

УДК 556:528.88:581.526.325 (470.331)

DOI: <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2024-1-23-35>

## ОЦЕНКА ТРОФИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕСТОВЫХ УЧАСТКОВ АКВАТОРИИ УДОМЕЛЬСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Л.С. Рудников

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь

Проведена интегральная балльная оценка трофического состояния различных участков акватории водоема-охладителя Калининской АЭС. На основе данных дистанционного зондирования 2020–2022 гг. составлены карты-схемы трофического состояния участков акватории по концентрации хлорофилла «а», что позволило выявить географические особенности эвтрофикации в водоеме и оценить исследуемый процесс.

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

**Введение.** В настоящее время вопросы экологического состояния антропогенно-преобразованных водоемов, созданных в целях использования в тепловой и атомной энергетике продолжают оставаться актуальными. Антропогенные изменения экосистем оз. Песьво и оз. Удомля связаны с деятельностью Калининской АЭС, строительством градирен, дамб, отводящих каналов, в т.ч. струенаправляющей дамбы, создании промплощадки. Это способствовало существенной трансформации гидрологического, термического и гидрохимического режимов образованного Удомельского водохранилища.

Цель настоящей работы – попытка оценить особенности трофического состояния водоема-охладителя Калининской АЭС на примере тестовых участков акватории с использованием материалов дистанционного зондирования и данных лабораторного анализа.

Калининская АЭС расположена в Удомельском районе Тверской области в 380 км от Москвы и 450 км от Санкт-Петербурга. В результате создания плотины и затопления оз. Песьво и оз. Удомля было образовано водохранилище объемом 156 млн м<sup>3</sup>, которое используется с целью технического водоснабжения и в качестве поглотителя тепла [6].

Экологическое состояние водоема-охладителя Калининской АЭС связано с его трофическим статусом, соотношением процессов продукции и деструкции органического вещества

Эвтрофирование представляет собой естественный процесс

© Рудников Л.С., 2024

эволюции водоёма, без вмешательства человека протекающий в масштабах геологического времени. В результате обогащения водоёма биогенными веществами происходит увеличение биомассы и первичной продукции фитопланктона, развивается высшая водная растительность, наблюдается «цветение» воды. Также происходят структурные перестройки сообществ: уменьшается видовое разнообразие и устанавливается монодоминирование растений и животных на разных трофических уровнях, упрощаются сообщества гидробионтов, наблюдаются другие изменения [1].

Под влиянием деятельности человека (регулируемого режима рек и озер, стока бытовых, промышленных и сельскохозяйственных вод и др.) в водоемах в десятки раз ускоряется накопление биогенных элементов. Водоёмы «стареют» на глазах [1] и за несколько десятков лет отдельные части акватории могут утрачивать свою экономическую, рекреационную и эстетическую ценность.

**Методика проведения работ.** Для изучения трофического состояния были выбраны следующие тестовые участки акватории Удомельского водохранилища (рис. 1):

1. Северная часть оз. Удомля.
2. Канал в верховья оз. Удомля.
3. Участок акватории оз. Удомля в месте слияния с оз. Песьво и отводящим каналом.
4. Участок водохранилища в 500 м выше гидроузла.
5. Участок р. Съежи в 500 м ниже гидроузла.
6. Отводящие каналы в оз. Песьво и оз. Удомля.
7. Южная часть оз. Удомля.
8. Южная часть оз. Песьво.

В пределах участков расположены пункты мониторинговых наблюдений Калининской атомной станции:

ПН 4 – оз. Песьво. Устье отводящего канала. ПН 5 – устье отводящего канала в районе д.Троицы. ПН 6 - устье отводящего канала от градирен №№1, 2. ПН 7 – оз. Песьво в 500 м от устья канала. ПН 9 – прорезь между оз. Песьво и оз. Удомля. ПН 10 – дамба в районе д.Лубенькино. ПН 12 – р. Съежа. в 500 м ниже гидроузла [6] (рис. 1).



Рис. 1. Расположение исследуемых участков и пунктов мониторинговых наблюдений

Среди биогенных элементов, влияющих на процесс эвтрофирования (азот, фосфор, кислород, углерод, сера, кальций, калий, хлор, железо, марганец, кремний и др.), наиболее значимый вклад в повышение трофности вносят азот и фосфор (при этом для водоёмов умеренной зоны решающую роль играет фосфор). Если отношение содержания минерального азота к содержанию минерального фосфора ( $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}}$ ) меньше 10, то первичная продукция фитопланктона лимитируется азотом, при  $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}} > 17$  – фосфором, при  $N_{\text{мин}}:P_{\text{мин}} = 10-17$  – азотом и фосфором одновременно [3].

В настоящее время разработан ряд критериев оценки трофического состояния водных объектов [3, 4, 5]. Нами выбраны информативные показатели: суммарное содержание минеральных форм азота, минеральный фосфор (по фосфат-иону), концентрация хлорофилла «а» (Chl a), водородный показатель. Градации трофности представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Признаки распознавания трофности водоёмов [3, 4, 5]

Показатель	Трофический тип		
	Олиготрофный	Мезотрофный	Эвтрофный
$N_{\text{НЕОРГ.}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	0,2-0,4	0,3-0,65	0,5-1,5
$P_{\text{НЕОРГ.}}$ , мгР/дм <sup>3</sup>	<0,03	0,03-0,25	>0,25
Chl a, мг/м <sup>3</sup>	<3	3-12	12-48
рН летом, ед.	6,9-7,2	7,2-8,0	8,0-9,5

Использованные в работе данные лабораторных анализов получены в отделе охраны окружающей среды Калининской АЭС за летний сезон 2020 г. и июнь-июль 2021 г.

Большая часть Удомельского водохранилища относится к мезотрофному типу (в соответствии с выполненными расчётами по данным дистанционного зондирования). Диапазон концентраций хлорофилла «а» для отнесения водоёма к этому типу достаточно широк, поэтому необходимо выделить градации трофности внутри имеющегося типа. Нами предложены следующие подтипы мезотрофного типа (в скобках указаны соответствующие концентрации хлорофилла «а»): слабо мезотрофный (3-5,9 мг/м<sup>3</sup>), умеренно мезотрофный (6-8,9 мг/м<sup>3</sup>), сильно мезотрофный (9-11,9 мг/м<sup>3</sup>).

В ходе работы нами использована методика балльной оценки трофности. В соответствии с ней были определены следующие критерии: 1. При установлении трофического статуса по каждому критерию в соответствии с таблицей 1 участку акватории присваивается балл: олиготрофный тип – 3 балла, мезотрофный – 6 баллов (+3 к олиготрофному, +1 за каждый подтип – как среднее арифметическое), эвтрофный – 9 баллов (+3 балла к мезотрофному типу) (табл. 2).

Таблица 2

## Соотношение типов трофности и баллов

Показатель	Трофический тип и соответствующий балл (значение показателя)		
	Олиготрофный	Мезотрофный	Эвтрофный
$N_{\text{НЕОРГ.}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	3 (0,2–0,4)	6 (0,3–0,65)	9 (0,5–1,5)
$P_{\text{НЕОРГ.}}$ , мгР/дм <sup>3</sup>	3 (<0,03)	6 (0,03–0,25)	9 (>0,25)
Chl a, мг/м <sup>3</sup>	3 (<3)	4 (3–5,9) 5 (6–8,9) 6 (9–11,9)	9 (12–48)
рН летом, ед.	3 (6,9–7,2)	6 (7,2–8,0)	9 (8,0–9,5)

Например, если суммарное содержание неорганических форм азота ( $N_{\text{НЕОРГ.}}$ ) на исследуемом участке  $0,4 \text{ мг/дм}^3$  – участку по данному критерию присваивается статус «мезотрофный»; если содержание хлорофилла «а» на участке  $7 \text{ мг/м}^3$ , то по хлорофиллу участок относится к мезотрофному типу, умеренно мезотрофному подтипу.

2. При переходном типе трофности от мезотрофного к эвтрофному (М-Э, М<sub>3</sub>-Э) (в случае с  $N_{\text{НЕОРГ.}}$ , например, при концентрации  $0,6 \text{ мг/дм}^3$  в соответствии с табл. 2) прибавляется 7,5 баллов, как среднее арифметическое между баллами рассматриваемых типов трофности.

3. Общая оценка получается путём суммирования частных оценок. В результате трофический статус участка определяется исходя из шкалы: 12-20 баллов – олиготрофный, 21-28 баллов – мезотрофный (21-24 – умеренно мезотрофный, 25-28 – сильно мезотрофный), 29-36 баллов – эвтрофный (29-32 – умеренно эвтрофный, 33-36 – сильно эвтрофный).

4. Для более точного оценивания выбранных участков (имеющих значительную площадь) принимается следующее допущение: оценка по хлорофиллу ведётся не по данным наблюдений в пунктах, а по преобладающей концентрации в пределах участка.

*Пример суммирования частных оценок на участке 3:*

Исходные данные представлены в табл. 3.

Таблица 3

Данные мониторинговых наблюдений и дистанционного зондирования по участку 3

Тестовый участок	Пункт мониторинга	$N_{\text{неорг.}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$P_{\text{неорг.}}$ , мгР/дм <sup>3</sup>	Chl a, мг/м <sup>3</sup>	pH, ед.
3	Устье отводящего канала возле дер. Троица (ПН 5)	0,86	0,02	Преобладает 9-11,9	8,38
	Прорезь между оз. Песьво и оз. Удомля (ПН 9)	0,77	0,02		8,36
	Участок акватории возле дамбы у дер. Лубенькино (ПН 10)	0,73	0,1		8,31

В соответствии с табл. 2 даны частные оценки (по каждому показателю) и присвоены соответствующие баллы (табл. 4). Средний балл получен как среднее арифметическое по трём пунктам мониторинга в пределах участка. Суммарный балл по третьему участку – 28, что соответствует мезотрофному типу, сильно мезотрофному подтипу по интегральной шкале трофности.

Таблица 4

## Балльная оценка показателей по участку 3

Тестовый участок	Пункт мониторинга	N <sub>неорг.</sub>	P <sub>неорг.</sub>	Chl a	pH	Сумма баллов	Средний балл
3	Устье отводящего канала возле дер. Троица (ПН 5)	9	3	6	9	27	28
	Прорезь между оз. Песьво и оз. Удомля (ПН 9)	9	3		9	27	
	Участок акватории возле дамбы у дер. Лубенькино (ПН 10)	9	6		9	30	

Концентрация хлорофилла «а» получена по данным дистанционного зондирования за летний сезон 2020-2022 гг.

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 [2].

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. [2].

Расчет концентрации хлорофилла «а» выполнен по следующей формуле:

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

где  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  – 2-й, 3-й и 4-й каналы спутника Landsat 8 [2].

В процессе исследования использованы данные сенсора *OLI\_TIRS* спутника Landsat 8 за 2020-2022 гг. на 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. [7]. Для получения наиболее точного результата отобраны снимки с отсутствием облачности в пределах области интереса, а также проведена коррекция снимков на основе модели атмосферы MODTRAN.

**Результаты и обсуждение.** В соответствии с выбранными критериями трофности проведена интегральная балльная оценка трофического состояния в пунктах мониторинговых наблюдений. По её итогам установлен трофический статус исследуемых участков. Результаты оценки представлены в табл. 5.

Таблица 5

Трофическое состояние участков Удомельского водохранилища

Тестовый участок	Пункт мониторинга	N <sub>неорг.</sub>	P <sub>неорг.</sub>	Chl a	pH	Интегр. оценка
1	Северная часть оз. Удомля	–	–	M <sub>2</sub>	–	МЕЗ.
2	Канал в верховья оз. Удомля	–	–	M <sub>3</sub>	–	МЕЗ.
3	Устье отводящего канала возле дер. Троица (ПН 5)	Э	О	M <sub>3</sub>	Э	СМ
	Прорезь между оз. Песьво и оз. Удомля (ПН 9)	Э	О		Э	
	Участок акватории возле дамбы у дер. Лубенькино (ПН 10)	Э	М		Э	
4	Участок водохранилища в 500 м выше гидроузла	–	–	Э	–	ЭВТР.
5	Участок р. Съежа. 500 м ниже гидроузла (ПН 12)	М-Э	О	M <sub>3</sub>	Э	СМ
6	Отводящие каналы в оз. Песьво и оз. Удомля	–	–	Э	–	ЭВТР.
7	Оз. Удомля. Устье отводящего канала от градирен №№1, 2 (ПН. 6)	М-Э	О	M <sub>2</sub>	Э	УМ
	Участок акватории в районе блочно-насосной станции №2 (ПН 17)	М	О		Э	
8	Оз. Песьво. Устье отводящего канала (ПН 4)	Э	М	M <sub>3</sub>	Э	УЭ
	Оз. Песьво. 500 м от устья канала (ПН 7)	М	М		Э	

*Примечание.* Трофическое состояние: О – олиготрофное, М – мезотрофное, M<sub>2</sub> – умеренно мезотрофное, M<sub>3</sub> – сильно мезотрофное, Э – эвтрофное. Интегральная оценка: МЕЗ. – мезотрофное, УМ – умеренно мезотрофное, СМ – сильно мезотрофное, ЭВТР. – эвтрофное, УЭ – умеренно эвтрофное.

Исходя из полученных данных, большинство участков относятся к мезотрофному типу, из них выделено два участка с водной массой сильно мезотрофного подтипа (№3 и №5) и один участок с водной массой умеренно мезотрофного подтипа (№7). Эвтрофное состояние характерно для части водохранилища выше гидроузла, отводящих каналов в оз. Песьво и оз. Удомля, а также южной части оз. Песьво (на последнем участке водная масса отнесена к умеренно эвтрофному подтипу). Установлено, что в

большинстве пунктов мониторинговых наблюдений (6 из 8) первичная продукция фитопланктона лимитируется фосфором.

На основе данных дистанционного зондирования составлена серия карт-схем пространственного распределения хлорофилла «а» (рис. 2–5) и выполнена оценка трофического состояния частей акватории Удомельского водохранилища по выбранному показателю.

Трофическое состояние северной части оз. Удомля (тестовый участок №1) по концентрации хлорофилла «а» в целом является умеренно мезотрофным (рис. 2). В пределах участка наблюдается уменьшение концентрации хлорофилла от литоральной к пелагиальной, а затем профундальной частям. Эвтрофное состояние водной массы в пределах литорали обусловлено развитием обширного пояса макрофитов в пределах литорали: на участке протяжённостью 35 метров сменяют друг друга зоны высших водных растений в следующей последовательности: осока острая (*Carex acuta* L.) – манник большой (*Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb.) – тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) – кубышка жёлтая (*Nuphar lutea* (L.) Sm.). Также в этой части акватории наблюдается сплавинообразование (по материалам полевых исследований летнего сезона 2023 г.). Влияет на процесс развития фитопланктона и высшей водной растительности и вынос эвтрофных вод р. Тихомандрицы, проходящей через д. Касково, где расположены сельскохозяйственные территории (устье реки также заболочено).

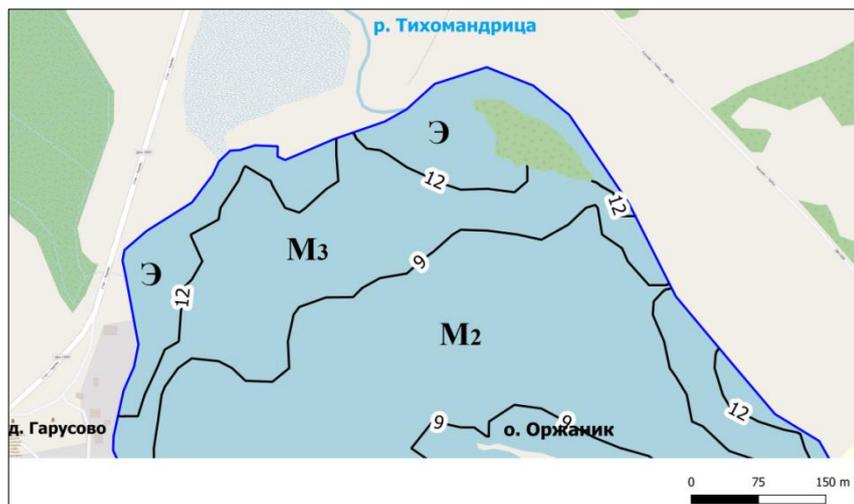


Рис. 2. Трофическое состояние водной массы северной части оз. Удомля<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Цифры на картах-схемах (рис. 2–5) – значения концентрации хлорофилла «а» (мг/м<sup>3</sup>), М<sub>2</sub> – умеренно мезотрофный подтип, М<sub>3</sub> – сильно мезотрофный подтип, Э – эвтрофный тип.

Участки №3 (Участок акватории оз. Удомля в месте слияния с оз. Песьво и отводящим каналом) и №4 (Участок водохранилища в 500 м выше гидроузла) представлены на рис. 3.

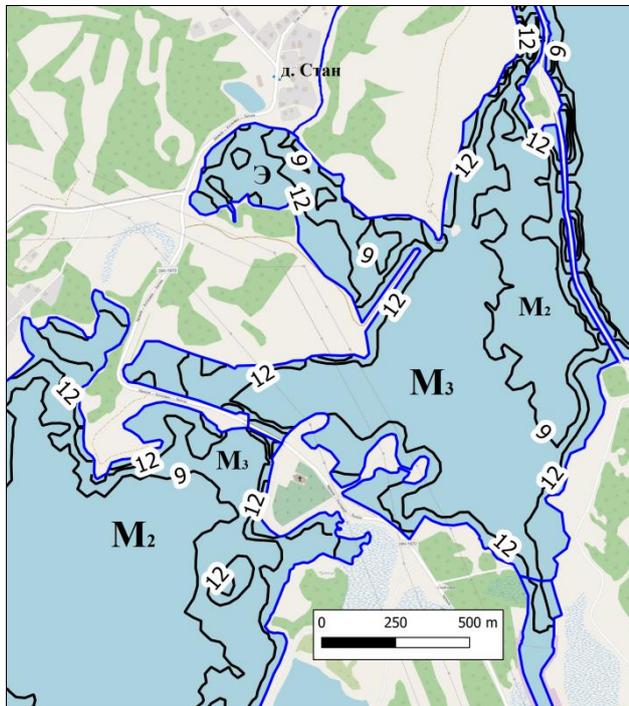


Рис. 3. Трофическое состояние участков «Участок слияния вод оз. Песьво и оз. Удомля» (№3) и «Участок водохранилища в 500 м выше гидроузла» (№4)

Особенность расположения участка №3 – встреча водных потоков из оз. Песьво и отводящего канала в оз. Удомля. На относительно небольшой площади водные потоки сливаются, а затем часть водной массы устремляется в верховья оз. Удомля по сооружённому при помощи серии дамб каналу, а часть – в акваторию доохлаждения р. Съежи.

Сбросные воды от КАЭС (здесь и далее рассматривается двойная роль сбросных вод – как источника химических веществ и как источника тепла, так как сбрасываются подогретые отработанные воды), относительно небольшая площадь участка, хорошая прогреваемость способствуют развитию здесь фитопланктона, определяющего высокие значения хлорофилла «а» в воде. Значительная часть акватории имеет концентрацию хлорофилла от 9 до 12 мг/м<sup>3</sup>, что соответствует сильно мезотрофному состоянию; довольно обширную площадь в восточной части занимает умеренно мезотрофная водная масса. Прибрежная полоса обладает эвтрофным состоянием.

Участок №4 зарегулирован струенаправляющей дамбой, необходимой для контроля режима сброса вод в р. Съезу. В пределах исследуемой части акватории в северо-восточной части трофическое состояние умеренно- и сильно мезотрофное, в юго-западной части – эвтрофное. Относительно небольшая площадь, поступление тёплых сбросных вод, сток с сельскохозяйственных территорий д. Стан – факторы, повышающие уровень трофности. В 2022–2023 гг. в ходе полевых наблюдений выявлены обширные полосы макрофитов: осока острая с вкраплениями рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.) – тростник обыкновенный – кубышка жёлтая, являющихся источником органического вещества и повышения трофности.

В пределах южной части оз. Удомля (участок №7) водная масса в основном умеренно мезотрофная (рис. 4). Особенностью акватории здесь является наличие устьев отводящих каналов от всех градирен, что определяет хорошую прогреваемость прилегающих к ним зон, трофическое состояние которых оценивается как сильно мезотрофное и эвтрофное.



Рис. 4. Трофическое состояние водной массы южной части оз. Удомля

Прибрежная полоса имеет в восточной части эвтрофное состояние, которое определяется, главным образом, тепловым воздействием промплощадки КАЭС, а также сбросом сточных вод.

Концентрация хлорофилла здесь стабильно выше  $12 \text{ мг/м}^3$ . В западной части в прибрежной и приостровной полосах наблюдается более низкое содержание хлорофилла и ширина эвтрофной зоны здесь в основном существенно меньше, чем в восточной части. Прямого антропогенного влияния этот участок акватории не испытывает.

Большая часть водной оз. Песью в пределах участка №8 относится к мезотрофному типу, сильно мезотрофному подтипу (рис. 5). Водная масса прибрежной и приостровной полос относится к эвтрофному типу. Две главные причины определяют повышение трофности на данном участке – сброс подогретых вод по каналу в оз. Песью и сброс хозяйственно-бытовых вод от г. Удомля. Повышение трофического статуса прибрежной зоны обусловлено также стоком с сельскохозяйственных территорий.

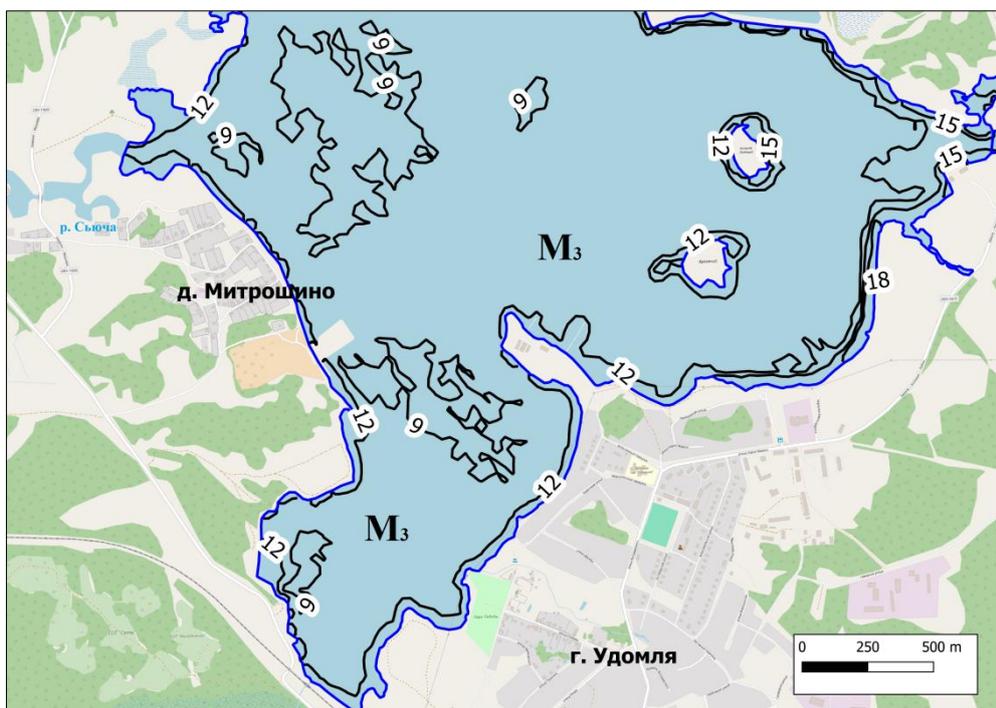


Рис. 5. Трофическое состояние водной массы южной части оз. Песью

**Заключение.** В результате проведенного исследования определено трофическое состояние отдельных участков Удомельского водохранилища. Предпринята попытка использовать интегральную оценку трофности по данным лабораторных анализов, космических снимков и полевых наблюдений за 2020–2023 гг. Для этого разработана балльная шкала трофических уровней по каждому показателю и общая балльная шкала.

Полученные в ходе исследования результаты позволили сделать

следующие выводы:

1. Водная масса большинства изученных участков акватории отнесена к мезотрофному типу (участки №№1, 2, 3, 5, 7). Из них к умеренно мезотрофному подтипу отнесён участок №7, а участки №3 и №5 – к сильно мезотрофному подтипу. Эвтрофный статус присвоен участкам №№4, 6, 8 (водная масса участка №8 – умеренно эвтрофная).

2. Наблюдается ослабление трофности при движении от литоральной к пелагиальной, а затем профундальной частям водохранилища.

3. Трофическое состояние на большинстве изученных участков лимитируется фосфором.

4. Трофическое состояние в пределах каждого участка обусловлено влиянием нескольких факторов: на участке №1 – развитием пояса макрофитов и сплавин, привнесением вод р. Тихомандрицы; на участке №3 – сбросом вод КАЭС, относительно небольшой площадью и хорошей прогреваемостью; на участке №4 – так же, как на участке №3, а также стоком с сельскохозяйственных территорий и развитием пояса макрофитов. На участке №7 трофность определяется сбросом сточных вод атомной станции, тепловым влиянием промплощадки КАЭС, на участке №8 решающую роль в повышении трофности играют сточные воды КАЭС, хозяйственно-бытовые стоки г. Удомля, а также сельскохозяйственный сток.

#### Список литературы

1. Алексеевнина М.С. Санитарная гидробиология с основами водной токсикологии: учеб. пособие / М.С. Алексеевнина, И.В. Поздеев. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. 205 с.
2. Бочаров А.В. Оценка современного состояния внутреннего водоема на основе методов дистанционного зондирования на примере Иваньковского водохранилища: автореферат дис. ... кандидата географических наук. Тверь, 2021. 21 с.
3. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб, 2004. 294 с.
4. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
5. Неверова-Дзиопак Е., Цветкова Л.И. Оценка трофического состояния поверхностных вод: монография. СПб: СПбГАСУ, 2020. 176 с.
6. Отчет по экологической безопасности Калининской АЭС за 2022 год. СПб. 48 с.
7. EarthExplorer. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

*Об авторе:*

РУДНИКОВ Леонид Сергеевич – магистр 2-го курса направления 05.04.06 «Экология и природопользование» ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», (170021, г. Тверь-21, ул. Прошина, д. 3 корп. 2); e-mail: Rudnikov.LS@tversu.ru, ORCID: 0009-0006-0112-2642, SPIN-код: 8847-4030.

## **ASSESSMENT OF THE TROPHIC STATE OF THE TEST SITES OF AREAS OF THE UDOMEL RESERVOIR**

**L.S. Rudnikov**

Tver State University, Tver

An integral point assessment of the trophic state of various sections of the water area of the cooling reservoir of the Kalinin NPP was carried out. Based on remote sensing data for 2020-2022, maps and diagrams of the trophic state of the water area areas according to the concentration of chlorophyll "a" were compiled, which made it possible to identify the geographical features of eutrophication in the reservoir and evaluate the process under study.

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

Рукопись поступила в редакцию 24.02.2024

Рукопись принята к печати 26.02.2024