

## МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 543.42:547.979.7

DOI: 10.26456/vtbio379

### **ОЦЕНКА ТРОФИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ КАЛИНИНСКОЙ АЭС НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

**О.А. Тихомиров, А.В. Бочаров, Л.С. Рудников, О.Ю. Сурсимова**  
Тверской государственный университет, Тверь

На основе космических снимков спутника Landsat 8 составлены карты-схемы современного трофического состояния водоема-охладителя Калининской АЭС. По концентрации хлорофилла проведена оценка проявления и рассчитаны площади акватории, подверженные эвтрофикации в водоеме-охладителе в исследуемый период.

**Ключевые слова:** *трофическое состояние, эвтрофикация, хлорофилл, водоем-охладитель, Удомельское водохранилище, Landsat, дистанционное зондирование.*

**Введение.** Определение трофического состояния водохранилищ в настоящее время входит в ряд приоритетных задач экологического мониторинга водоемов. Трофическое состояние тесно связано с качеством воды – значимой санитарно-гигиенической и рыбохозяйственной характеристикой водоемов.

Цель настоящей работы – дать оценку современного трофического состояния водоема-охладителя Калининской АЭС при помощи данных дистанционного зондирования.

Пуск первого энергоблока Калининской АЭС состоялся в 1984 г. В ходе строительства атомной станции был создан водоем-охладитель (Удомельское водохранилище) за счет перекрытия плотиной р. Съежи и повышения уровня озер Удомля и Песьво. Созданное водохранилище объемом 156 млн м<sup>3</sup> используется с целью технического водоснабжения и в качестве поглотителя тепла.

Эвтрофирование (эвтрофикация) – это процесс постепенного перехода водоема из дистрофного или олиготрофного состояния в эвтрофное, в основе которого лежит смещение биотического баланса экосистемы в сторону накопления первичного органического вещества вследствие преобладания скорости образования органических веществ (продукции) над скоростью их разложения (деструкции) (Неверова-Дзюпак, Цветкова, 2020).

Трофность водоема зависит, главным образом, от содержания биогенных форм азота и фосфора, которые являются доступными питательными веществами для фитопланктона и высших водных растений (Неверова-Дзиопак, Цветкова, 2020). Она выражается через содержание общих форм азота и фосфора, концентрации хлорофилла «а» и других показателей.

Для установления трофического состояния в последние годы используются не только традиционные полевые и лабораторные методы, но и дистанционное зондирование Земли.

Трофическое состояние водоема напрямую связано с развитием фитопланктона. Фитопланктон Удомельского водохранилища характеризуется стабильным преобладанием в видовом составе представителей трех отделов водорослей – зеленых, диатомовых и сине-зеленых. Доля представителей остальных отделов – эвгленовых, криптофитовых, динофитовых, желтозеленых, золотистых и стрептофитовых водорослей мала (табл. 1) (Комиссаров и др., 2019).

Таблица 1

Таксономическое разнообразие фитопланктона Удомельского водохранилища (Комиссаров и др., 2019)

| Отделы водорослей/годы | 1984 | 1985 | 1991 | 1993 | 2002 | 2004 | 2007 | 2010 | 2014 | 2017 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Chlorophyta            | 39   | 81   | 32   | 29   | 35   | 29   | 38   | 74   | 72   | 71   |
| Bacillariophyta        | 39   | 43   | 34   | 17   | 7    | 10   | 70   | 55   | 51   | 38   |
| Cyanobacteria          | 16   | 19   | 9    | 10   | 11   | 11   | 22   | 15   | 14   | 12   |
| Euglenophyta           | 2    | 5    | -    | -    | 6    | 6    | 1    | 13   | 12   | 7    |
| Chrysophyta            | 3    | 1    | -    | -    | -    | -    | 2    | 4    | 6    | 6    |
| Dinophyta              | 2    | 3    | -    | -    | 3    | 2    | 3    | 3    | 3    | 3    |
| Xanthophyta            | 1    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 2    | 1    | 1    |
| Cryptophyta            | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 8    | 8    | 7    |
| Streptophyta           | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 2    |
| Всего                  | 102  | 152  | 75   | 69   | 62   | 58   | 136  | 174  | 167  | 147  |

**Методика.** Как показывают исследования, фитопланктон благодаря хлорофиллу имеет две выраженные полосы поглощения: первая находится в синей области спектра между 0,4 и 0,5 мкм, а вторая – в красной с пиком на длине волны примерно 0,67 мкм. По мере увеличения концентрации хлорофилла в водном столбе происходит значительное уменьшение относительного количества энергии, отраженной в синей и красной областях спектра, но одновременно с этим растет доля отражения зеленого излучения. Эти спектральные свойства используются в дистанционном зондировании для мониторинга присутствия и оценки концентрации водорослей (Бочаров, 2021).

В 2015 г. на Ивановском водохранилище были проведены подспутниковые натурные измерения концентраций хлорофилла «а», которые показали существенную статистическую связь исследуемого параметра с многоканальными снимками сенсора OLI спутника Landsat (Бочаров, 2021). В результате был получен региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла «а».

Для определения концентрации хлорофилла «а» по космическим снимкам нами использовано уравнение регрессии (1):

$$\text{Хлорофилл } a = -29,28 \times \frac{b_2 - b_4}{b_3} + 10,86 \quad (1),$$

где  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  – 2-й, 3-й и 4-й каналы спутника Landsat 8 (Бочаров, 2021).

Для определения значений концентрации хлорофилла «а» в водной массе водоема-охладителя Калининской АЭС использовались данные сенсора *OLI\_TIRS* спутника Landsat 8 за 2020-2022 гг. В ходе работы были отобраны космические снимки на следующие даты: 15.06.2020 г., 22.06.2020 г., 03.09.2020 г.; 18.06.2021 г., 25.06.2021 г., 11.07.2021 г.; 20.05.2022 г., 28.06.2022 г., 24.08.2022 г. (EarthExplorer). Выбраны сцены с изображениями, не имеющими покрытия облаками областей интереса. Все космические снимки прошли обработку на основе модели атмосферы MODTRAN с целью устранения атмосферных искажений, влияющих на точность результата.

В ходе оценки сезонного трофического состояния водоема в работе использовался расчет средних взвешенных значений концентрации хлорофилла «а» в Microsoft Excel по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i f_i}{\sum f_i} \quad (2),$$

где  $x_i$  – значение признака в группе (концентрация хлорофилла в отдельных точках),  $f_i$  – количество объектов в группе (частота встречаемости значений) (Математическая энциклопедия, 1977). Расчеты площади акватории, подверженной эвтрофикации в исследуемые даты, проведены в программном обеспечении QGIS 3.16.

**Результаты и обсуждение.** Анализ космических снимков 2020-2022 гг. позволил определить значения концентрации хлорофилла «а» в водной массе водоема-охладителя Калининской АЭС. На основе полученных данных составлена серия карт-схем пространственного распределения хлорофилла и проведена оценка трофического состояния Удомельского водохранилища. С этой целью в работе использована шкала трофности водоемов С.П. Китаева (табл. 2).

В ходе анализа были рассчитаны средние взвешенные показатели концентрации хлорофилла «а» в водной массе для водоема в целом, а также отдельно для оз. Песьво и оз. Удомля.

Как показали расчеты, величина средней взвешенной концентрации хлорофилла «а» для водохранилища в целом составила в

2020 г. 11,45 мг/м<sup>3</sup>. Основная акватория оз. Песьво отличалась в этот период более высокими показателями концентрации хлорофилла (13,95 мг/м<sup>3</sup>). В оз. Удомля эти величины оказались существенно ниже (9,77 мг/м<sup>3</sup>). Максимальные показатели выявлены в отводящих каналах и зоне активного подогрева – 16,13 мг/м<sup>3</sup>.

Таблица 2

Шкала трофности озер и водохранилищ (Китаев, 1984)

| Тип водоема  | Содержание хлорофилла, мг/м <sup>3</sup> |
|--------------|--|
| Олиготрофный | <3                                       |
| Мезотрофный  | 3 – 12                                   |
| Эвтрофный    | 12 – 48                                  |
| Гипертрофный | >48                                      |

Полученные данные согласуются с результатами подобных исследований на других водоемах-охладителях атомных станций. Так, по данным Института «Атомэнергопроект» (Безносков и др., 1995), в водоемах-охладителях АЭС, находящихся в сходных условиях с близким содержанием в воде биогенных элементов (общего азота и фосфора), средние концентрации хлорофилла «а» за многолетний период составляли 12-15 мг/м<sup>3</sup>. Как показали полевые наблюдения (Безносков и др., 1995), в водоеме-охладителе Курской АЭС, имеющей 3 энергоблока, но расположенной существенно южнее, минимальные концентрации хлорофилла весной и летом опускались до 6 мг/м<sup>3</sup> в теплой части водоема и до 5 мг/м<sup>3</sup> – в холодной части. Максимальные концентрации (более 20 мг/м<sup>3</sup>) регистрировались в летний период одновременно с максимальной численностью и биомассой фитопланктона.

На основе полученных данных нами были составлены карты-схемы трофического состояния водоема-охладителя Калининской АЭС. Как показали расчеты и анализ, по величине средней взвешенной концентрации хлорофилла «а» (11,45 мг/м<sup>3</sup>) Удомельское водохранилище в 2020 г. (рис. 1) находилось в состоянии близком к эвтрофному типу по классификации С.П. Китаева. Площадь, подверженная эвтрофикации (при НПУ=156,25 м), в 2020 г. составила 8,18 км<sup>2</sup> (38,56% площади акватории). Трофическое состояние оз. Песьво в летний сезон 2020 г. можно оценить как эвтрофное, а оз. Удомля – как мезотрофное (рис. 1).

Важным фактором, определяющим развитие фитопланктона, является температурный режим водоема (в ходе исследования уточнены данные температурного режима Удомельского водохранилища, полученные ранее (Рудников, 2022)). Как отмечает ряд ученых (Логинова, Лопух, 2011 и др.), максимальное развитие зеленых и сине-зеленых водорослей наблюдается при температуре от +19°C до

+23°C, эвгленовых – летом и в начале осени, а диатомовые водоросли хорошо развиваются при пониженных температурах воды.

Анализ космических снимков за летний сезон 2020 г. позволил подтвердить зависимость трофического состояния отдельных частей водохранилища от температуры поверхностного слоя воды. Так, 15 июня при преобладающих температурах воды до +25°C в оз. Песьво и до +27°C в оз. Удомля, трофическое состояние водохранилища в целом можно оценить как мезотрофное. Небольшие, хорошо прогреваемые мелководные площади в прибрежной полосе и приостровных участках находились в состоянии, близком к эвтрофному. В местах сброса теплых сточных вод Калининской АЭС, в руслах отводящих каналов от градирен водную массу следует отнести к эвтрофному состоянию.

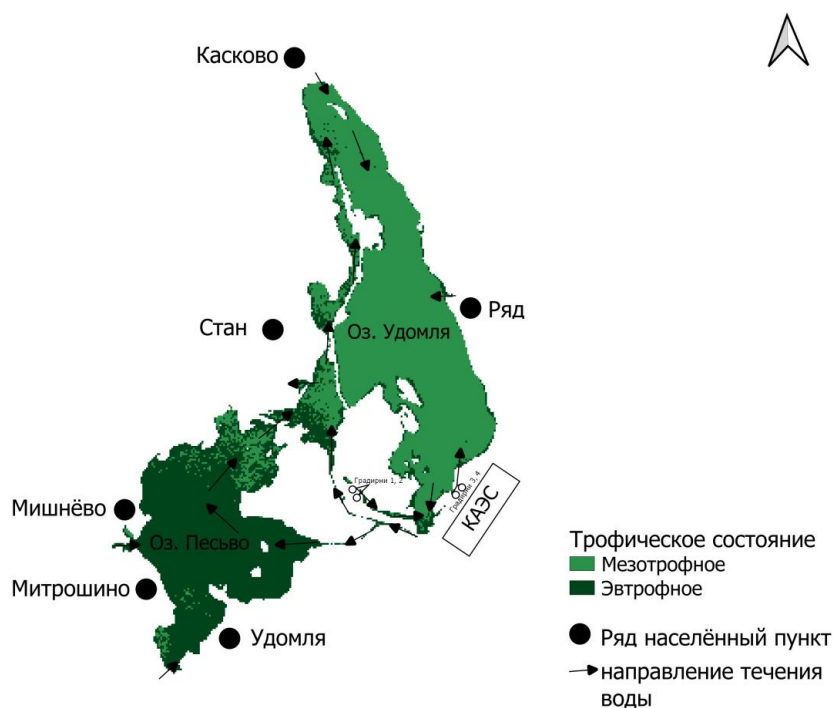


Рис. 1. Трофическое состояние Удомельского водохранилища (летний сезон 2020 г.)

Анализ серии карт-схем показал, что различие термического режима на разных участках водохранилища обеспечивает динамику трофического состояния водной массы. Так, при прогревании воды от 15 к 22 июня на 2-3°C на ряде участков акватории наблюдается смена мезотрофного состояния на эвтрофное.

Данные со спутника Landsat-8 за сентябрь 2020 г. позволили сделать вывод о том, что трофическое состояние оз. Песьво в этот период продолжает оставаться эвтрофным, а водная масса оз. Удомля

постепенно становится в целом мезотрофной. Достаточно высокая трофность водоема в сентябре поддерживалась отепляющим воздействием сточных вод, обеспечивающим формирование на основной его площади водных масс с температурами до +26°C. Участки водоема-охладителя, находящиеся под постоянным воздействием антропогенного фактора (мелководья у г. Удомля, сбросные каналы и др.) находились в стабильно эвтрофном состоянии.

По метеорологическим условиям лето 2021 г. характеризовалось как относительно прохладное, что отразилось на развитии фитопланктона в водоеме. В целом за летний сезон 2021 г. средняя взвешенная концентрация хлорофилла «а» водной массы в оз. Песьво снизилась до 6,14 мг/м<sup>3</sup>, в оз. Удомля – до 5,59 мг/м<sup>3</sup>, а в целом для водохранилища составила 5,93 мг/м<sup>3</sup>. Полученные показатели соответствуют мезотрофному состоянию основной акватории Удомельского водохранилища. Только мелководные прибрежные участки, русла отводящих каналов от градирен и места сброса сточных вод общей площадью 0,98 км<sup>2</sup> (4,6% площади акватории) с концентрацией хлорофилла «а» в водной массе 12,04 мг/м<sup>3</sup>, остались эвтрофными. Наиболее холодные воды сравнительно небольших площадей в центральной части оз. Удомля относились к олиготрофному типу питания (рис. 2).

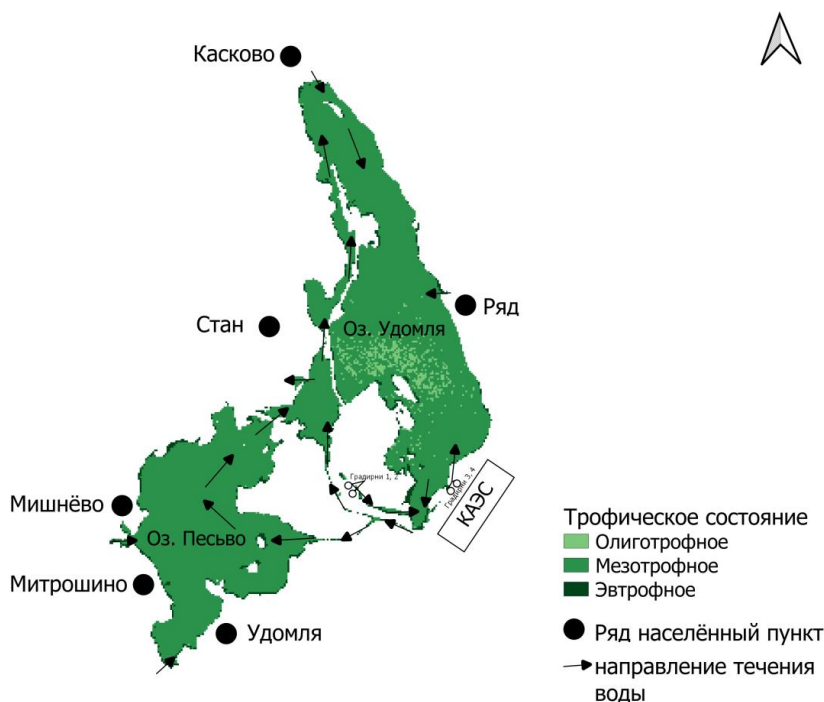


Рис. 2. Трофическое состояние Удомельского водохранилища (летний сезон 2021 г.)



Рис. 3. Трофическое состояние Удомельского водохранилища (летний сезон 2022 г.)

В 2022 г. существенных изменений трофического состояния Удомельского водохранилища не выявлено (рис. 3). В зоне подогрева стабильно сохранялась эвтрофная водная масса с показателем содержания хлорофилла «а» 14,11 мг/м<sup>3</sup>.

Средняя взвешенная концентрация хлорофилла «а» водной массы в оз. Песьво по сравнению с 2021 г. увеличилась до 9,26 мг/м<sup>3</sup>, в оз. Удомля – до 7,97 мг/м<sup>3</sup>, а в целом для водохранилища составила 8,59 мг/м<sup>3</sup>. Полученные данные свидетельствуют о преобладании в водоеме мезотрофных условий; эвтрофные условия наблюдались на 1,77 км<sup>2</sup> (8,56% площади акватории).

**Заключение.** Проведенное исследование позволило оценить трофическое состояние водоема-охладителя Калининской АЭС по значениям концентрации хлорофилла «а», полученным при помощи данных дистанционного зондирования. Используемый подход может применяться в целях изучения акватории водоемов на уровне мелкомасштабного картографического исследования.

В работе на основе анализа космических снимков и оценки спектральных свойств концентрации водорослей установлено современное трофическое состояние Удомельского водохранилища (2020–2022 гг.), его динамика и различия в трофности отдельных частей акватории.

Водная масса основной части акватории Удомельского водохранилища в 2020-2022 гг. может быть отнесена к мезотрофному состоянию. Эвтрофное состояние водной массы характерно для мелководной прибрежной полосы, приостровной зоны, русел отводящих каналов.

Одним из факторов, определяющих различия трофического состояния отдельных частей водоема-охладителя, является температурный режим поверхностного слоя воды. Прогреваемые мелководные участки имеют эвтрофное состояние (заливы и мелководья прибрежной полосы и приостровной зоны). Антропогенное воздействие сточных вод АЭС проявляется на участках сброса нагретых вод и в руслах отводящих каналов.

### **Список литературы**

- Безнос В.Н., Васенко А.Г., Егоров Ю.А.* 1995. Ретроспективный анализ и характеристика современного состояния гидробиоценозов водоема-охладителя Курской АЭС // *Экология регионов атомных станций*. Вып. 4. М. С.142 -196.
- Бочаров А.В.* 2021. Оценка современного состояния внутреннего водоема на основе методов дистанционного зондирования на примере Иваньковского водохранилища: автореферат дис. ... кандидата географических наук. Тверь. 21 с.
- Китаев С.П.* 1984. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука. 207 с.
- Комиссаров А.Б., Григорьева И.Л., Чекмарева Е.А., Кузовлев В.В.* 2019. Альгофлора планктона водоемов-охладителей объектов энергетики Тверской области // *Вестник Тверского государственного университета*. Серия: Биология и экология. № 2(54). С. 226-238.
- Логинова Е.В., Лопух П.С.* 2011. Гидроэкология: курс лекций. Минск: БГУ. 300 с.
- Математическая энциклопедия.* 1977. Ред. коллегия: И.М. Виноградов (глав. ред.) [и др.] Т. 1. М.: Советская энциклопедия. 1151 с.
- Неверова-Дзионак Е., Цветкова Л.И.* 2020. Оценка трофического состояния поверхностных вод : монография. СПб: СПбГАСУ. 176 с.
- Рудников Л.С.* 2022. Оценка современного теплового воздействия Калининской АЭС на водоем-охладитель ядерных реакторов // *География, экология, туризм: научный поиск студентов и аспирантов: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции / отв. ред. Л.П. Богданова*. Тверь. С. 45-49.
- EarthExplorer:* [электрон. ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>



## **ASSESSMENT OF TROPHIC STATE OF WATER COOLER KALININ NPP BASED ON REMOTE SENSING METHODS**

**O.A. Tikhomirov, A.V. Bocharov, L.S. Rudnikov, O.Y. Sursimova**  
Tver State University, Tver

On the basis of space images of the satellite, maps-diagrams of the modern trophic state of the cooling reservoir of the Kalinin NPP Landsat 8 compiled. The chlorophyll concentration was used to evaluate the occurrence and calculate the water area subject to eutrophication in the cooling water body during the study period.

**Keywords:** *trophic state, eutrophication, chlorophyll, water reservoir-cooler, Udomel reservoir, Landsat, remote sensing.*

### *Об авторах:*

ТИХОМИРОВ Олег Алексеевич – доктор географических наук, профессор кафедры физической географии и экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, 33, e-mail: tikhomirovoa@mail.ru.

БОЧАРОВ Александр Вячеславович – кандидат географических наук, старший преподаватель кафедры физической географии и экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, 33, e-mail: bochalex@bk.ru.

РУДНИКОВ Леонид Сергеевич – магистр 2 курса направления 05.04.06 Экология и природопользование, факультет географии и геоэкологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, 33, e-mail: Rudnikov.LS@tversu.ru.

СУРСИМОВА Ольга Юрьевна – заведующий кафедрой физической географии и экологии, факультет географии и геоэкологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, 33, e-mail: Sursimova.OY@tversu.ru.

Тихомиров О.А. Оценка трофического состояния водоема-охладителя Калининской АЭС на основе методов дистанционного зондирования / О.А. Тихомиров, А.В. Бочаров, Л.С. Рудников, О.Ю. Сурсимова // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. 2024. № 3(75). С. 218-226.

Дата поступления рукописи в редакцию: 16.02.24

Дата подписания рукописи в печать: 01.09.24