

УДК 528.88 : (477-25)

## Оцінювання стану водних об'єктів Києва за даними дистанційного зондування Землі

В. І. Вишневський\*, С. А. Шевчук

*Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна*

Висвітлено результати використання даних ДЗЗ, виконаних супутником Landsat 8, для з'ясування екологічного стану водойм м. Києва. Встановлено, що протягом року цей стан зазнає помітних змін. Найбільші зміни і водночас відхилення від стану Дніпра властиві для озер. Для оцінювання стану водних об'єктів запропоновано використовувати індекси NDPI, NDYI та значення каналу В3, який відповідає зеленому кольору випромінювання.

**Ключові слова:** водойми Києва, Landsat 8, "цвітіння" води, екологічний стан, температура води

© В. І. Вишневський, С. А. Шевчук. 2016

### Вступ

Екологічний стан водойм м. Києва — питання, яке цікавить не лише науковців, а й пересічних громадян. Значною мірою це пов'язано з наявністю в місті великої кількості водойм, які використовуються у багатьох сферах, зокрема, рекреації.

### Огляд раніше виконаних досліджень

Екологічний стан водойм Києва, яких у місті дуже багато, перебував і продовжує перебувати у полі зору багатьох дослідників [1–5, 9]. Зокрема цьому питанню присвячено численні праці фахівців Інституту гідробіології НАНУ [2–4, 9]. Для багатьох київських водойм встановлено гідрохімічні особливості, поширення водної та повітряно-водної рослинності. Значну увагу приділили дослідники і "цвітінню" води. Це явище насамперед спричинено бурхливим розвитком синьозелених водоростей (ціанобактерій), кількість яких може сягати кількох мільйонів на кубічний сантиметр. Встановлено, що цей процес найбільшого розвитку набуває у слабо проточних водоймах; йому сприяє наявність у воді сполук азоту і фосфору. Максимум чисельності клітин водоростей та їх біомаси спостерігається приблизно тоді, коли настає найвища температура води. Існують значні коливання не лише кількості водоростей протягом року, а й їх видового складу. Важливим є факт того, що водорості різних систематичних груп істотно різняться за розміром: порівняно великими є діатомові, дрібними — синьозелені.

Ці результати отримано за даними польових досліджень, а саме вимірюванні відповідних показників на місці, а також шляхом аналізу проб у лабораторних умовах. Хоча цей метод є загальноприйнятим, але у ньому є певні недоліки. Головними з них є велика вартість, а головне — неможливість одночас-

ного охоплення дослідженнями великої кількості водойм. Тож стан окремо взятих водойм вивчаються в різний час, що, звісно, ускладнює можливість порівняння отриманих результатів.

Значну увагу екологічному стану Дніпра, зокрема гідрохімічним показникам та розвитку "цвітіння" біля Києва приділено у книзі [1]. У цьому разі вихідними даними стали матеріали багаторічних спостережень, що мають значну повторюваність. За даними моніторингу, який виконується на водозаборі Дніпровської водопровідної станції, встановлено середню багаторічну кількість клітин водоростей: червень — 19 тис., липень — 34 і серпень — 35 тис. клітин на кубічний сантиметр. Це істотно менше, ніж спостерігається у багатьох київських водоймах, адже вода до водозабору ДВС надходить переважно з придонних шарів Київського водосховища.

Останнім часом у встановленні екологічного стану водойм з'явився новий напрям, а саме той, що спирається на дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). У цьому разі для оцінювання стану водних об'єктів використовують не лише зображення водних об'єктів у кольорах, близьких до природних, а й певні індекси, які є комбінацією каналів знімальної апаратури. Найбільше поширення набули індекси NDTI (Normalized Difference Turbidity Index), NDPI (Normalized Difference Pond Index) та NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Відповідні формули для розрахунку цих індексів мають вигляд:

$$NDTI = (B4 - B3) / (B4 + B3),$$

$$NDPI = (B6 - B3) / (B6 + B3),$$

$$NDVI = (B5 - B4) / (B5 + B4),$$

де B3, B4, B5 і B6 — інтенсивність випромінювання відповідних каналів знімальної апаратури супутника.

Використання цих індексів дає змогу краще візуалізувати просторові відмінності, що існують на поверхні водних об'єктів.

Зазначимо, що у зв'язку з порівняно невисокою

\* E-mail: vishnev@voliacable.com

роздільною здатністю супутникових знімків увага дослідників переважно спрямована на з'ясування стану великих водойм, зокрема морів та їх прибережної смуги. Для цих умов встановлено певні кореляційні співвідношення між концентрацією фітопланктону і даними ДЗЗ. З'ясовано [11], що присутність фітопланктону у воді спричинює появу піку у спектрі випромінювання з довжиною хвиль близько 0.55 мкм. При цьому випромінювання синіх і червоних променів зменшується.

З внутрішніх водойм України найбільший обсяг досліджень у сфері використання ДЗЗ виконано щодо оцінювання екологічного стану дніпровських водосховищ [5–8]. У цьому разі мають бути передусім згадані роботи Ф. Т. Шумакова та його колег. Зокрема у праці [8] на основі даних супутника Landsat 7 встановлено наявність залежності між прозорістю води та концентрацією хлорофілу *a* з показниками каналів В1 і В2. У праці [5] на підставі даних ДЗЗ виконано оцінювання рівня трофності Київського та інших водосховищ Дніпровського каскаду.

У цілому, характеризуючи результати виконаних досліджень, потрібно зазначити, що для оцінювання екологічного стану київських водойм методи ДЗЗ практично не використовувалися. Так само — досі немає однозначної відповіді на питання того, які водойми мають кращий екологічний стан, а які гірший.

### Методика досліджень

Головною інформаційною базою цього дослідження стали дані супутника Landsat 8, що був запущений на початку 2013 р. Цей супутник обладнаний кількома сенсорами, спроможними визначати потужність випромінювання в кількох діапазонах частот. Просторове розрізнення зображень більшості каналів становить 15–30 м. Періодичність зйомки супутником певних ділянок земної поверхні становить 16 діб. У зоні перекриття зображень періодичність зйомки вдвічі менша.

Територія м. Києва знаходиться майже в центрі серії знімків LC8181025. Час цієї зйомки — 8:49 за

Всесвітнім часом. Крім того, майже все місто, за винятком його південно-східної частини, потрапляє на знімки серії LC8182025. Знімання цієї території виконується о 8:55 за Всесвітнім часом. Протягом теплового періоду року Київський час різниться від згаданого на 3 год. Отже, зйомка в обох випадках приблизно виконується о 11:50 за Київським часом.

Зкачування знімків Landsat 8 виконувалося із сайту Геологічної служби США (<http://glovis.usgs.gov>). У зв'язку з великим розміром файлів, який близький до 1 Гбт, спочатку здійснювався відбір якісних зображень, які не захмарені. За цим відбувалося їх зкачування та обробка. В останньому разі використано програму ArcMap10.

Основну увагу в дослідженнях було спрямовано на найбільші і водночас характерні водойми Києва. Звичайно показники якості води визначалися в центральній частині водойм. У затоці Верблюд, що має неправильну форму, показники встановлювалися для середини найбільшого плеса, що віддалене від Дніпра.

Ще одним джерелом даних були матеріали моніторингу Київського водоканалу за розвитком водоростей і загалом за якістю води на водозаборі ДВС. Важливо, що відповідний моніторинг виконується туг щоденно.

Певну увагу в дослідженнях було спрямовано на безпосереднє ознайомлення з водоймами. У цьому разі оцінювалися поширення водної та повітряно-водної рослинності, рівень “цвітіння”, вимірювалися прозорість води та її температура.

### Виклад основного матеріалу

Стан київських водойм можна оцінити за супутниковими зображеннями, використовуючи певні засоби їх обробки. Для цього використано згадані вище індекси NDTI, NDPI і NDVI, які є комбінацією довжини хвиль певного діапазону випромінювання. Це дало змогу побудувати зображення київських водойм у широкій гаммі кольорів. Основну увагу приділено стану водойм у теплий період року, коли цей стан є найбільш проблемним (рис. 1).

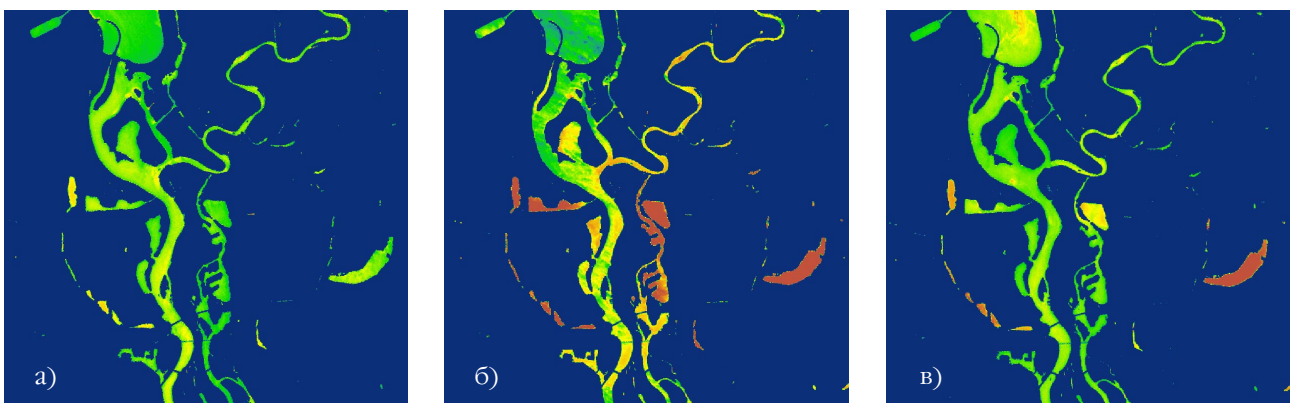


Рис. 1. Зображення київських водойм, отримані за значеннями індексу NDPI: за 06.06.2014 (а), 30.07.2014 (б) і 1.09.2014 (в)

Наведені на рис. 1 зображення показують, що стан водойм Києва зазнає значних коливань у часі. Порівняно сталим є вигляд води в основному руслі Дніпра. Натомість окремі його затоки, а особливо озера, істотно змінюють свій стан. Найбільші відхилення від стану Дніпра спостерігаються тоді, коли розвиток “цвітіння” води досягає свого максимуму, а саме — у другій половині липня та першій половині серпня.

Найбільша сталість показників стану води і невелике її “цвітіння” властиві для верхової водойми Київської ГАЕС та нижнього б’єфу Київської ГЕС. В обох випадках це зумовлено забором води з доволі великих глибин Київського водосховища. Крім того, певну роль відіграє значне перемішування. З іншого боку, наявні зображення показують наявність сильного “цвітіння” в озерній системі Опечень (ліва частина рис. 1), затоці Доманя (центр рисунка), озері Алмазне (права частина рисунка).

Засоби обробки супутникових зображень дають змогу отримати їх у вигляді, що близький до природних кольорів. У цьому разі використано комбінацію каналів В2, В3 і В4 супутника. Ці зображення показують, що дійсно вода набуває найбільш зеленого кольору у другій половині літа. Порівняно сталим є колір води у Дніпрі. В його затоках та особливо озерах зміни кольору значно більші (рис. 2).



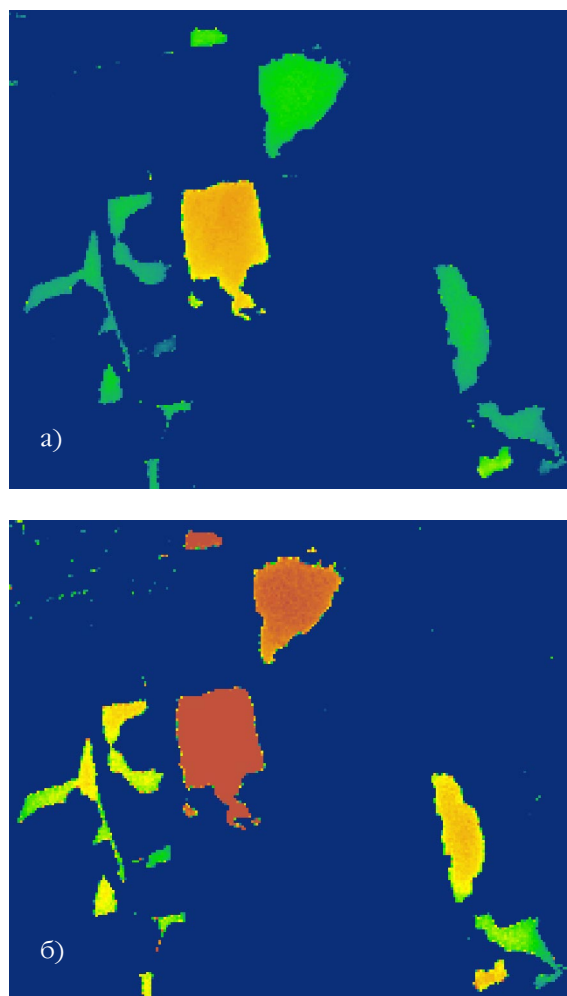
**Рис. 2.** Зображення оз. Редчине (Міністерське), затоки Верблюд і прилеглої ділянки Дніпра, побудовані за комбінацією каналів В2, В3 і В4: 6.06.2014 (а), 30.07.2014 (б) і 1.09.2014 (в)

Наведене зображення дає змогу побачити насправді важливою є роль водообміну. У віддаленому від Дніпра плесі затоки Верблюд “цвітіння” води у другій половині літа значно більше, ніж у наближеній до Дніпра частині. Ще більшим є розвиток “цвітіння” в оз. Редчине. Побутує думка, що вода в ньому дуже чиста, але, як видно, погодитися з цим можна лише частково.

Доволі цікавим і не лише в науковому значенні є екологічний стан водойм, розташованих у південно-східній частині Києва: озер Вирлиця, Тягле, Небріж та ін. Деякі з цих озер використовуються в рекреації, хоча якість води в них є сумнівною. Звичайно найгірша вона у другій половині літа (рис. 3).

Як видно на рис. 3, найбільше від сусідніх виділяється оз. Тягле (у центрі), яке тут є найбільшим. Це озеро виділяється і за іншими індексами.

Обстеження зазначених озер показало, що в цій частині Києва оз. Тягле є найбпроблемнішим. У другій половині літа у ньому спостерігається гіперцвітіння. При цьому прозорість води в ньому за диском Секкі становить лише 0.3–0.4 м.



**Рис. 3.** Зображення озер в південно-східній частині Києва, побудовані відповідно до значень NDPI (а) та NDVI (б); знімок за 28.08.2015

Характерно, що на берегах озера немає навіть всюдисющих риболовів.

Розвиток “цвітіння” можна характеризувати також значеннями каналу В3 супутника Landsat 8, який налаштований на довжину хвиль 0.53–0.59 мкм. Попри існування певних коливань в окремо взятих водоймах, найбільші кількісні показники цього каналу в цілому припадають на липень і зрідка на серпень. Це саме той час, коли “цвітіння” води є максимальним (рис. 4).

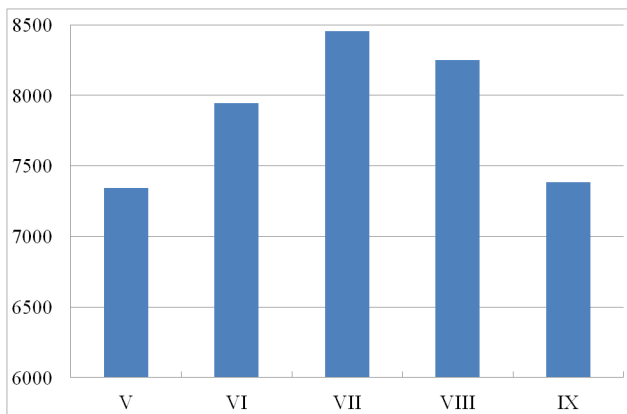


Рис. 4. Розподіл значень каналу В3 київських водойм протягом періоду з травня по вересень

Зауважимо, що відповідно до [1], найбільший рівень розвитку фітопланктону на водозаборі ДВС припадає на серпень, тобто дещо пізніше, ніж для більшості київських водойм. Це пояснюється згаданим вище фактом забору води ДВС, куди вона надходить переважно з придонних шарів Київського водосховища.

Можна припустити, що для київських водойм існує певний зв'язок між значеннями каналу В3 та широким спектром індексів NDVI, NDPI та NDTI. Виявилося, цей зв'язок дійсно існує, але тісний він лише з індексом NDPI та NDTI Найтісніший він у період, коли розвиток водоростей найбільший (рис. 5).

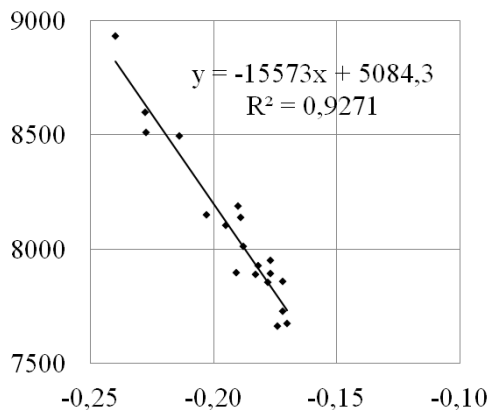


Рис. 5. Зв'язок між кількісними показниками каналу В3 та індексом NDPI київських водойм за даними зйомки супутником Landsat 8, 28.08.2015

Загалом велика тіснота зв'язку між показниками каналу В3 та індексом NDPI з коефіцієнтом кореляції понад 0.8 спостерігається протягом усього літнього періоду.

Найменші кількісні показники каналу В3 властиві для верхньої водойми Київської ГАЕС та нижнього б'єфу Київської ГЕС. Характерні значення становлять тут 7 500–8 000. Зі збільшенням трофності зростає і показник В3. Для озера Тягле, водна поверхня яких улітку реально зелена, показник каналу В3 часто перевищує 9 000. Подібне стосується оз. Лісове (Берізка), що розташоване у східній частині Києва на південь від Броварського шосе.

Наведені дані дають змогу характеризувати стан водних об'єктів за ступенем відхилення від референційних умов, якими можна вважати стан води у верхній водоймі Київської ГАЕС і в нижньому б'єфі Київської ГЕС. Показники якості води тут значно більш стабільні, ніж у затоках Дніпра та особливо озерах.

Для оцінки стану водних об'єктів можна використати словесний опис, близький до того, що рекомендований у “Методиці екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями” [4]. У цьому документі рекомендовано виділяти п'ять класів і сім категорій якості води. Назва класів за станом вод є такою: відмінні, добрі, задовільні, погані і дуже погані. У межах класів виділяють сім категорій якості води. Першому класу відповідає чудова якість. У другому класі виділяють категорії “дуже добра” і “добра”, у третьому — “задовільна” і “посередня”, у четвертому — “погана”, у п'ятому — “дуже погана” (таблиця).

Стан київських водойм за рівнем “цвітіння” води

Водойма	Стан
Верхова водойма Київської ГАЕС, нижній б'єф Київської ГЕС	Дуже добрий
Верблюд, Собаче гирло, Редчине, Святошинський	Добрий
Сонячне, Лебедине, Алмазне	Задовільний
Вербне, Райдуга, Тельбин	Посередній
Кирилівське, Заплавне, Доманя, Небріж	Поганий
Лісове (Берізка), Тягле	Дуже поганий

У цілому кращий екологічний стан спостерігається там, де більший водообмін: в основному руслі Дніпра він кращий, ніж у затоках, а в затоках кращий ніж в озерах. Деякий вплив на розвиток “цвітіння” має також поширення вищої водної рослинності. У водоймах, де згаданої рослинності багато, розвиток “цвітіння” порівняно невеликий і, навпаки. Так, проблемний стан оз. Алмазне певною мірою пояснюється тим, що вищої водної рослинності в ньому дуже мало. Це зумовлено особливостями морфометрії озера, а саме невеликою площею мілководних ділянок. Показники каналу В3 та індексу NDPI

свідчать про менший розвиток “цвітіння” у більш зарослій північно-східній частині оз. Алмазне, ніж в його південно-західній частині.

У свою чергу, проблемний стан оз. Лісове (Берізка) зумовлений тим, що в другій половині літа воно стає непроточним і зменшується в розмірах. У цей час прозорість води в озері за диском Секкі становить лише 30–35 см.

З іншого боку, доволі забрудненим вважається Святошинський став, який знаходиться північніше автошляху на Житомир. Але дані ДЗЗ цього не показують. Можливо це пов'язано з доволі гарною проточністю, адже через став протікає р. Нивка. Певна роль у стримуванні розвитку водоростей вірогідно має значний розвиток повітряно-водної рослинності, яка вкриває мілководдя ставу.

Деякі особливості якісного стану мають водойми в південно-східній частині Києва: озера Вирлиця, Тягле, Заплавне, Небріж та ін. За наявними даними, для всіх цих водойм характерне значне “цвітіння” води. Зокрема, воно властиве для найбільшого тут оз. Тягле. Проблемний стан цього озера вірогідно пов'язаний з близькістю Бортницької станції аерації, яка до того ж знаходиться на вищих позначках.

Порівняно невеликим є “цвітіння” води в оз. Вирлиця. Можна припустити, що розташований поряд з озером сміттєспалювальний завод “Енергія” здійснює штучне пригнічення розвитку фітопланктону.

До важливих параметрів екологічного стану водних об'єктів належить і температура води. З метою її визначення використано дані каналу V10 супутника Landsat 8 та виконано відповідний розрахунок за формулою, що рекомендована Геологічною службою США:

$$T = (1321.08 / (\ln((774.89 / ((LC80990232013252LGN00\_B10.TIF^{0.0003342} + 0.1)) + 1))) - 273.15.$$

Як було встановлено авторами раніше [6], отримані дані щодо температури води доволі добре відповідають її фактичним значенням. Хоча порівняно невисока роздільна здатність каналу V10 (100 м) не дає змоги встановлювати температуру води у невеликих водоймах, існує можливість її визначення в основному руслі Дніпра, його головних рукавах, а також великих затоках та озерах (рис. 6).

Наведені на рис. 6 дані свідчать про те, що в найспекотніший період року температура поверхневого шару води у водоймах Києва має значні відмінності. Найнижча вона в нижньому б'єфі Київської ГЕС, куди вода скидається зі значних глибин, де температура нижча, ніж на поверхні. З віддаленням від ГЕС температура води зростає і на нижній околиці Києва може бути на 2°C і вищою, ніж у нижньому б'єфі ГЕС.

Деякий вплив на температуру води в Дніпрі чинить і Десна, вода в якій у місці злиття цих річок улітку тепліша. Найвища ж температура води в межах Києва спостерігається в затоках (особливо з невеликим водообміном) та особливо озерах. У цьому разі існує прямий кореляційний зв'язок з розвитком фітопланктону: у водоймах зі значним “цвітінням” води її температура вища, ніж з малим і, навпаки.

## Висновки

Дані супутника Landsat 8 та результати їх обробки дають змогу оцінювати екологічний стан водойм м. Києва. Протягом року цей стан зазнає значних ко-

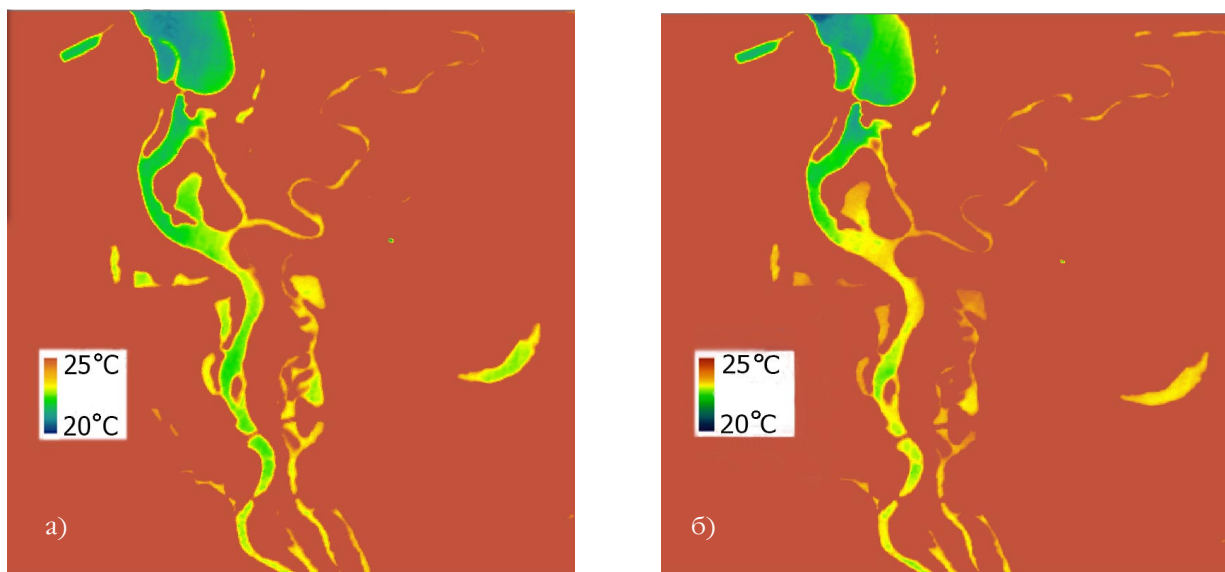


Рис. 6. Температура водної поверхні київських водойм у липні: 13.07.2016 (а) і 29.07.2016 (б)

ливань. Більш сталим є стан Дніпра, мінливішим — його заток та особливо озер. Найбільші відмінності між умовами в Дніпрі та в озерах спостерігаються у другій половині липня—першій половині серпня, коли найвищою є температура води та набуває найбільшого розвитку її “цвітіння”. Оцінювання цього процесу можна здійснювати за індексами NDPI, NDTI та каналом ВЗ. За отриманими даними запропоновано класифікацію екологічного стану київських водойм. Найкращим є стан верхової водойми Київської ГАЕС і нижнього б’єфу Київської ГЕС, дуже поганим — озер Лісове (Берізка) і Тягле.

Скидання води з придонних шарів Київської ГЕС зумовлює те, що найхолодніша вода влітку спостерігається в її нижньому б’єфі. Униз за течією температура води поступово зростає: частково завдяки прогріванню, частково завдяки впливу Десни, температура в якій улітку вища, ніж у Дніпрі. У літній період найтеплішою є вода в затоках Дніпра та в київських озерах.

### Література

1. Вишневецький В. І. Ріка Дніпро / В. І. Вишневецький. — К.: Інтерпрес ЛТД, 2011. — 384 с.
2. Екологічні проблеми київських водойм і прилеглих територій / О. В. Романенко, О. М. Арсан, Л. С. Кіпніс, Ю. М. Ситник. — К.: Наукова думка, 2015. — 192 с.
3. Ключенко П. Д. Структурно-функціональна організація фітопланктону в зарослях и на открытых участках озер г. Киева / П. Д. Ключенко, Т. Ф. Шевченко, Г. В. Харченко // Гидробиологический журнал. — 2015. — Т. 51. № 1. — С. 49–65.
4. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / В. Д. Романенко, В. М. Жукінський, О. П. Оксіюк [та ін.]. — К.: СИМВОЛ-Т, 1998. — 28 с.
5. Толстохатко В. А. Мониторинг днепровских водохранилищ по данным дистанционного зондирования Земли со спутника Landsat / В. А. Толстохатко, Л. А. Антоненко, Ф. Т. Шумаков Ф. Т. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2010. — № 3–11 (45). — С. 49–53.
6. Шевчук С. А. Використання даних супутника Landsat 8 для визначення мікрокліматичних особливостей Києва / С. А. Шевчук, В. І. Вишневецький [Електронний ресурс] // Український журнал дистанційного зондування Землі. — 2016. — № 10. — С. 10–16. — Режим доступу до журналу: <http://www.ujrs.org.ua>
7. Шевчук С. А. Визначення екологічного стану водосховищ за допомогою методів дистанційного моніторингу / С. А. Шевчук, І. А. Шевченко // Меліорація і водне господарство. — 2012. — Вип. 100. Том 2. — С. 42–52.
8. Шумаков Ф. Т. Разработка методов космического мониторинга трофического состояния водоемов / Ф. Т. Шумаков // Ученые записки Таврийского национального университета имени В.И. Вернадского. — Серия “География”. — Том. 24 (63). 2011. — № 3. — С. 162–172.
9. Щербак В. И. Сезонная динамика фитопланктона киевского участка Каневского водохранилища / В. И. Щербак, А. М. Задорожная // Гидробиологический журнал. — 2013. — Т. 49. № 2. — С. 28–38.
10. Blondeau-Patissier D. et al. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for detection, mapping and analysis of phytoplankton in coastal and open oceans. *Progress in Oceanography*, 2014, vol. 123, pp. 123–144.
11. Clemas V. Remote sensing of algal blooms: an overview with case studies. *Journal of Coastal Research*, 2012, vol. 28, pp. 34–43.
12. Trescott A. Remote sensing of algal blooms and cyanobacteria in lake Champlain, 2012. — 95 p.

### ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КИЕВА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В. И. Вишневецкий, С. А. Шевчук

Представлены результаты использования данных ДЗЗ, выполненных спутником Landsat 8, для выяснения экологического состояния водоемов г. Киева. Установлено, что в течение года это состояние испытывает заметные колебания. Наибольшие колебания и одновременно отклонения от состояния Днепра характерны для озер. Для оценки состояния водных объектов предложено использовать индексы NDPI, NDTI и значение канала ВЗ, который соответствует зеленому цвету излучения.

**Ключевые слова:** водоемы Киева, Landsat 8, “цветение” воды, экологическое состояние, температура воды

### EVALUATION OF STATUS OF KYIV WATER BODIES USING REMOTE SENSING DATA

V. I. Vyshnevskyi, S. A. Shevchuk

The were presented the results of remote sensing data, made by satellite Landsat 8, for estimation of the ecological status of water bodies in Kyiv. The were found that during the year this status changes in large scale. The largest fluctuations and simultaneous deviation from the state of the Dnipro river obtained for lakes. For the determination of water bodies status there were proposed to use indexes NDPI, NDTI and the meaning of B3 channel, which corresponds to the green color.

**Keywords:** water bodies of Kyiv, Landsat 8, “bloom” of water, environmental condition, water temperature