

## Дистанционный мониторинг мутности и содержания хлорофилла в водоемных источниках Саратовской области

© 2025. Д. А. Кузянов<sup>1</sup>, м. н. с., Л. П. Эрдниев<sup>1</sup>, к. м. н., с. н. с.,  
И. С. Кошелева<sup>1</sup>, м. н. с., Ю. С. Гусев<sup>1</sup>, к. б. н., с. н. с.,  
А. Н. Микеров<sup>1,2</sup>, д. б. н., руководитель, профессор,

<sup>1</sup>Саратовский медицинский научный центр гигиены ФБУН «Федеральный научный  
центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения»

Федеральной службы по надзору

в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека,

410022, Россия, г. Саратов, ул. Заречная, д. 1А, стр. 1,

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского,

410012, Россия, г. Саратов, ул. Большая Казацкая, д. 112,

e-mail: dimakuzyanov2000@gmail.com

Человеческая деятельность оказывает значительное воздействие на водные системы. Регулирование водных ресурсов в водохранилищах, а также различные источники загрязнения играют ключевую роль в изменении показателей качества воды. В связи с этим возрастает важность оперативного мониторинга качества воды источников водоснабжения с целью выявления потенциально загрязнённых участков, где значения показателей мутности и содержания хлорофилла *a* (Chl *a*) характеризуются высокими показателями. Несмотря на простоту методов измерения этих показателей, их применение требует значительных ресурсов, включая материальные, человеческие и временные. В связи с этим растёт интерес к использованию технологий дистанционного зондирования Земли для оценки качества воды. Целью исследования являлась оценка состояния водоемных источников Саратовской области с 2008 по 2023 гг. по таким показателям, как мутность и содержание Chl *a* в воде на основе данных спутникового мониторинга. В работе были проанализированы участки р. Волги (Саратовское водохранилище) и р. Большой Караман, используемые населением для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Полученные результаты позволили разработать и обосновать модель мониторинга плотности и пространственного распределения планктонных водорослей акватории р. Волга на основе следующих факторов: число солнечных дней, температура воздуха, количество осадков и объём водосбора Саратовской ГЭС. Результаты исследования показали выраженную тенденцию к увеличению степени мутности и концентрации Chl *a* в воде рек Большой Караман и Волге в исследуемый период. Выявленные закономерности могут быть использованы для создания системы дистанционного мониторинга состояния водной среды, что в долгосрочной перспективе снизит потребность в проведении контактных измерений в водоемных источниках, пригодных для спутникового наблюдения.

**Ключевые слова:** мутность, хлорофилл *a*, водоемные источники, спутниковый мониторинг.

## Remote monitoring of turbidity and chlorophyll content in water sources of the Saratov region

© 2025. D. A. Kuzyanov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-5070-4431, L. P. Erdniev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5187-7361,  
I. S. Kosheleva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1992-5305, Yu. S. Gusev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7379-484X,  
A. N. Mikerov<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-0670-7918

<sup>1</sup>Saratov Hygiene Medical Research Center of the FBSI “FSC Medical  
and Preventive Health Risk Management Technologies”,  
Unit 1, 1A, Zarechnaya St., Saratov, Russia, 410022,

<sup>2</sup>Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky,  
112, Bolshaya Kazachya St., Saratov, Russia, 410012,  
e-mail: dimakuzyanov2000@gmail.com

tor the water quality for identifying potentially contaminated sites of water bodies where high levels of turbidity and chlorophyll *a* (Chl *a*) are observed. Despite the simplicity of measuring the above parameters, their application requires significant resources, including material, human, and temporal resources. Therefore, there is growing interest in utilizing remote sensing technologies for water quality assessment. The aim of this study was to assess the water sources status in the Saratov region from 2008 to 2023 in terms of turbidity and Chl *a* content based on satellite monitoring data. The study analyzed the sites of the Volga River (Saratov reservoir) and the Bolshoy Karaman River, used by the population for domestic water supply. The obtained results allowed developing and justifying a model for monitoring the density and spatial distribution of plankton algae in the Volga River based on the number of sunny days, air temperature, precipitation, and the spillway volume of the Saratov hydroelectric power station. The research findings showed a pronounced trend towards increased turbidity and Chl *a* content in the water of the Bolshoy Karaman and Volga rivers during the study period. The identified patterns can be used to create a remote monitoring system for the aquatic environment, which in the long term will reduce the need for contact measurements in water sources suitable for satellite observation.

**Keywords:** turbidity, chlorophyll *a*, water sources, satellite monitoring.

Качество воды водоисточников существенно зависит от их географического расположения, гидрологических и гидрогеологических условий. Формирование качества воды происходит в результате внутриводоёмных процессов и часто подвержено воздействию внешних факторов. Антропогенные воздействия, такие как регулирование водных ресурсов в водохранилищах, изменение температуры воды за счёт создания мелководий, а также наличие различных загрязнителей – органических или металлорганических соединений, неорганических веществ играют ключевую роль в изменении показателей качества воды [1].

При загрязнении водоисточников недостаточно очищенными хозяйственно-бытовыми сточными водами, ливневыми и талыми стоками с поверхности водосбора, в них накапливается значительное количество органических загрязнений и биогенных веществ, что приводит к увеличению показателя мутности. Такие водоисточники, обеспеченные элементами, необходимыми для питания водных организмов, также подвержены эвтрофикации [2].

Развитие массовых скоплений фитопланктона и отмирание клеток в поверхностных водоисточниках значительно ухудшают качество воды. Этот процесс сопровождается увеличением мутности и цветности воды, повышением концентрации органических веществ, а также развитием гнилостных процессов и формированием неприятных запахов и вкусов. Интенсивное развитие цианобактерий приводит к увеличению в воде концентрации синтезируемых ими цианотоксинов, что представляет серьёзную угрозу для здоровья населения [3].

Таким образом, качество питьевой воды напрямую зависит от тщательно подобранных методов очистки и эффективного контроля работы систем водоснабжения в целом, включая отдельные сооружения. В связи с этим возрастает важность проведения оперативного мониторинга качества воды источников

водоснабжения с целью выявления потенциально загрязнённых участков, где показатели мутности и содержания хлорофилла *a* (Chl *a*) характеризуются высокими значениями.

Измерение мутности и концентрации Chl *a* в водных образцах представляет собой распространённую практику в области экологического анализа. Несмотря на мнимую простоту методов измерения, их применение требует значительных ресурсов, включая материальные, человеческие и временные. В связи с этим возрастает интерес к использованию технологий дистанционного зондирования Земли для проведения исследований по оценке качества воды [4].

В настоящее время активное применение спутниковых аппаратов для мониторинга водных объектов основано на анализе спектров отражения исследуемой поверхности. Основными инструментами в этой области являются так называемые «индексные» изображения. На основе комбинации значений яркости в определённых каналах, информативных для выделения исследуемого объекта, и расчёта по этим значениям «спектрального индекса» объекта строится изображение, соответствующее значению индекса в каждом пикселе, что и позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состояние. Для обнаружения и оценки мутности зачастую используются различные варианты нормализованного разностного индекса мутности (NDTI, Normalized Difference Turbidity Index) [5]; для оценки развития фитопланктона и содержания Chl *a* – нормализованный разностный индекс хлорофилла (NDCI, Normalized Difference Chlorophyll Index). Эти индексы широко применяются в экологических и геофизических исследованиях для оценки качества воды [6].

Индекс NDCI широко используется для количественной оценки содержания Chl *a* в водных средах и анализа состояния растительного покрова на поверхности Земли. Он основан на различиях в поглощении света

хлорофиллом в ближнем инфракрасном и видимом спектральных диапазонах, что позволяет получать количественные показатели содержания хлорофилла в изучаемой области. Диапазон значений NDCI варьирует от -1 до 1 в областях без влияния облачных искажений [6].

Индекс NDTI используется для оценки степени мутности воды на основе анализа отражательных спектров водных объектов. Спектральные характеристики мутной воды, поддающиеся изменениям, могут быть использованы для выделения пикселей, соответствующих мутной воде. Обычно значения NDTI варьируют от -0,2 до +0,25, где более низкое значение свидетельствует о чистой воде, а более высокое указывает на сильно мутную воду [5].

Путём анализа спектральных индексов и их динамики за определённый период можно выявить тенденции изменения качества воды, без непосредственного контакта с объектом исследования, что важно для обеспечения безопасности питьевого водоснабжения и охраны окружающей среды.

Цель настоящего исследования состоит в анализе данных изменения показателей мутности и содержания хлорофилла *a* в источниках питьевого водоснабжения Саратовской области за период с 2008 по 2023 гг. с применением методов дистанционного зондирования Земли.

**Объекты и методы исследования**

Объектами исследования стали участки рек Большой Караман (51°62'55" с. ш., 46°47'60" в. д.; 51°62'08" с. ш., 46°52'37" в. д.; 51°60'20" с. ш., 46°54'50" в. д.; 51°60'14" с. ш., 46°47'53" в. д.) протяжённостью 10 км вблизи села Ленинское (Энгельсский район, Саратовская область) и Волги (52°07'97" с. ш., 47°52'47" в. д.; 52°09'19" с. ш., 47°60'29" в. д.; 52°00'65" с. ш., 47°78'70" в. д.; 51°99'23" с. ш., 47°60'97" в. д.) протяжённостью 17 км вблизи села Красноармейское на удалении 100 м от береговой линии (Энгельсский район, Саратовская область).

Сбор данных об изменении зон показателя мутности и содержания хлорофилла в источниках питьевого водоснабжения (реки Волга и Большой Караман) выполнялся с использованием разработанного программного алгоритма на основе программного обеспечения ArcGIS версии 10.2.1. Анализ данных проводился на основе спутниковых снимков, полученных в период с 2008 по 2023 гг. с использованием спутников пятого, седьмого и восьмого поколения «Landsat» (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Принцип функционирования программного алгоритма заключается в применении набора вычислительных алгоритмов, предназначенных для расчёта индексов NDTI и NDCI. В таблице 1 приведены формулы вычисления данных индексов.

Полученные изображения водной поверхности подвергались атмосферной коррекции и разделялись на зоны, характеризующиеся значениями индексов NDTI и NDCI. Разделение изображений на зоны основывалось на вычислении среднего арифметического значения индексов NDTI и NDCI и их стандартных отклонений (SD), вычисленных на основе статистических данных, полученных из изображений. Охват зон характеризовался диапазонами индексов NDTI и NDCI (высокий, средний и низкий) и выражался в квадратных метрах (м<sup>2</sup>). К низкому диапазону отнесены индексы NDTI и NDCI, значения которых ниже величины, вычисляемой по формуле  $M - SD$ , к среднему диапазону – значения, величина которых находится в пределах  $M \pm SD$ , а к высокому диапазону – значения, превышающие величину  $M + SD$  [5].

Перераспределение биомассы фитопланктона в воде р. Волги анализировалось на основе данных по суммарному холостому сбросу воды через ГЭС в весенне-летний период проведения исследований, предоставленных ПАО «Русгидро» (<http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/?date>). Данные по количеству осадков и температуре воздуха в период наблюдения взяты с метеорологического сайта rp5.ru (<https://rp5.ru>), данные по числу

**Таблица 1 / Table 1**

Формулы расчёта нормализованного разностного индекса мутности (NDTI) и нормализованного разностного индекса хлорофилла (NDCI) / Formulas for calculating Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) and Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) [5, 6]

Индекс / Index	Формула / Formula
NDTI	$(\text{red band} - \text{green band}) / (\text{red band} + \text{green band})$
NDCI	$(\text{NIR band} - \text{red band}) / (\text{NIR band} + \text{red band})$

световых дней – из архива погоды (<https://www.gismeteo.ru/>). Достоверная информация охватывает временной промежуток с 2015 по 2022 гг.

Статистические зависимости, описывающие взаимосвязи динамики изменения показателей мутности и содержания Chl *a* в воде исследуемых рек, основывались на результатах множественного регрессионного анализа, проводимого с целью выявления и изучения связей количественных признаков при помощи расчёта коэффициента корреляции Пирсона с выводом уравнения множественной регрессии и построением прогнозной модели. Вклад отдельных факторов в формирование множественной регрессионной модели был оценён с использованием метода многомерного дисперсионного анализа (MANOVA).

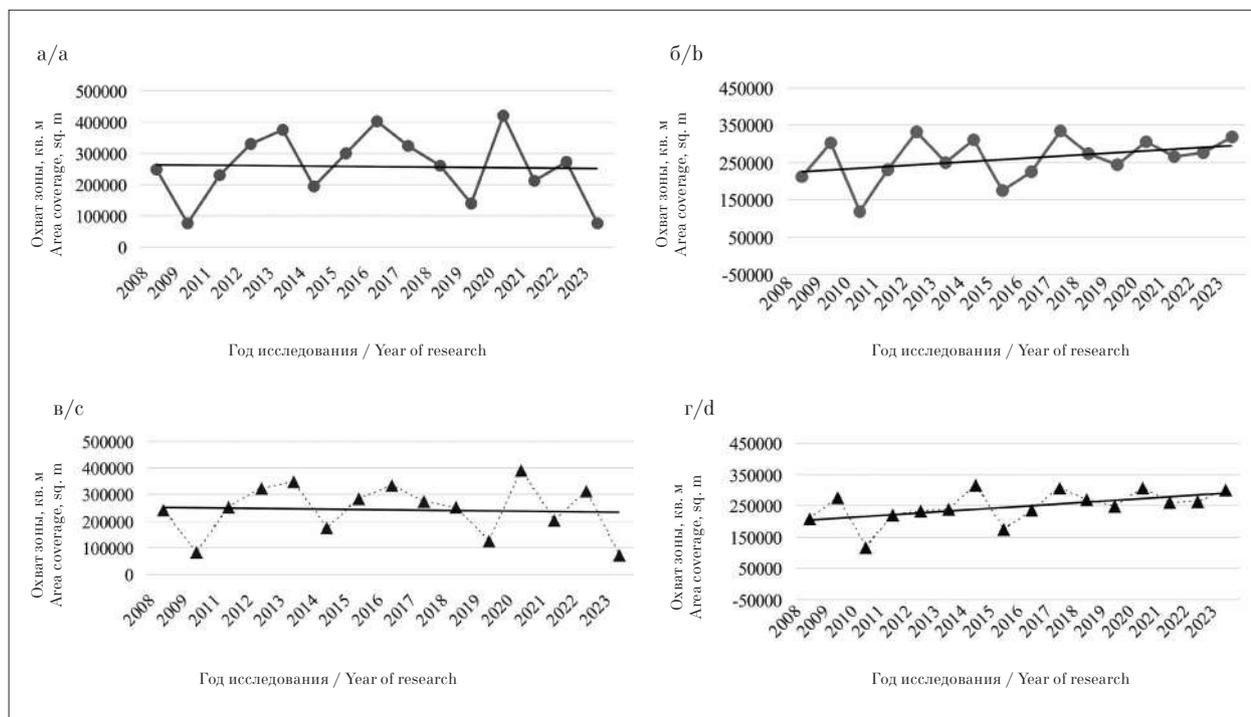
### Результаты и обсуждение

Оценка изменения динамических показателей мутности и содержания Chl *a* в воде рек Волги и Большого Карамана проводилась за период с мая по июль с 2008 по 2023 гг. Известно, что р. Большой Караман лишена внешних источников водоснабжения и в течение летнего

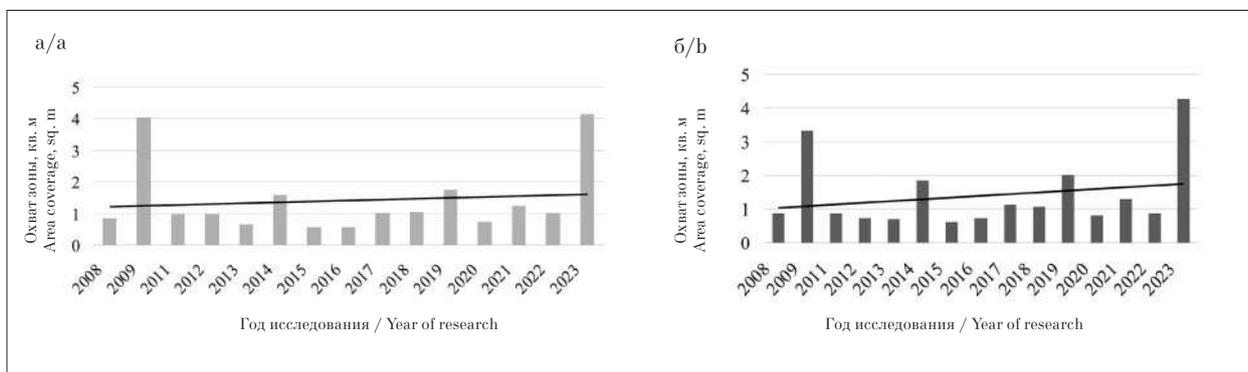
периода в верховьях подвержена засухе. Снеготаяние и грунтовые стоки являются основными источниками её питания. Весеннее половодье составляет примерно 80% от годового стока, играя ключевую роль в водном режиме. Вдоль реки созданы водохранилища и пруды для аккумуляции водных ресурсов в период паводков и паводков, в последующем используемые в целях водоснабжения и орошения [7].

На рисунке 1 отражена годовая динамика изменений охвата зон (м<sup>2</sup>), соответствующих среднему диапазону значений индексов. Весной отмечается уменьшение мутности и содержания Chl *a* в воде, в то время как летом, как логично предположить, наблюдается выраженное увеличение значений обоих индексов по сравнению с весенним периодом.

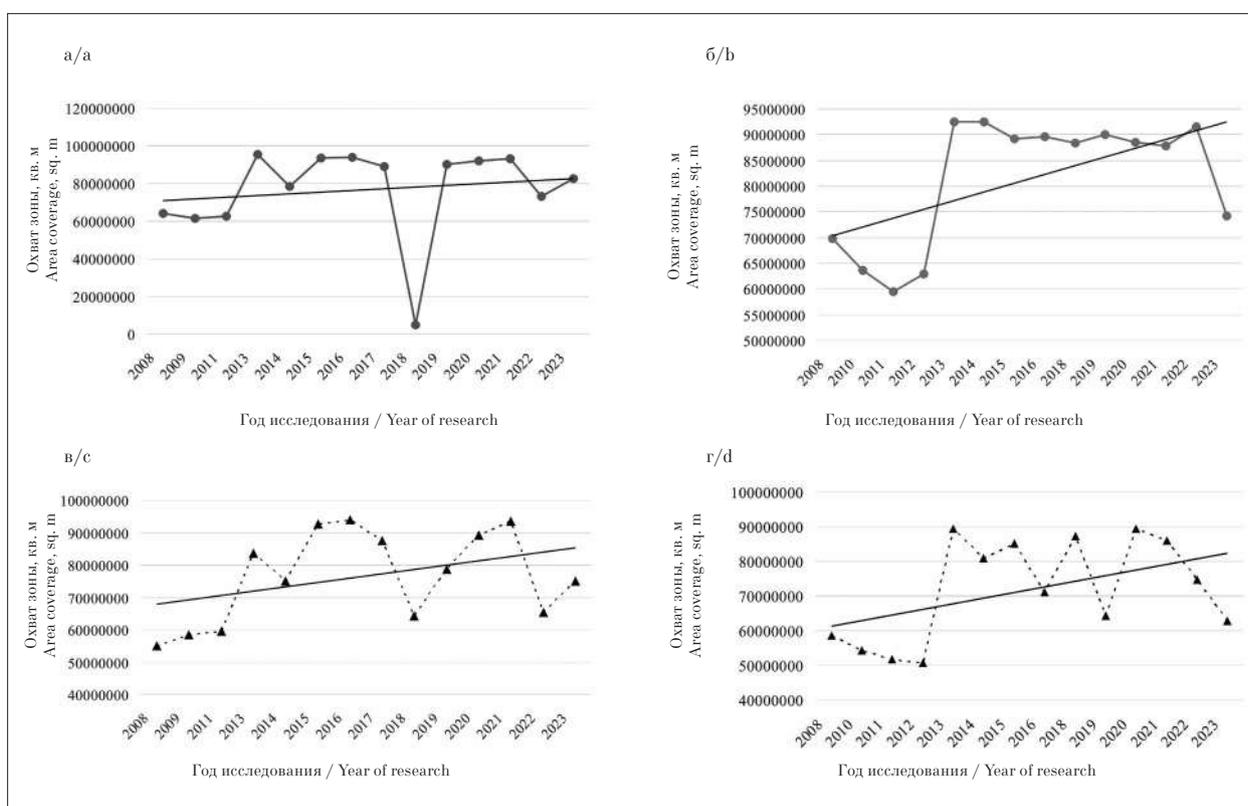
Для выявления общего тренда между изменениями индексов хлорофилла и мутности было определено отношение величины охвата зон (м<sup>2</sup>), соответствующих среднему диапазону значений индексов, зарегистрированных в мае, к значениям, зарегистрированным в июле в воде р. Большой Караман (рис. 2). Тенденция указывает на ежегодное повышение значений мутности и содержания Chl *a*,



**Рис. 1.** Динамика изменения охвата зон, соответствующих среднему диапазону значений индексов NDCI (а – весна, б – лето) и NDTI (в – весна, г – лето) в р. Большой Караман в течение периода наблюдения. Линия на рисунках 1–3 отражает долговременный тренд изменения исследуемых показателей / **Fig. 1.** Dynamics of the coverage of zones corresponding to the average range of values of the NDCI (a – spring, b – summer) and NDTI (c – spring, d – summer) indices in the Bolshoy Karaman River during the observation period. The line in the Figures 1–3 reflects the long-term trend of changes in the studied indicators



**Рис. 2.** Динамика изменения величины отношения охвата зон (м<sup>2</sup>), соответствующих среднему диапазону значений индексов хлорофилла *a* (а) и мутности (б) в воде реки Большой Караман  
**Fig. 2.** Dynamics of the value of the coverage of zones ratio (m<sup>2</sup>) corresponding to the average range of values of chlorophyll *a* indices (a) and turbidity (b) in the water of the Bolshoy Karaman River



**Рис. 3.** Динамика изменения охвата зон, соответствующих среднему диапазону значений индексов NDCI (а – весна, б – лето) и NDTI (в – весна, г – лето) в р. Волге в течение периода наблюдения  
**Fig. 3.** Dynamics of change in coverage of zones corresponding to the average range of values of the NDCI (a – spring, b – summer) and NDTI (c – spring, d – summer) indices in the Volga River during the observation period

свидетельствуя о неблагоприятном изменении состояния водной среды.

Выявленная тенденция свидетельствует о нарастающем загрязнении р. Большой Караман, что представляет потенциальную угрозу для здоровья жителей Марксовского, Федоровского, Советского и Энгельсского районов, проживающих вдоль данного водотока. Предполагается, что наблюдаемое явление может быть характерным и для других малых рек в регионе,

не обеспечиваемых системой оросительных каналов из р. Волги [8]. Подобная тенденция характерна также для р. Волги, в частности для Саратовского водохранилища (рис. 3).

За рассматриваемый период наблюдается устойчивый рост концентрации Chl *a* в воде р. Волги, начиная с мая, сохраняющийся в течение летне-осеннего периода. Этот тренд свидетельствует о систематических изменениях в экосистеме реки, проявляющихся

в массовом цветении фитопланктона. Вместе с тем, отмечается увеличение уровня мутности воды, указывающее на стабильную тенденцию к накоплению загрязнителей в речной экосистеме. Этот явный тренд, вероятно, обусловлен наличием различных загрязнений в воде реки, вызванных влиянием инфраструктуры г. Саратова, как отмечено ранее исследователями [9].

Загрязнение водоёмов биогенными соединениями, особенно азотом и фосфором, способствует массовому развитию водорослей и цианобактерий. Данное явление давно наблюдается в водохранилищах Средней и Нижней Волги летом, и влечёт проблемы в обеспечении населения питьевой водой [10].

Влияние человеческой деятельности на речные бассейны, включая регулирование сброса воды через гидроэлектростанции (ГЭС), приводит к изменению естественного руслового потока. Гидроэлектростанции играют ключевую роль в управлении речными системами, контролируя расход воды, режимы паводков

и уровни воды в водоёме. Это часто приводит к уменьшению проточности бассейна, образованию застойных областей и интенсивному эвтрофированию водных объектов [11–14].

Фотосинтетическая активность фитопланктона подвержена влиянию различных естественных факторов, включая количество солнечных дней и температуру воздуха. Солнечное излучение играет ключевую роль в стимуляции фотосинтеза, способствуя увеличению биомассы фитопланктона. В свою очередь, повышение температуры воздуха интенсифицирует тепловые процессы в верхних слоях воды, что способствует вертикальному перемешиванию и равномерному распределению фитопланктона, особенно в тёплое время года [15].

Для оценки влияния перечисленных факторов на перераспределение биомассы фитопланктона в воде р. Волги были проанализированы данные по холостому водосбросу Саратовской ГЭС, количеству осенне-зимних

**Таблица 2 / Table 2**  
 Факторы, влияющие на перераспределение биомассы фитопланктона в воде р. Волги  
 Factors affecting the redistribution of phytoplankton biomass in the water of the Volga River

Год исследования / Year of study	Месяц исследования / Month of study	Охват средней зоны показателя хлорофилла, м <sup>2</sup> / The coverage of the average Chl indicator zone, m <sup>2</sup>	Суммарные осенне-зимние осадки, мм / Total autumn-winter precipitation, mm	Холостой водосброс Саратовской ГЭС, м <sup>3</sup> /с / Hydroelectric Power Station spillway, m <sup>3</sup> /s	Средняя температура воздуха, °С / Average air temperature, °С	Количество солнечных дней / The number of sunny days
2015	Май / May	89264700	1337	2751	15,9	19
	Июнь / June				22,6	18
	Июль / July				20,7	17
	Август / August				18,8	19
2016	Май / May	89693100	2503	61504	14,8	9
	Июнь / June				19,8	9
	Июль / July				22,3	7
	Август / August				23,9	17
2019	Май / May	90045900	1931	31569	17,2	20
	Июнь / June				21,7	15
	Июль / July				20,1	10
	Август / August				18,4	15
2021	Май / May	87891300	1346	25845	17,6	16
	Июнь / June				20,5	13
	Июль / July				23,3	10
	Август / August				23,7	20
2022	Май / May	91538100	2226	18847	10,5	12
	Июнь / June				19,6	11
	Июль / July				20,3	14
	Август / August				22,7	24

Таблица 3 / Table 3

Результаты многомерного дисперсионного анализа MANOVA  
Results of Multivariate Analysis of Variance (MANOVA)

Критерий / Criterion	Значение F-критерия F-statistic value	Значимость Significance
Количество солнечных дней / Number of sunny days	2,252	0,163
Холостой водосброс Саратовской ГЭС The spillway of the Saratov HPP	1,492	0,324
Суммарные осенне-зимние осадки Total autumn-winter precipitation	1,507	0,320
Средняя температура воздуха Average air temperature	1,377	0,363

осадков, средней температуре воздуха, числу солнечных дней за период проведения исследования. Для увеличения объёма выборки данные анализировались в период с мая по август. Параметры сброса воды и метеорологические условия в этот период представлены в таблице 2.

Многомерный дисперсионный анализ (MANOVA) был применён для оценки влияния различных факторов (число солнечных дней, температура воздуха, количество осадков и объём водосброса Саратовской ГЭС) на охват средней зоны показателя хлорофилла (табл. 3). Из полученных результатов (табл. 3) следует, что ни один из учтённых критериев не достиг статистической значимости на уровне  $p < 0,05$ . Это позволяет заключить, что ни количество солнечных дней, ни объём водосброса Саратовской ГЭС, ни суммарные осенне-зимние осадки, ни средняя температура воздуха в данном контексте в отдельности не оказывают статистически значимого влияния на формирование зон содержания хлорофилла.

Для более полного понимания процессов, влияющих на динамику изменения содержания Chl *a* в р. Волге, был проведён множественный регрессионный анализ, оценивающий зависимость изменения индекса NDCI от следующих переменных: число солнечных дней, температура воздуха, количество осадков и объём водосброса Саратовской ГЭС. Полученная зависимость, описывающая динамику изменения концентрации Chl *a* в воде Саратовского водохранилища, выражается следующим уравнением:

$$Y = 84729127,5077 + 4732,2106 \cdot X_1 - 63,6303 \cdot X_2 + 3625,109 \cdot X_3 - 4960,7907 \cdot X_4,$$

где  $Y$  – охват средней зоны показателя хлорофилла, м<sup>2</sup>;  $X_1$  – число солнечных дней, сут;  $X_2$  – холодной водосброс Саратовской ГЭС,

м<sup>3</sup>/с;  $X_3$  – суммарные осенне-зимние осадки, мм;  $X_4$  – средняя температура воздуха, °С.

Оценка статистической значимости уравнения множественной регрессии продемонстрировала высокую степень адекватности построенной модели: множественный коэффициент корреляции ( $R$ ) равен 0,9881, коэффициент детерминации ( $R^2$ ) составляет 0,97, а средняя ошибка аппроксимации ( $A$ ) равна 0,16%.

В ходе выполнения корреляционно-регрессионного анализа установлена значительная статистическая взаимосвязь между мутностью и содержанием Chl *a* в воде рек Волги и Большого Карамана. Коэффициент корреляции ( $R$ ) составил 0,707 для Волги и 0,979 для Большого Карамана, а коэффициент детерминации ( $R^2$ ) – 0,5 и 0,958 соответственно.

Обнаруженная закономерность указывает на значительное влияние на уровень мутности воды в узкой р. Большой Караман присутствия фитопланктона. В отличие от этого, в р. Волге наблюдается более выраженное воздействие антропогенных факторов, в частности, сброса сточных вод на мутность воды. В связи с этим для разработки модели изменения мутности аналогичной регрессионной модели, связанной с содержанием Chl *a* в воде, требуются дополнительные исследования.

### Заключение

В ходе исследования разработана и обоснована модель мониторинга для получения данных о плотности и пространственном распределении планктонных водорослей. Модель основана на индексе NDCI и имеет потенциал для калибровки при проведении дополнительных исследований по измерению содержания Chl *a* в водной среде *in situ*.

В ходе проведённого исследования выявлена выраженная тенденция к увеличению

степени мутности и концентрации Chl *a* в воде рек Большой Караман и Волга в период с 2008 по 2023 гг.

В результате анализа данных обнаружена значительная корреляция между индексами NDTI и NDCI в р. Большой Караман. Это указывает на доминирующую роль фитопланктона в формировании оптических свойств воды в данном водном объекте. В отличие от этого, в р. Волге выявлена менее выраженная взаимосвязь между указанными индексами, вероятно, обусловленная воздействием различных дополнительных факторов, таких как сточные воды, влияющих на оптические характеристики воды.

Таким образом, обнаруженные закономерности позволяют рассмотреть возможность создания системы дистанционного мониторинга состояния водоисточников, что в долгосрочной перспективе снизит потребность в проведении контактных измерений в средах, пригодных для спутникового наблюдения.

### Литература

1. Didenko N., Skripnuk D., Mirolyubova O. The effects of human behavior on fresh water resources // Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Sofia, 2017. V. 17. P. 883–892. doi: 10.5593/sgem2017/53/S21.110
2. Aryal R., Vigneswaran S., Kandasamy J., Naidu R. Urban stormwater quality and treatment // Korean J. Chem. Eng. 2010. V. 27. P. 1343–1359. doi: 10.1007/s11814-010-0387-0
3. Кутявина Т.И., Кантор Г.Я., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Применение методов обработки и анализа космических снимков для изучения эвтрофированных водоёмов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 14–25. doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-014-025
4. Ritchie J.C., Zimba P.V., Everitt J.H. Remote sensing techniques to assess water quality // Photogramm. Eng. Remote Sens. 2003. V. 69. No. 6. P. 695–704. doi: 10.14358/PERS.69.6.695
5. Bid S., Siddique G. Identification of seasonal variation of water turbidity using NDTI method in Panchet Hill Dam, India // Model. Earth Syst. Environ. 2019. V. 5. P. 1179–1200. doi: 10.1007/s40808-019-00609-8
6. Кутявина Т.И., Рутман В.В., Ашихмина Т.Я. Дистанционный мониторинг зарастания высшей водной растительностью акватории эвтрофированного водохранилища // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 36–40. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-036-040
7. Gusarov A.V. The impact of contemporary changes in climate and land use/cover on tendencies in water flow, suspended sediment yield and erosion intensity in the

northeastern part of the Don River basin, SW European Russia // Environ. Res. 2019. V. 175. P. 468–488. doi: 10.1016/j.envres.2019.03.057

8. Ovchinnikov A.S., Loboyko V.F., Bocharnikov V.S., Fomin S.D., Ovcharova A.Y. State of the small rivers of the Volga basin within the lower Volga // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.: proceedings of the conference AgroCON-2019. V. 341. Kurgan: IOP Publishing Ltd., 2019. Article No. 012107. doi: 10.1088/1755-1315/341/1/012107

9. Kosarev A.V., Kosheleva I.S., Chekmizov V.A., Pankratova Yu.A., Mikerov A.N. Development of a geoinformation atlas of the sanitary and chemical state of water sources in the arid region // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.: proceedings of the conference DAICRA-2021. V. 949. Yekaterinburg: IOP Publishing Ltd., 2022. Article No. 012014. doi: 10.1088/1755-1315/949/1/012014

10. Косарев А.В., Иванов Д.Е., Микеров А.Н., Савина К.А., Валеев Т.К., Сулейманов Р.А. Применение геоинформационных технологий и дистанционного зондирования Земли для оценки влияния аридности территории на качество воды малых рек // Гигиена и санитария. 2021. Т. 100. № 10. С. 1052–1059. doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-10-1052-1059

11. Wagner T., Erickson L.E. Sustainable management of eutrophic lakes and reservoirs // Journal of Environmental Protection. 2017. V. 8. No. 4. P. 436–463. doi: 10.4236/jep.2017.84032

12. Shourian M., Moridi A., Kaveh M. Modeling of eutrophication and strategies for improvement of water quality in reservoirs // Water Sci. Technol. 2016. V. 74. No. 6. P. 1376–1385. doi: 10.2166/wst.2016.322

13. Vieira J.M.P., Pinho J.L., Dias N., Schwanenberg D., van den Boogaard H.F.P. Parameter estimation for eutrophication models in reservoirs // Water Sci. Technol. 2013. V. 68. No. 2. P. 319–327. doi: 10.2166/wst.2013.248

14. Wang L., Liu L., Zheng B. Eutrophication development and its key regulating factors in a water-supply reservoir in North China // J. Environ. Sci. 2013. V. 25. No. 5. P. 962–970. doi: 10.1016/S1001-0742(12)60120-X

15. Sand-Jensen K.A. Environmental variables and their effect on photosynthesis of aquatic plant communities // Aquat. Bot. 1989. V. 34. No. 1–3. P. 5–25. doi: 10.1016/0304-3770(89)90048-X

### References

1. Didenko N., Skripnuk D., Mirolyubova O. The effects of human behavior on fresh water resources // Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Sofia, 2017. V. 17. P. 883–892. doi: 10.5593/sgem2017/53/S21.110
2. Aryal R., Vigneswaran S., Kandasamy J., Naidu R. Urban stormwater quality and treatment // Korean J. Chem. Eng. 2010. V. 27. P. 1343–1359. doi: 10.1007/s11814-010-0387-0

3. Kut'yavina T.I., Kantor G.Ya., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. Application of methods for processing and analysis of satellite images for the study of eutrophied reservoirs (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 2. P. 14–25 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-014-025
4. Ritchie J.C., Zimba P.V., Everitt J.H. Remote sensing techniques to assess water quality // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2003. V. 69. No. 6. P. 695–704. doi: 10.14358/PERS.69.6.695
5. Bid S., Siddique G. Identification of seasonal variation of water turbidity using NDTI method in Panchet Hill Dam, India // *Model. Earth Syst. Environ.* 2019. V. 5. P. 1179–1200. doi: 10.1007/s40808-019-00609-8
6. Kut'yavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Remote monitoring of overgrowth of the eutrophicated reservoir water area by higher aquatic vegetation // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 36–40 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-036-040
7. Gusarov A.V. The impact of contemporary changes in climate and land use/cover on tendencies in water flow, suspended sediment yield and erosion intensity in the northeastern part of the Don River basin, SW European Russia // *Environ. Res.* 2019. V. 175. P. 468–488. doi: 10.1016/j.envres.2019.03.057
8. Ovchinnikov A.S., Loboyko V.F., Bocharnikov V.S., Fomin S.D., Ovcharova A.Y. State of the small rivers of the Volga basin within the lower Volga // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: proceedings of the conference AgroCON-2019*. V. 341. Kurgan: IOP Publishing Ltd., 2019. Article No. 012107. doi: 10.1088/1755-1315/341/1/012107
9. Kosarev A.V., Kosheleva I.S., Chekmizov V.A., Pankratova Y.A., Mikerov A.N. Development of a geoinformation atlas of the sanitary and chemical state of water sources in the arid region // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.: proceedings of the conference DAICRA-2021*. V. 949. Yekaterinburg: IOP Publishing Ltd., 2022. Article No. 012014. doi: 10.1088/1755-1315/949/1/012014
10. Kosarev A.V., Ivanov D.E., Mikerov A.N., Savina K.A., Valeev T.K., Suleimanov R.A. Application of geoinformation technologies and remote sensing of the Earth to assess the impact of aridity of the territory on the water quality of small rivers // *Hygiene and Sanitation*. 2021. V. 100. No 10. P. 1052–1059 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-10-1052-1059
11. Wagner T., Erickson L.E. Sustainable management of eutrophic lakes and reservoirs // *Journal of Environmental Protection*. 2017. V. 8. No. 4. P. 436–463. doi: 10.4236/jep.2017.84032
12. Shourian M., Moridi A., Kaveh M. Modeling of eutrophication and strategies for improvement of water quality in reservoirs // *Water Sci. Technol.* 2016. V. 74. No. 6. P. 1376–1385. doi: 10.2166/wst.2016.322
13. Vieira J.M.P., Pinho J.L., Dias N., Schwanenberg D., Van Den Boogaard H.F.P. Parameter estimation for eutrophication models in reservoirs // *Water Sci. Technol.* 2013. V. 68. No. 2. P. 319–327. doi: 10.2166/wst.2013.248
14. Wang L., Liu L., Zheng B. Eutrophication development and its key regulating factors in a water-supply reservoir in North China // *J. Environ. Sci.* 2013. V. 25. No. 5. P. 962–970. doi: 10.1016/S1001-0742(12)60120-X
15. Sand-Jensen K.A. Environmental variables and their effect on photosynthesis of aquatic plant communities // *Aquat. Bot.* 1989. V. 34. No. 1–3. P. 5–25. doi: 10.1016/0304-3770(89)90048-X