі антропогенними чинниками. В результаті дешифрування космічних знімків встановлена просторово-часова тенденція зміни фізичних (прозорість води), гідрохімічних (концентрації вмісту у воді загально-го фосфору), біологічних (хлорофіл-а) властивостей акваторій водосховищ. Встановлено, що значення індексу трофічного стану у водоймах водосховищ розподілено достатньо нерівномірно від 26,5 до 56,5 із рівнем варіації за роками досліджень в межах 2,1-10,5%, що обумовлена інтенсифікацією або «хімізацією» сільського господарства та змінами клімату, які підсилюють прояви небезпеки акумуляції біогенних речовин в результаті ґрунтово-ерозійних процесів та провокують «цвітіння» води при підвищенні температури у водоймах. Рівень трофічного статусу в межах окремих водосховищ розподілений достатньо нерівномірно і переходить від оліготрофного та мезотрофного в зонах наявності течії, до евтрофного в зонах застою води з підвищеним температурним режимом, що займають до 40% площі каскаду дніпровських водосховищ. Низов'я Дніпра має високу ступінь зарегулювання і на окремих ділянках акваторії індекс трофічного стану перевищує значення 70, що відповідає гіпертрофному статусу. Тривале підсилення евтрофікації водоймищ дніпровського каскаду сприяє збільшенню концентрації біогенних елементів, домінуванню в фітопланктоні синьо-зелених водоростей, зниження прозорості, зростання вмісту органічної речовини, значного погіршення екосистеми і зниження біопродуктивності річки Дніпро. Представлені дослідження трофічного статусу каскаду дніпровських водосховищ мають високу науково-практичну цінність для визначення проблемних ділянок їх акваторій та подальшої першочергової розробки обґрунтованих просторово-адаптивних комплексних і системних природоохоронних заходів та підвищення екологічної стійкості і поступового оздоровлення екосистеми басейну річки Дніпро.

1. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Иваньковского водохранилища / Тихомиров О. А., Бочаров А. В., Комиссаров А. Б., Хижняк С. Д., Пахомов П. М. // Вестник ТвГУ. Серия «Химия». – 2016. – № 2. – С. 230–244.
2. Абросимов А. В. Возможности практического использования данных ДЗЗ из космоса для мониторинга водных объектов / Абросимов А. В.,

Дворкин Б. А. // Геометика. – 2009. – № 4. – С. 54–63. **3.** Грищенко Е. В. Использование данных спутника Landsat-8 для оценки экологического состояния Каховского водохранилища / Грищенко Е. В. – Режим доступа: http://gis.dp.ua/conf2016-ublications/sections/ecology/2_GRICHSHENKO.pdf.

4. Бочаров А. В. Использование данных дистанционного зондирования для оценки изменений прибрежной зоны водохранилищ / Бочаров А. В., Тихомиров О. А. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17. – № 4 (4). – С. 625–632. **5.** Загородняя С. А. Исследование экологического состояния Кременчугского водохранилища в пределах Черкасской области методами ДЗЗ / С. А. Загородняя, Н. А. Шевякина, М. И. Новик, И. В. Радчук // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия: География. – 2010. – Т. 23(62). – № 2. – С. 84–91. **6.** Силкин К. Ю. Методика оценки экологического состояния Воронежского водохранилища по материалам многозонального дистанционного зондирования / Силкин К. Ю. // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2012. – № 1. – С. 220–223. **7.** Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология / Б. Хендерсон-Селлерс [пер. с англ. под ред. К. Я. Кондратьева]. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 335 с. **8.** Carlson R.E. A Trophic State Index for lakes / R.E. Carlson. // Limnol. And Oceanography. – 1977. – 22(2). – P. 361–369. **9.** Шумаков Ф. Т. Разработка методов космического мониторинга трофического состояния водоемов / Шумаков Ф. Т. // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия «География». – 2011. – Том 24(63). – № 3. – С. 162–172. **10.** Трифонова И. С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона / И. С. Трифонова. – Л. : Наука, 1990. – 184 с. **11.** Минеева Н. М. Содержание хлорофилла-а в единице биомассы фитопланктона (обзор) / Минеева Н. М., Щур Л. А. // Альгология. – 2012. – Т. 22. – № 4. – С. 423–437. **12.** Муравьев А. Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами / А. Г. Муравьев. – Санкт-Петербург : Крисмас, 1988. – 224 с. **13.** Науменко М. А. Эвтрофирование озёр и водохранилищ. Учебное пособие / М. А. Науменко. – Санкт-Петербург : Изд. РГГМУ, 2007. – 100 с. **14.** Стан довкілля Чорного моря. Національна доповідь України 1996–2000 роки. Міністерство екології та природних ресурсів України. – Одеса : Астропринт, 2002. – 80 с. **15.** Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV, Черное море. – Вып. 2. Гидрохимические условия и океанографические основы формирования биологической продуктивности. – С.-Пб. : Гидрометеиздат, 1992. – 219 с. **16.** Динамика поступления соединений фосфора в украинские прибрежные воды Черного моря и комплекс водоохраных мероприятий / Кресин В. С., Еременко Е. В., Захарченко М. А., Юрченко А. И. // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2008. – № 5. – С. 28–33. **17.** Мусатов А. П. Оценка параметров экосистем внутренних водоемов / А. П. Мусатов. – М. : Научный мир, 2001. – 192 с. **18.** Брызгалов В. А. Методы биоиндикации и биотестирования природных вод / В. А. Брызгалов, Т. А. Хоружей. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. – 276 с. **19.** Гусев М. В. Микробиология / М. В. Гусев, Л. А. Минеева. – М. : МГУ, 1992. – 384 с.

References

1. Tykhomyrov O. A., Bocharov A. V., Komysarov A. B., Khyzhniak S. D., Pakhomov P. M. Yspolzovanye dannykh sensora Landsat 8 (OLI) dlia otsenky pokazatelei mutnosti, tsvetnosti y sodержaniya khlorofylla v vode Yvankovskoho vodokhranylyshcha / Vestnyk TvHU. Seryia «Khymyia». – 2016. – № 2. – S. 230–244.
2. Abrosymov A. V., Dvorkyn B. A. Vozmozhnosti praktycheskoho yspolzovaniya dannykh DZZ iz kosmosa dlia monytorynha vodnykh ob'ektov // Neometyka. – 2009. – № 4. – S. 54–63.
3. Hryshchenko E. V. Yspolzovanye dannykh sputnyka Landsat-8 dlia otsenky ekolohycheskoho sostoianiya Kakhovskoho vodokhranylyshcha. Rezhym dostupu: <http://gis.dp.ua/conf2016-publications/sections/ecology/2 GRICHSHENKO.pdf>.
4. Bocharov A. V., Tykhomyrov O. A. Yspolzovanye dannykh dystantsyonnoho zondirovaniya dlia otsenky yzmeneni prybrezhnoi zony vodokhranylyshch / Izvestyia Samarskoho nauchnoho tsentra Rossyiskoi akademyy nauk. – 2015.– T. 17. – № 4 (4). – 625–632.
5. Zahorodniaia S. A. Issledovanye ekolohycheskoho sostoianiya Kremenchuiskoho vodokhranylyshcha v predelakh Cherkasskoi oblasti metodamy DZZ / S. A. Zahorodniaia, N. A. Sheviakyna, M. Y. Novyk, Y. V. Radchuk // Uchenye zapisky Tavricheskoho natsyonalnoho universyteta ym. V.Y. Vernadskoho. Seryia: Heohrafiia. – 2010. – T. 23(62). – № 2 – S. 84–91.
6. Sylkyn K. Y. Metodika otsenky ekolohycheskoho sostoianiya Voronezhskoho vodokhranylyshcha po materyalam mnohozonalnoho dystantsyonnoho zondirovaniya. Vestnik VHU. Seryia: Heolohyia. – 2012. – № 1. – S. 220–223.
7. Khenderson-Sellers B. Ynzhenernaia lymnolohyia / B. Khenderson-Sellers [per. s anhl. pod red. K. Y. Kondrateva]. – L. : Hydrometeoyzdat, 1987. – 335 s.
8. Carlson R. E. A Trophic State Index for lakes / R. E. Carlson. // Limnol. And Oceanography. – 1977. – 22(2). – P. 361–369.
9. Shumakov F. T. Razrabotka metodov kosmycheskoho monytorynha trofycheskoho sostoianiya vodoemov / Uchennye zapysky Tavrycheskoho natsyonalnoho unyversyteta ymeny V. Y. Vernadskoho. Seryia «Heohrafiia». – 2011. – Tom 24(63). – № 3. – S. 162–172.
10. Tryfonova Y. S. Ekolohiia y suksessyia ozernoho fytoplanktona. – L. : Nauka, 1990. – 184 s.
11. Myneeva N. M., Shchur L. A. Soderzhanye khlorofylla-a v edynytse byomassy fytoplanktona (obzor) / Alholohyia. – 2012. – T. 22. – № 4. – S. 423–437.
12. Muraviev A. H. Rukovodstvo po opredeleniyu pokazatelei kachestva vody polevyimyy metodamy. / A. H. Muraviev. – Sankt-Peterburh : Krysmas, 1988. – 224 s.
13. Naumenko, M. A. Evtrofyrovanyis ozër y vodokhranylyshch. Uchebnoe posobyie / M. A. Naumenko – Sankt-Peterhurh : yzd. RHHMU, 2007. – 100 s.
14. Stan dovkillia Chornohomoria. Natsionalna dopovid Ukrainy 1996–2000 roky. Ministerstvo ekolohii ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. – Odesa : Astroprynt, 2002. – 80 s.
15. Hydrometeorolohyia y hydrokhymyia morei SSSR. T. IV, Chernoe more. – Vyp. 2. Hidrokhimicheskie usloviia y okeanohrafycheskie osnovy formirovaniia biolohycheskoi produktivnosti. – S.-Pb. : Hidrometeoizdat, 1992. – 219 s.
16. Kresyn V. S., Eremenko E. V., Zakharchenko M. A., Yurchenko A. Y. Dinamika postupleniia soedyneni fosfora v ukrainskie pribrezhnye vody Chernohomoria i kompleks

vodookhrannykh meropriyatiy / Ekolohiia dovkillia ta bezpeka zhyttiediialnosti. – 2008. – № 5. – S. 28–33. **17.** Musatov A. P. Otsenka parametrov ekosystem vnutrennykh vodoemov. – M. : Nauchnyi myr, 2001. – 192 s. **18.** Bryzghalo, V. A. Metody bioindykatsii y biotestirovaniia pryrodnykh vod / V. A. Bryzghalo, T. A. Khoruzhei. – Leninhrad : Hidrometeoizdat, 1989. – 276 s. **19.** Husev M. V. Mikrobiolohiia / M. V. Husev, L. A. Myneeva. – M. : MHU, 1992. – 384 s.

Рецензент: д.е.н., професор Скрипчук П. М. (НУВГП)

Pichura V. I., Postdoctoral Fellow, Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D.), Associate Professor at the Department of Ecology and Sustainable Development (Kherson State Agrarian University)

SPATIAL AND TEMPORAL TRENDS OF CHANGES IN THE TROPHIC STATE OF THE DNIPRO RIVER RESERVOIRS

The problems of rational water use and water quality assessment are among priority tasks of many countries, particularly in transboundary river basins. The construction and operation of the cascade of Dnieper reservoirs has led to a radical transformation of the hydrological regime of the Dnieper river. As a consequence, there has been a significant deterioration of the physical, chemical and biological characteristics of surface water quality, an increase in their trophic status, a decrease in performance efficiency and functional sustainability of the aquatic ecosystem of the Dnieper River basin, which is determined to a greater extent by anthropogenic factors. As a result of decoding a series of space images (August 1986-2016) of Landsat-5, Landsat-7 and Landsat-8 satellites with a spatial resolution of 30 meters, we identified a spatial and temporal trend of the change in physical (water clarity), hydrochemical (concentration of total phosphorus in water), biological (chlorophyll-a) properties of reservoir water areas. In our present studies we applied the trophic state index developed by the Florida Department of Environmental Protection and used to classify all types of water surface, including rivers. The findings show that the values of the trophic state index in reservoirs are distributed quite unevenly (from 26.5 to 56.5), the level of variation over the years of research being within 2.1-10.5%, which is due to the intensification or 'chemization' of agriculture and climate change. These factors increase the hazards of biogenic substances accumulation as a result of soil erosion processes and trigger the 'blooming' of water in case of an increase of temperature in

reservoirs. The trophic status level within individual reservoirs is rather uneven and ranges from oligotrophic and mesotrophic in the streamflow areas to eutrophic in stagnant water areas with a higher temperature regime, which occupy up to 40% of the Dnieper cascade reservoirs. The lower reaches of the Dnieper have a high degree of regulation, and in some areas the trophic state index is more than 70, corresponding to the hypertrophic status. Continuous aggravation of eutrophication of the Dnieper cascade water bodies increases the concentration of biogenic substances, contributes to blue-green algae dominance in phytoplankton, reduces water clarity, increases organic matter content, significantly deteriorates ecosystems and reduces the biological productivity of the Dnieper River. The presented study of the trophic status of the Dnieper cascade reservoirs is of high scientific and practical value for determining the challenging areas of their water bodies and further priority development of reasonable spatially adaptive and integrated system nature protection measures and enhancement of environmental sustainability and gradual recovery of the Dnieper River basin ecosystem.

***Keywords:* physical, hydrochemical, biological properties of water, trophic state, Dnieper river, Dnieper reservoirs, spatial and temporal changes, interpretation, Earth remote sensing.**

Пичура В. И., докторант, к.с.-х.н., доцент кафедры экологии и устойчивого развития (Херсонский государственный аграрный университет) E-mail: pichuravitalii@gmail.com

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ТРОФИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ РЕКИ ДНЕПР

Проблемы рационального водопользования и оценки качества воды являются приоритетными задачами многих государств, особенно в бассейнах трансграничных рек. Создание и функционирование каскада днепровских водохранилищ привело коренную трансформацию гидрологического режима реки Днепр. В результате этого произошло значительное ухудшение физических, химических и биологических характеристик качества поверхностных вод, повышение трофического их статуса, снижение эффективности работы и стабильности функционирования водной экосистемы бассейна Днепра, которое определяется в большей степени антропогенными факторами. В результате дешифровки серии космических снимков (август, 1986-2016 гг.) Спутников Landsat-5, Landsat-7 и Landsat-8 с

пространственным разрешением в 30 метров, установлена пространственно-временная тенденция изменения физических (прозрачность воды), гидрохимических (концентрации содержания в воде общего фосфора), биологических (хлорофилл-а) свойств акваторий водохранилищ. В исследованиях использован индекс трофической состояния, который разработан Флоридским департаментом защиты окружающей среды и используется для классификации всех типов водной поверхности, включая реки. Установлено, что значение индекса трофической состояния в водоемах водохранилищ распределен достаточно неравномерно от 26,5 до 56,5 с уровнем вариации по годам исследований в пределах 2,1-10,5%, что обусловлено интенсификацией или «химизацией» сельского хозяйства и изменениями климата, которые усиливают проявления опасности аккумуляции биогенных веществ в результате почвенно-эрозионных процессов и провоцируют «цветение» воды при повышении температуры в водоемах. Уровень трофического статуса в рамках отдельных водохранилищ распределен достаточно неравномерно и переходит от олиготрофного и мезотрофных в зонах наличия течения, к эвтрофные в зонах застоя воды с повышенным температурным режимом, занимают до 40% площади каскада днепровских водохранилищ. Низовье Днепра имеет высокую степень зарегулирования и на отдельных участках акватории индекс трофической состояния превышает значение 70, что соответствует гипертрофному статусу. Длительное усиления эвтрофикации водоемов днепровского каскада способствует увеличению концентрации биогенных элементов, доминированию в фитопланктоне синезеленых водорослей, снижение прозрачности, повышение содержания органического вещества, значительному ухудшению экосистемы и снижение биопродуктивности реки Днепр. Представленные исследования трофического статуса каскада днепровских водохранилищ имеют высокую научно-практическую ценность для определения проблемных участков их акваторий и последующей первоочередной разработки обоснованных пространственно-адаптивных комплексных и системных природоохранных мероприятий и повышение экологической устойчивости и постепенного оздоровления экосистемы бассейна реки Днепр.

Ключевые слова: физические, гидрохимические, биологические свойства воды, трофический состояние, река Днепр, днепровские водохранилища, пространственно-временные изменения, дешифрирование, дистанционное зондирование Земли.

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Держаного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф76/93-2017