

УДК 528.8

А.В. СОКОЛОВ

(sokolovalv@studklg.ru)

Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ ЭВТРОФИКАЦИИ ВОДОХРАНИЛИЩА*

На примере Яченского водохранилища, расположенного в черте города Калуга, приводятся результаты спутникового мониторинга за процессом его эвтрофикации. В результате исследования спектральных характеристик спутниковых снимков Landsat-8 рассчитаны индексы хлорофилла. Получена регрессионная модель, отражающая связь между измеренными значениями показателя хлорофилла «а» и значениями индекса хлорофилла. Построена цифровая карта распределения индекса хлорофилла по акватории водохранилища.

Ключевые слова: водохранилище, эвтрофикация, дистанционный мониторинг, спутниковый снимок, индекс хлорофилла, цифровая карта.

Актуальность исследования. Проблема интенсивного «цветения» или эвтрофикации воды очень остро стоит для самых разных акваторий особенно, находящихся в черте города. «Цветением» воды считают массовое развитие одного или 2–3 фитопланктонных видов, сопровождающееся значительным ухудшением качества воды, которое обычно оценивается содержанием показателя хлорофилла «а». Увеличение содержания биомассы фитопланктона приводит к снижению рыбохозяйственного и рекреационного потенциалов водоёмов и является одним из показателей экологического состояния водоёмов.

Получение данных о состоянии эвтрофикации водоёмов лабораторным путём является довольно трудоёмким и затратным процессом. Современные спутниковые снимки позволяют дистанционно осуществлять мониторинг акваторий, дополняя и частично заменяя непосредственные полевые исследования. Использование данных дистанционного зондирования обеспечивает полномасштабный и оперативный мониторинг состояния водоёмов, а также позволяет оценить распределение фитопланктона по всей акватории.

Целью настоящего исследования является мониторинг состояния процесса эвтрофикации Яченского водохранилища с помощью методов дистанционного зондирования.

Задачи:

- исследование спектральных характеристик спутниковых снимков Landsat-8;
- анализ вегетационных индексов NDVI по типу индекса хлорофилла;
- систематизация полученных результатов в виде карты распределения показателя хлорофилла «а».

Материалы и методы исследования. Яченское водохранилище расположено в г. Калуге на р. Яченке (приток р. Оки). Местоположение водохранилища показано на ситуационном плане (рис. 1 на с. 33). Объём водохранилища при нормальном подпорном уровне 127,00 мБс – 5 млн. м³, площадь акватории – 2,3 км². Гидротехнические сооружения включают в себя плотину, водосбросное сооружение, обеспечивающее пропуск воды через насыпь плотины, и донный водовыпуск. Водохранилище изначально создавалось для организации отдыха горожан и проведения водноспортивных мероприятий. На данный момент продолжает оставаться наиболее посещаемым эколого-культурным и рекреационным объектом города, имеет большое эстетическое значение.

На рис. 1 на с. 33 показано местоположение точек отбора проб, выполняемых сотрудниками ООО Фирма «Экоаналитика» в ходе натурных наблюдений для лабораторного определения по-

* Работа выполнена под руководством Захаровой М.В., кандидата географических наук, заведующего кафедрой геопространственных систем и комплексной безопасности ФГБОУ ВО «КГУ им. К.Э. Циолковского».

казателя хлорофилла «a» в течение тёплого периода 2024 г., а в табл. 1 – их географические координаты.



Рис. 1. Ситуационный план [4]

Таблица 1

Географические координаты точек мониторинга

№ п/п	Точка мониторинга	Географические координаты
1	КТ 1	54,531094° с.ш. 36,237205° в.д.
2	КТ 2	54,526337° с.ш. 36,224284° в.д.
3	КТ 3	54,519875° с.ш. 36,229667° в.д.
4	КТ 4	54,511345° с.ш. 36,215304° в.д.

Для оценки содержания хлорофилла «a» в воде Яченского водохранилища дистанционным способом использовались мультиспектральные спутниковые изображения Landsat 8, отснятые в течение 2024 г. и размещённые на сайте Геологической службы США (United States Geological Survey, сокращённо USGS)) <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Для исследования свойств объекта, изучаемого в данном исследовании, наиболее востребованы каналы с номерами 1–7 с разрешением 30 м/пикс [3].

Расчёт индекса хлорофилла выполнялся в геоинформационной системе в открытом кодом QGIS с помощью инструмента «Калькулятор растра» по формуле, которая имеет следующий вид [1, 2, 5]:

$$(B_2 - B_4)/B_3, (1)$$

где B_2 – длина волны второго канала;

B_3 – длина волны третьего канала;

B_4 – длина волны четвёртого канала.

Результаты исследования. На рис. 2 (см. на с. 34) показаны цветосинтезированные изображения индексных поверхностей водохранилища, рассчитанные по формуле (1) для ряда месяцев тёплого периода года.

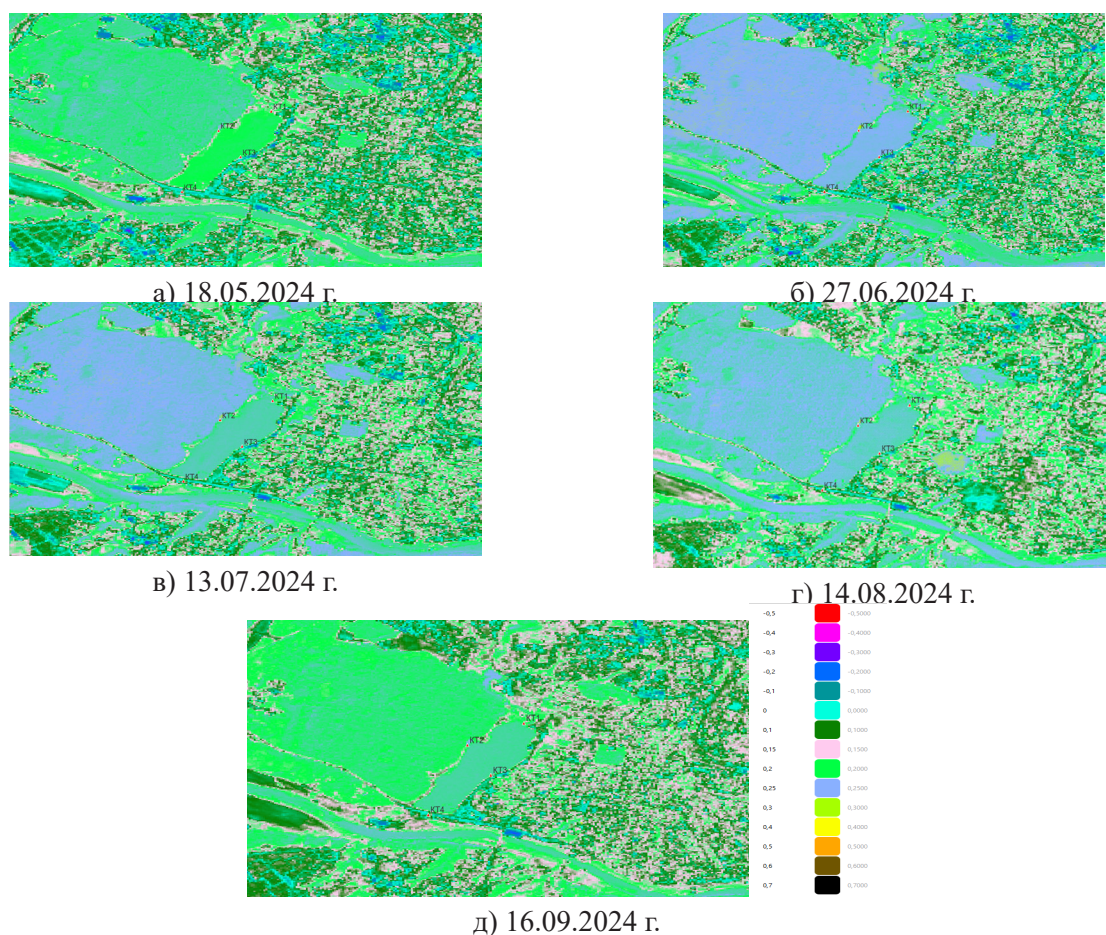


Рис. 2. Цветосинтезированные изображения индексной поверхности

В табл. 2 представлены результаты лабораторного определения содержания хлорофилла «а» в воде Яченского водохранилища, а также рассчитанные значения индекса хлорофилла в 4-х точках мониторинга.

Таблица 2

Результаты лабораторного и дистанционного мониторинга

№	Точка мониторинга	Дата снимка	Индекс хлорофилла	Дата отбора	Показатель хлорофилла «а», мкг/дм ³
1	КТ 1	18.05.2024	0,033	27.05.2024	116±29,0
		27.06.2024	0,35	03.07.2024	27±7,1
		13.07.2024	0,133		
		14.08.2024	0,133		
		16.09.2024	0,3	16.09.2024	67±7,1
2	КТ 2	18.05.2024	0,25	27.05.2024	0
		27.06.2024	0,133	03.07.2024	38±7,1
		13.07.2024	0,3		
		14.08.2024	0,3		
		16.09.2024	0,25	16.09.2024	67±7,1

№	Точка мониторинга	Дата снимка	Индекс хлорофилла	Дата отбора	Показатель хлорофилла «a», мкг/дм ³
3	КТ 3	18.05.2024	0,033	27.05.2024	2±1,0
		27.06.2024	0,166	03.07.2024	36±7,1
		13.07.2024	0,066		
		14.08.2024	0,033		
		16.09.2024	0,066	16.09.2024	67±7,1
4	КТ 4	18.05.2024	0,3	27.05.2024	20±4,3
		27.06.2024	0,3	03.07.2024	48±7,1
		13.07.2024	0,3		
		14.08.2024	0,25		
		16.09.2024	0,3	16.09.2024	67±7,1

Математическая обработка полученных результатов позволила построить регрессионную модель, которая представлена на рис. 3 и отражает связь между измеренными значениями показателя хлорофилла «a» и значениями индекса хлорофилла.

Таким образом, решена задача по установлению значений показателя хлорофилла в любой точке акватории водохранилища, используя результаты дистанционного мониторинга.

Следует отметить, что данная модель характеризуется невысоким значением коэффициента корреляции ($r = 0,55$). Можно предположить, что такая корреляция связана с отсутствием синхронности в датах отбора проб воды и съёмки спутниковых изображений.

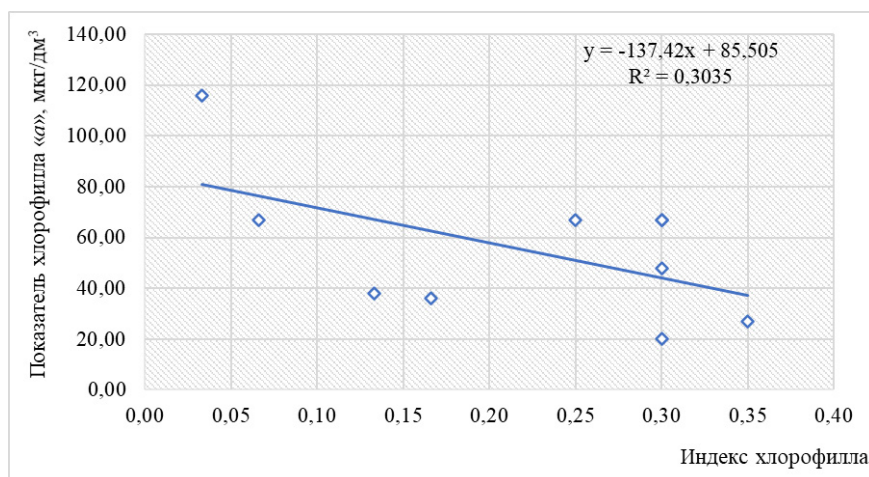


Рис. 3. Регрессионная модель

Наиболее удобным и наглядным способом представления пространственно-распределённых величин в географических исследованиях является их картирование и представление в виде изолиний. Для этого в среде QGIS в границах акватории водохранилища была построена сетка, в узлах которой расставлены пятьдесят точек с известными координатами.

Кроме того, для определения значений индекса хлорофилла в каждой точке было произведено редактирование таблицы атрибутов точек при помощи инструмента «Калькулятор полей», таким образом, чтобы геоинформационная система самостоятельно назначила значение индекса, исходя из значения индекса в каждом пикселе слоя.

Собственно выполнение процедуры интерполяции выполнялось с помощью инструмента SAGA GIS “Cubic Spline Approximation”, построение изолиний – с помощью инструмента “Contour Lines from Grid”.

Далее, используя исходный спутниковый снимок, была проведена оцифровка акватории водохранилища и её окрестностей. Водные объекты обозначены голубым цветом, зона растительности – зеленым, строения – черным, набережная – серым, дорога – коричневым (рис. 4).

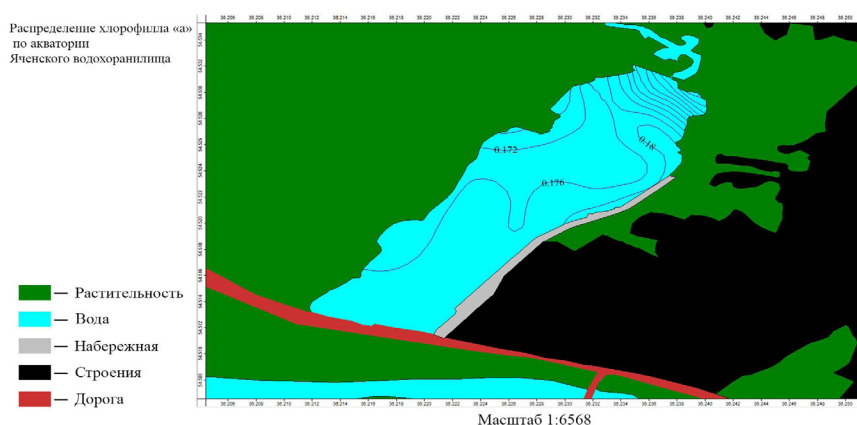


Рис. 4. Цифровая карта

Таким образом, результатом перечисленных выше работ стала цифровая карта распределения индекса хлорофилла по акватории Яченского водохранилища с шагом изолиний равным 0,004 единицы индекса хлорофилла.

Выводы. Результаты спутникового мониторинга, представленные в виде цифровой карты, отражающей состояние эвтрофикации вод водоёмов, являются практико-ориентированным инструментом, имеющим большое значение для охраны окружающей среды, поскольку позволяют обеспечить:

- масштабируемость наблюдений, высокую точность и разрешение данных;
- возможность долгосрочного мониторинга изменений, наблюдение его в динамике;
- эффективность контроля качества водных ресурсов, в том числе на ранних стадиях;
- экономическую выгоду и эффективность затрат на мониторинг;
- повышение информированности общественности.

Данная работа выполнена в рамках действия положения о Научно-образовательном консорциуме Института естествознания Калужского государственного университета им. К.Э. Циолковского, Союза «Торгово-промышленная палата Калужской области» и ООО Фирма «Экоаналитика» от 28.09.2021 г.

Литература

1. Бочаров А.В., Тихомиров О.А., Хижняк С.Д. [и др.]. Мониторинг содержания хлорофилла в водоемах по данным спутника // Журнал прикладной спектроскопии. 2017. Т. 84. № 2. С. 272–277.
2. Кутявина Т.И., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. [и др.]. Использование космических снимков для определения границ водоёмов и изучения процессов эвтрофикации // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 28–33.
3. Столярский А.В. Формирование поверхностного стока Яченского водохранилища // Состояние, использование и охрана водных ресурсов: сб. материалов. Калуга: Издательство ООО фирма «Экоаналитика», 2016. С. 17–19.
4. Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И. [и др.]. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения. Пермь, 2020. // Пермский государственный национальный исследовательский университет. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchukperminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> (дата обращения: 12.11.2025).
5. Brivio P.A., Giardino C., & Zilioli E. Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images // International Journal of Remote Sensing. 2001. № 22(2-3). P. 487–502.

ALEXANDER SOKOLOV

Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovski

**SATELLITE MONITORING AS A METHOD OF ASSESSING THE ECOLOGICAL
STATE OF RESERVOIR WATERS**

The results of satellite monitoring of the eutrophication process of the Yachenskoye reservoir, located within the city of Kaluga, are presented. As a result of studying the spectral characteristics of Landsat-8 satellite images, chlorophyll indices were calculated. The regression model was obtained reflecting the relationship between the measured values of the chlorophyll index 'a' and the values of the chlorophyll index. A digital map of the distribution of the chlorophyll index over the reservoir area has been constructed.

Key words: *reservoir, eutrophication, remote monitoring, satellite image, chlorophyll index, digital map.*