

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЕМОВ КИЕВА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

**И.А. Шевченко**

Институт водных проблем и мелиорации НААН Украины  
г. Киев, Украина

### Аннотация

Предложена методика оценки экологического состояния водных объектов Киева по данным дистанционного зондирования Земли. Проведено сравнение результатов полевых исследований с данными мультиспектральных снимков спутника Landsat 8. Показана возможность использования расчетных индексов для определения экологического состояния водных объектов.

**Ключевые слова:** ГИС, ДЗЗ, мультиспектральные снимки, корреляция, мутность, цветность, расчетные индексы, экологическое состояние, озера Киева

### Abstract

#### **I.A. Shevchenko DIAGNOSTIC OF ECOLOGICAL STATE OF WATER BODIES IN KIEV VIA REMOTE SENSING**

The article describes the method how to estimate ecological status of water bodies of Kiev using data of remote sensing. The results of field experiments are compared with multispectral satellite images Landsat 8. Calculated indices are applicable to specify ecological state of water bodies.

**Keywords:** GIS, remote sensing, multispectral images, correlation, turbidity, color, calculated indices, the ecological state, the Kiev lakes

### Введение

Исторически вода играла стратегическую роль как в отраслях промышленности и сельского хозяйства, так и в развитии хозяйственно-бытового водоснабжения. На сегодняшний день оптимизация оценки экологического состояния водных объектов представляет большой интерес. До настоящего времени экологическое состояние оценивалось в основном на основании данных дорогостоящих полевых исследований, одновременное проведение которых на нескольких объектах было затруднительным.

Современная наука предлагает использовать геоинформационные системы (ГИС) и технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые позволяют оценивать состояние водных объектов с точной привязкой к местности.

Особое внимание изучению крупных водоемов Украины, в частности с использованием методов ДЗЗ и ГИС-технологий, уделяли В.И. Лялько, Ф.Т. Шумаков, Е.С. Анпилова, В.А. Толстохатко, В.М. Стародубцев, А.А. Мазуркевич, А.Д. Рябоконеко, А.Д. Федоровский и др. [1–8]. Соответствующие исследования сравнительно небольших водоемов, в частности, расположенных в пределах Киева, практически не выполнялись. Кроме того, важной проблемой, которая до сих пор остается нерешенной, является соответствие расчетных мультиспектральных индексов фактическим данным качества воды.

**Исследуемые объекты.** Исследования проводились на заливах Днепра и озерах. Экологическое состояние водных объектов различное.

**Методика проведения исследований.** Основным источником данных в проведенных исследованиях были космические снимки спутника Landsat 8 с пространственным разрешением 15-30 м / пиксель. Периодичность съемки составляла 16 суток. Город Киев находится в центре снимков серии LC8181025. Кроме того, основная часть города, за исключением его юго-восточных окраин, попадает на снимки серии LC8182025. Таким образом, большая часть города снимается с интервалом в 8 суток. Киевское (летнее) время съемки в обоих случаях примерно одинаковое – 11:50.

Загрузка спутниковых снимков выполнялась с сайта Геологической службы США (<http://glovis.usgs.gov>) [9]. После этого они обрабатывались в программах ArcGIS и IDRISI Taiga.

Состояние водоемов оценивалось по данным изображений в цветах, близких к натуральным, а также с помощью нескольких индексов, являющихся комбинацией длины волн излучения водной поверхности. В частности, выполнен расчет индексов NDTI (Normalized Difference Turbidity Index – нормализованный разностный индекс мутности), NDPI (Normalized Difference Pond Index – нормализованный разностный индекс водоема), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный ин-

декс – нормализованный относительный индекс растительности), а также WPI (Water Pollution Index – индекс загрязнения) [4].

Индекс NDVI особенно информативен для изучения растительности вне водоемов, в частности на прилегающих к воде участках. Он позволяет получить условное изображение, на котором показана разная концентрация хлорофилла. Для лучшей визуализации целесообразно сужать диапазон индекса, находящийся в пределах от -1 до +1. Данный индекс рассчитывается (для любого сенсора Landsat) по следующей формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где **NIR** – коэффициент ближней инфракрасной области спектра (ИК), диапазон от 0,760 - 0,900 мкм; **RED** – коэффициент красной области спектра, диапазон от 0,630 - 0,690 мкм.

В самих же водоемах распространение растительности определяется расчетом индекса NDPI. Этот индекс рассчитывается по формуле

$$NDPI = (SWIR - Green) / (SWIR + Green), \quad (2)$$

где **SWIR** – коэффициент дальней инфракрасной области спектра, диапазон от 1,550 - 1,750 мкм; **Green** – коэффициент зеленой области спектра, диапазон от 0,520 - 0,605 мкм.

Индекс трофичности (мутности) рассчитывается по формуле

$$NDTI = (RED - Green) / (RED + Green). \quad (3)$$

Соответствующие формулы для расчета индексов спутника Landsat 8 имеют вид:

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

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

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

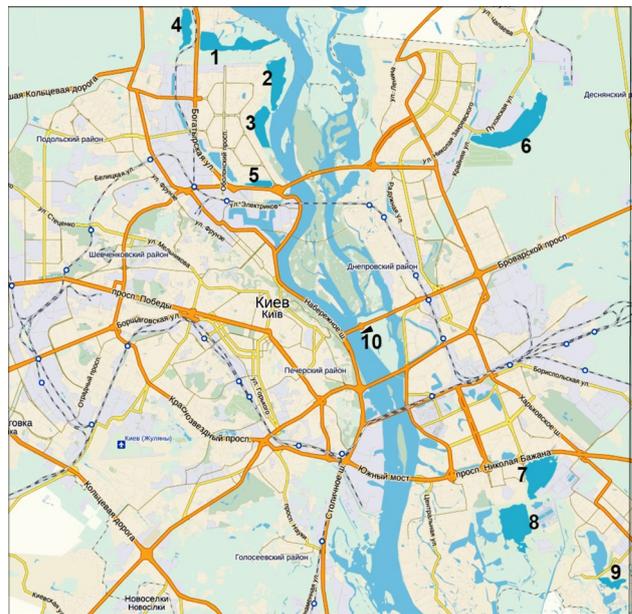
где **B3**, **B4**, **B5** и **B6** – интенсивность излучения соответствующих каналов съемочной аппаратуры спутника.

В свою очередь, индекс загрязнения рассчитывался по формуле:

$$WPI = (2/3 B3 - 1/3 B5) / (2/3 B3 + 1/3 B5). \quad (4)$$

Для проверки соответствия указанных индексов фактическим данным выполнялись полевые исследования, совпадающие во времени с моментом съемки спутником земной (водной) поверхности. Ос-

новной объем работ выполнен летом 2014 г. В одном случае (8.08.2014) полевые исследования проведены на сутки раньше времени пролета спутника. Исследованные водоемы показаны на рисунке 1.



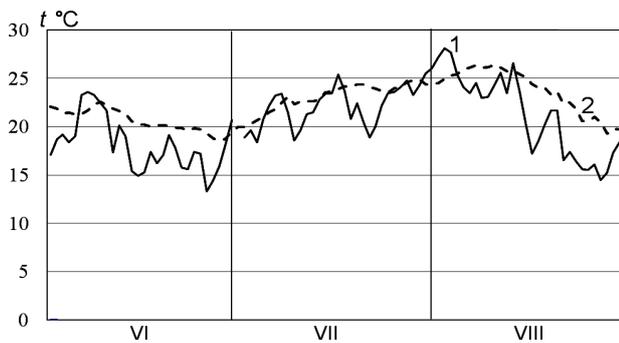
1-3 – заливы *Верблюды*, *Собачья горло* и *Оболонь*,  
4-9 – озера *Редчино*, *Вербное*, *Алмазное*, *Вырлица*,  
*Тяглое*, *Витовец*,  
10 - гидрологический пост “*Киев*”

**Рисунок 1. – Карта водных объектов Киева**

С целью изучения большего количества водоемов выезды на них выполнялись тремя группами. В распоряжении каждой группы была резиновая лодка, диск Секки с размеченной веревкой, термометр, средство GPS, пластиковые бутылки для отбора проб [7]. Программа работ на каждом объекте заключалась в выходе на запланированную точку (обычно середина водоема), измерениях температуры и прозрачности воды, отборе воды в пластиковые бутылки, а также определении географических координат.

Полученные результаты увязывались с гидрометеорологическими условиями, в частности, с данными о температуре воздуха и воды. Температура измерялась на гидрологическом посту, расположенном на основном рукаве Днепра в центральной части Киева (рисунок 2).

На рисунке 2 показаны особенности температурного режима лета 2014 г. Наиболее высокая температура воздуха и воды наблюдалась в начале августа, а не во второй половине июля, как обычно.



**Рисунок 2. – Изменение температуры воздуха (1) на метеостанции «Киев» и температуры воды на гидрологическом посту «Киев»**

Еще одним источником данных для анализа были материалы мониторинга Киевского водоканала, касательно увеличения водорослей и качества воды на водозаборе, расположенном несколько севернее города. Важно, что этот мониторинг выполняется здесь ежедневно.

**Результаты исследований.** Исследования показали, что в течение лета экологическое состояние киевских водоемов изменяется – существенно уменьшается прозрачность воды при одновременном увеличении уровня ее цветения (таблица 1).

Установлено, что для всех исследуемых водоемов характерны свои особенности. Колебания прозрачности воды в заливах Днепра в целом меньше, чем в озерах. Самые низкие показатели зафиксированы в оз. Вырлица, которое расположено возле мусоросжигательного завода и используется для его работы, что и объясняет интенсивность его цветения.

Об интенсивности цветения воды свидетельствуют космические снимки, сделанные в цветах, близких к натуральным (рисунок 3). Озеро Алмазное является замкнутым и располагается на значительном расстоянии от рек. Ввиду дефицита водообмена, ко второй половине лета интенсивность его цветения наиболее высока.



**а – по данным съемки 6.06.2014, б – 24.07.2014**

**Рисунок 3. – Вид оз. Алмазного в цветах близких к натуральным**

Приведенный рисунок показывают, насколько сильно изменяется состояние озера всего за полтора месяца.

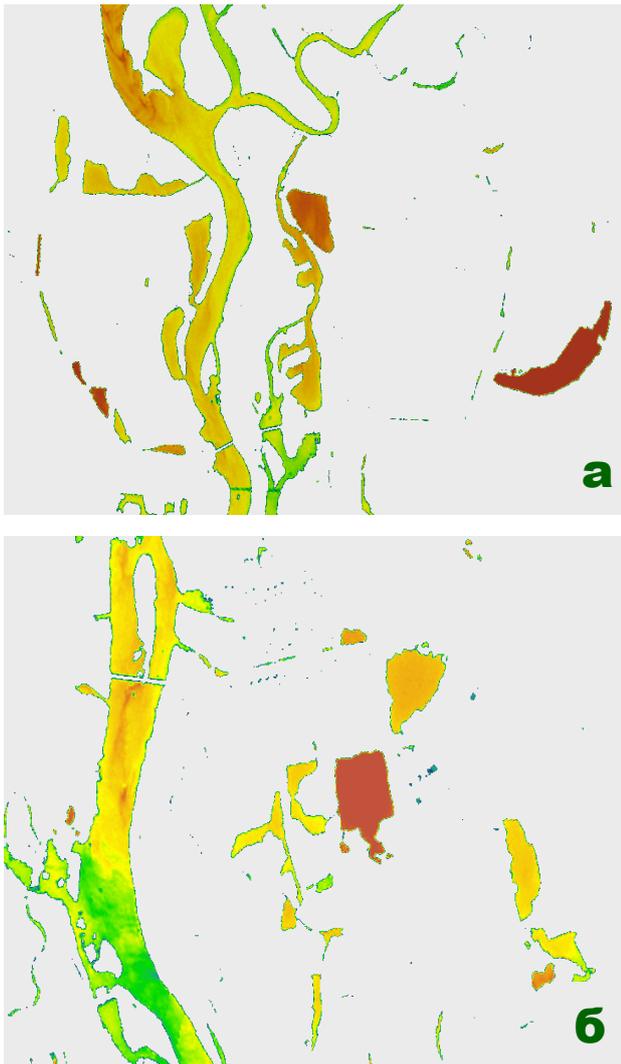
Наглядно демонстрируют состояние озер пространственно-временные изменения, определенные с использованием указанных выше индексов. Оказалось, что наиболее информативным является индекс NDTI (рисунок 4).

На рисунке 4 отчетливо видно, насколько озера Алмазное (рисунок а) и Тяглое (рисунок б) отличаются от остальных водоемов. Они являются в дан-

**Таблица 1. – Прозрачность воды по диску Секки киевских водоемов летом 2014 г.**

Дата забора проб	залив Верблюд	залив Собачье горло	залив Оболонь	озеро Вербное	озеро Редчино	озеро Алмазное	озеро Вырлица	озеро Тяглое	озеро Витовец
06.06.2014	1,27	1,9	1,9	1,0	1,44	2,48	0,78	1,60	1,27
08.07.2014	0,65	1,5	1,35	0,75	1,2	2,71	0,90	1,00	2,10
24.07.2014	0,8	1,5	1,7	0,75	0,9	0,92	1,10	0,98	0,80
08.08.2014	0,35	1,07	1,27	0,27	0,6	0,32	1,48	0,30	1,15

ных частях города наибольшими. Во второй половине лета в озерах наблюдается гиперцветение. При этом прозрачность воды по диску Секки снижается до 0,3-0,4 м. За период с 6 июня по 8 августа показатель прозрачности в оз. Алмазное уменьшился с 2,48 до 0,32 м (таблица 1). Значение показателя прозрачности в оз. Тяглое характеризовалось не таким резким снижением, хотя в августе достигло нижней границы – 0,3 м. На этот период времени выпали максимальные температуры воздуха, что и привело к пику цветения воды.

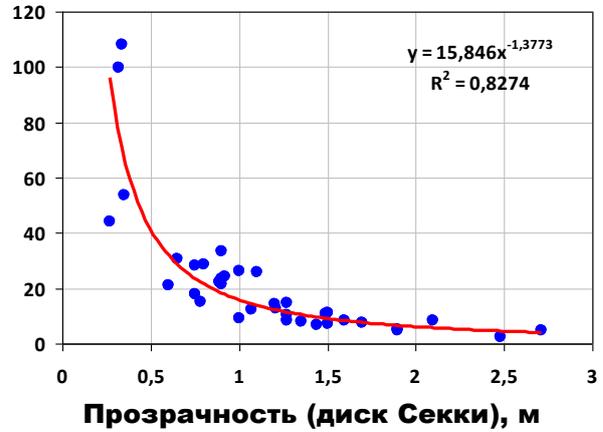


**Рисунок 4. – Изображение озер северной (а) и юго-восточной (б) части Киева, построенные по данным индекса NDTI; снимок за 28.08.2015**

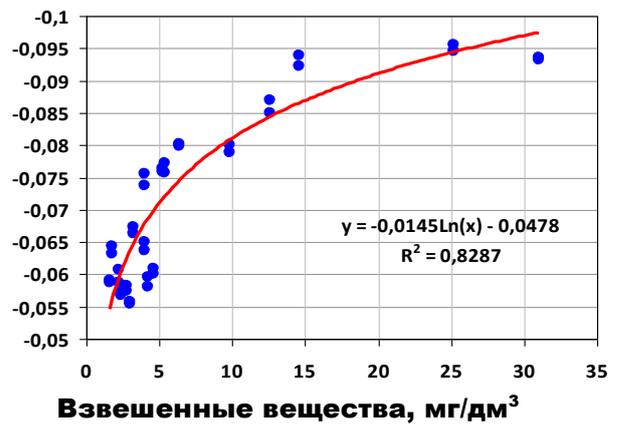
Между фактически измеренными параметрами и указанными выше индексами имеются определенные соотношения. В частности, достаточно тесными оказались корреляционные связи между содержа-

ем взвешенных веществ и индексом NDTI, между индексом загрязнения воды и ее прозрачностью (рисунок 5).

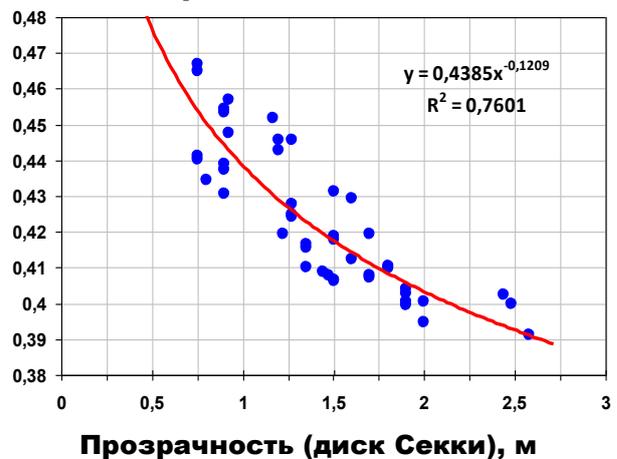
**Мутность, FNU**



**Индекс NDTI**



**Индекс загрязнения воды**

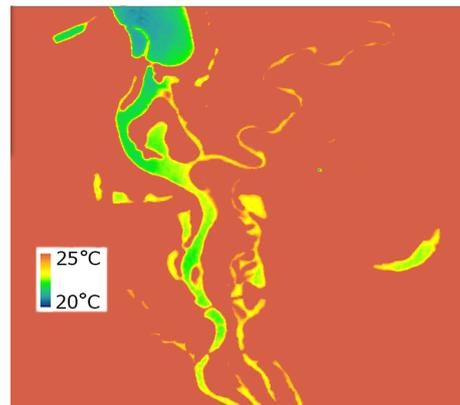


**Рисунок 5. – Корреляционные связи между данными полевых исследований и значениями расчетных индексов**

В ходе исследований были определены водоемы с лучшим и худшим экологическим состоянием. Основными критериями оценки были показатели прозрачности и значения индексов. Качество воды в нижнем бьефе Киевской ГЭС было определено как лучшее. Худшие показатели были у озер Тяглое и Заплавное. Низкие показатели оз. Тяглого объясняются его непосредственной близостью к Бортнической станции аэрации, где очищаются сточные воды города. Что касается водной среды оз. Алмазного, то она является благоприятной для развития сине-зеленых водорослей. Это связано с маленькими площадями мелководий и слабым водообменом.

Экологическое состояние озер напрямую зависит от температуры воды. Согласование спутниковых данных с фактическими данными определялось съемочной аппаратурой спутника по данным канала В10. Расчет выполнялся по формуле, рекомендованной Геологической службой США [9]. Температура воды в Днепре и его заливах, а также озерах имеет определенные особенности. Наиболее низкая температура воды летом наблюдается в нижнем бьефе Киевской ГЭС, куда она сбрасывается с достаточно большой глубины Киевского водохранилища. С отдалением от ГЭС температура воды растет и на нижней окраине Киева может быть на 2 °С выше, чем в нижнем бьефе ГЭС. Ниже по течению температура постепенно повышается: частично за счет прогревания, частично за счет Десны, температура воды в которой летом выше, чем в Днепре. Летом наиболее теплая вода

оказывается в слабопроточных заливах Днепра, а также озерах (рисунок 6).



**Рисунок 6. – Распределение температуры водной поверхности киевских водоемов 13.07.2016**

**Выводы.** Методы ДЗЗ позволяют оценивать экологическое состояние водных объектов, в частности, находящихся в пределах города. Получена тесная корреляционная зависимость между фактическими данными измерений и данными индекса NDTI. Данные наблюдений позволили оценить водные объекты Киева по их экологическому состоянию.

Компьютерные методы обработки спутниковых материалов позволяют исследовать, анализировать, оперативно и масштабно контролировать экологическое состояние территории водоема. Это позволяет повысить достоверность и актуальность информации о ретроспективном и текущем экологическом состоянии водных объектов и речных бассейнов.

#### БИБЛІОГРАФІЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анпілова, Є. С. Інформаційні технології для управління екологічною безпекою вод : монографія / Є. С. Анпілова. – Київ : Азимут-Україна, 2013. – С. 22–31.
2. Вишневецький, В. І. Ріка Дніпро / В. І. Вишневецький. – Київ : Інтерпрес ЛТД, 2011. – 384 с.
3. Екологічні проблеми киевських водойм і прилеглих територій / О. В. Романенко, О. М. Арсан, Л. С. Кіпніс, Ю. М. Ситник. – Київ : Наукова думка, 2015. – 192 с.
4. Лялько, В. І. Екологічний моніторинг оточуючої середовища по мультиспектральним космічним знімкам / В. І. Лялько, А. І. Сахацький, А. Я. Ходоровський // Космічна наука і технологія. – Київ : НАН України, 1999. – Т.5, №4. – С. 1-3.
5. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / В. Д. Романенко, В. М. Жукінський, О. П. Оксінок [та ін.]. – Київ : КСИМВОЛ-Т, 1998. – 28 с.
6. Толстохатко, В. А. Моніторинг дніпровських водохранилищ по даним дистанційного зондування Землі со спутника Landsat / В. А. Толстохатко, Л. А. Антоненко, Ф. Т. Шумаков. – 2010. – № 3. – С. 49-53.
7. Шевченко, І. А. Визначення екологічного стану водосховищ України з використанням дистанційних методів моніторингу / І. А. Шевченко // Праці ЦГО. – 2013. – Вип. 9 (23). – С. 52-55.
8. Шумаков, Ф. Т. Розробка методів космічного моніторингу трофічного стану водоемів / Ф. Т. Шумаков // Ученые записки Таврийского национального университета имени В.И. Вернадского. Серия “География”. – 2011. – Т. 24 (63), № 3. – С. 162-172.
9. <http://glovis.usgs.gov> – сайт геологической службы США.

Поступила 30.01.2017