



ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

ENVIRONMENTAL MONITORING

DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-232-240

EDN: HCCIZZ

УДК 504.75

Научная статья / Research article

Мониторинг развития сине-зеленых водорослей в Куйбышевском водохранилище при помощи индексов дистанционного зондирования Земли

Д.Н. Шерстобитов  , В.В. Ермаков ,
В.Н. Пыстин , О.В. Тупицына 

*Самарский государственный технический университет (СамГТУ),
Самара, Российская Федерация
sherstobitovdn@gmail.com*

Аннотация. Представлены результаты дистанционного мониторинга сине-зеленых водорослей Куйбышевского водохранилища, приводящих к эвтрофикации водоема. Мультиспектральные снимки, выполненные спутником дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства Sentinel-2, были обработаны при помощи программного обеспечения QGIS. Обработка спутниковых снимков производилась при помощи спектральных индексов. После применения нескольких спектральных индексов были выбраны три наиболее информативных: NDVI, NDWI и SIPI. Использование обработанных снимков позволило более четко определить границы распространения сине-зеленых водорослей, а также зоны наиболее интенсивного развития биомассы. Применение нескольких спектральных индексов позволило определить наиболее подходящие для использования данных при неблагоприятных метеорологических условиях. Анализ обработанных спутниковых снимков дает возможность оценивать интенсивность развития сине-зеленых водорослей. Это является основой для разработки прогнозной модели изменения биомассы в водоемах средней полосы Российской Федерации.

© Шерстобитов Д.Н., Ермаков В.В., Пыстин В.Н., Тупицына О.В., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: сине-зеленые водоросли, дистанционное зондирование Земли, водохранилище, мониторинг

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

История статьи: поступила в редакцию 28.09.2022; доработана после рецензирования 10.10.2022; принята к публикации 15.02.2023.

Для цитирования: Шерстобитов Д.Н., Ермаков В.В., Пыстин В.Н., Тупицына О.В. Мониторинг развития сине-зеленых водорослей в Куйбышевском водохранилище при помощи индексов дистанционного зондирования Земли // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 2. С. 232–240. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-2-232-240>

Monitoring of the development of blue-green algae in the Kuibyshev reservoir using remote sensing indices

Danil N. Sherstobitov  , Vasily V. Ermakov ,
Vitaliy N. Pystin , Olga V. Tupitsyna 

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

sherstobitovdn@gmail.com

Abstract. The research presents the results of remote monitoring of blue-green algae of the Kuibyshev reservoir, leading to eutrophication of the reservoir. Multispectral images were taken by the European Space Agency's Sentinel-2 remote sensing satellite and were processed by using QGIS software. Satellite images were processed using spectral indices. After using several spectral indices, the three most informative ones were selected: NDVI, NDWI and SIPI. The usage of processed images made it possible to define the boundaries of the distribution of blue-green algae more clearly, as well as the zones of the most intensive development of biomass. The use of several spectral indices made it possible to determine the most suitable data for the usage under adverse meteorological conditions. The analysis of the processed satellite images makes it possible to assess the intensity of the development of blue-green algae. This is the basis for the development of a forecast model of biomass changes in the reservoirs of the middle zone of the Russian Federation.

Keywords: blue-green algae, remote sensing, reservoir, environmental monitoring

Authors' contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Article history: received 28.09.2022; revised 10.10.2022; accepted 15.02.2023.

For citation: *Sherstobitov DN, Ermakov VV, Pystin VN, Tupitsyna OV. Monitoring of the development of blue-green algae in the Kuibyshev reservoir using remote sensing indices. RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2023;31(2):232–240. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-2-232-240>*

Введение

Интенсивное развитие сине-зеленых водорослей стало актуальной проблемой для рек и пресных водоемов средней полосы в связи с климатическими изменениями, в частности повышением температуры на поверхности земли и активным антропогенным воздействием.

В последние годы данная проблема стала характерна также и для Куйбышевского водохранилища реки Волга. Куйбышевское водохранилище – крупнейшее водохранилище на реке Волга, образованное плотиной Жигулевской ГЭС. Строительство каскада водохранилищ изменило сток и гидрологический режим реки Волга. Низкая скорость течения, повышающаяся температура [1], стоки, богатые питательными веществами, способствуют размножению сине-зеленых водорослей. Сине-зеленые водоросли при благоприятных для них условиях интенсивно размножаются в поверхностном слое и ограничивают насыщение водоема кислородом. Следует отметить, что при гибели сине-зеленые водоросли оседают на дно и являются пищей для бактерий. Разложение биомассы ведет к дальнейшему сокращению растворенного кислорода по всей толще воды.

Основной угрозой кроме сокращения количества кислорода в водоемах является также способность сине-зеленых водорослей продуцировать токсичные метаболиты (цианотоксины) [2], представляющие опасность жизни и здоровью людей [3]. Интенсивное размножение сине-зеленых водорослей ведет к эвтрофированию водоемов [4], «цветение» водоемов признано ООН одной из важных проблем современного мира [5].

Для решения проблемы увеличения количества сине-зеленых водорослей в настоящее время разработано множество различных способов их сбора при помощи мобильных установок¹ [6]. Для оперативной корректировки их положения в пространстве и выбора участков для наиболее эффективного сбора водорослей в первую очередь необходимо проводить мониторинг состояния водоемов. При этом мониторинг должен охватывать не только текущее состояние водоема, но и скорость распространения сине-зеленых водорослей, стадии их жизненного цикла, а также являться основой для построения прогнозной модели развития водорослей. Актуальным способом ведения мониторинга является анализ данных аэрофотосъемки, в то же время для определения различных характеристик сине-зеленых водорослей недостаточно использования снимков видимого спектра, необходима их предварительная обработка при помощи индексов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Материалы и методы

В качестве исходных данных использовались мультиспектральные снимки Куйбышевского водохранилища, сделанные семейством спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства Sentinel-2, имеющих пространственное разрешение 10, 20 и 60 м.

¹ Патент 2068053 RU. Способ очистки водоема от водорослей и устройство для его осуществления / Борунов И.И., Борунов О.Н., Муров В.М., Ихсанов Д.Ф., Карамышев В.Г., Фатхутдинов Л.Ф., Оpubл. 20.10.1996; Патент 2454504 RU. Способ и система получения массы сухих сине-зеленых водорослей из водоемов для нужд человека / Грачёв В.И., Грачёв А.В., Тихонова Н.В., Пустоветова М.Г. Оpubл. 27.06.2012.

Из 13 спектральных каналов спутника Sentinel-2 при обработке спутниковых снимков было задействовано 4 (Band №№ 2, 3, 4, 8). Характеристики каналов представлены в таблице.

Спектральные каналы Sentinel-2

Каналы Sentinel-2	Sentinel-2A		Sentinel-2B		Разрешение, м
	Длина волны, нм	Пропускная способность, нм	Длина волны, нм	Пропускная способность, нм	
Band 1 – Ультрафиолетовый	442,7	21	442,2	21	60
Band 2 – Синий	492,4	66	492,1	66	10
Band 3 – Зеленый	559,8	36	559,0	36	10
Band 4 – Красный	664,6	31	664,9	31	10
Band 5 – Видимый и ближний инфракрасный	704,1	15	703,8	16	20
Band 6 – Видимый и ближний инфракрасный	740,5	15	739,1	15	20
Band 7 – Видимый и ближний инфракрасный	782,8	20	779,7	20	20
Band 8 – Видимый и ближний инфракрасный	832,8	106	832,9	106	10
Band 8A – Видимый и ближний инфракрасный	864,7	21	864,0	22	20
Band 9 – Коротковолновый инфракрасный	945,1	20	943,2	21	60
Band 10 – Коротковолновый инфракрасный	1373,5	31	1376,9	30	60
Band 11 – Коротковолновый инфракрасный	1613,7	91	1610,4	94	20
Band 12 – Коротковолновый инфракрасный	2202,4	175	2185,7	185	20

Источник: MultiSpectral Instrument (MSI) Overview. Sentinel Online. European Space Agency. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument> (accessed: 03.03.2022).

В результате анализа спектральных индексов, которые применимы к решению поставленной задачи оценки и прогноза состояния водных объектов, были выбраны три наиболее релевантных: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – Нормализованный разностный вегетационный индекс), NDWI (Normalized difference water index – Нормализованный разностный водный индекс) и SIPI (Structure Intensive Pigment Index – Структурный индекс интенсивности пигмента). Использование NDVI обусловлено детектированием отражения хлорофилла, который содержится в сине-зеленых водорослях [7]. Данный индекс не дает больше информации, чем визуальное наблюдение снимков в видимой области спектра. NDWI традиционно применяется для выделения границ водных объектов на фоне почвы и растительности. Авторами настоящей работы этот индекс использовался для уточнения границ распространения водорослей и более подробной оценки количества биомассы. SIPI применяется в основном для определения эффективности использования растениями поступающего света для фотосинтеза и помогает оценивать их здоровье. SIPI рассматривается как индекс для наблюдения за циклами развития сине-зеленых водорослей, включающими раннее развитие, полноценную деятельность, угасание развития и отмирание.

Известно использование индексов, разработанных непосредственно для водорослей, таких как Floating algae index (FAI) [8], Seaweed Enhancing Index (SEI) [9]. При расчете данных индексов используются специфические спектральные каналы ограниченного использования, которые недоступны для

большинства территорий России. Формулы расчета предлагаемых к рассмотрению индексов (NDVI, NDWI и SIPI), находящихся в открытом доступе и представленных для всей территории Земли, приведены ниже:

$$NDVI = \frac{NIR-red}{NIR+red},$$

где red – красная область спектра (Band 4); NIR – ближняя инфракрасная область спектра (Band 8);

$$NDWI = \frac{green-NIR}{green+NIR},$$

где green – зеленая область спектра (Band 3)

$$SIPI = \frac{NIR-blue}{NIR-red},$$

где red – красная область спектра (Band 4); blue – синяя область спектра (Band 2).

Анализ данных, полученных при помощи различных индексов ДЗЗ, позволяет более комплексно подойти к мониторингу водохранилища. Наблюдение за ростом цианобактерий в течение летнего сезона может помочь для поиска основных источников сбросов питательных веществ (сточных вод) в поверхностный водоем.

Результаты и обсуждения

Апробация предлагаемой методики проведения мониторинга была проведена в летнее время – сезон наиболее интенсивного развития сине-зеленых водорослей. В качестве периодов отслеживания были выбраны следующие даты:

20.06.2021 – начало цветения сине-зеленых водорослей;

18.07.2021 – стадия набора биомассы;

14.08.2021 – пик максимального количества водорослей;

19.08.2021 – период сокращения количества сине-зеленых водорослей.

Ввиду множества численных значений, определяемых для каждой точки области съемки, под снимками представлены условные шкалы численной интерпретации значения индексов (рис. 1–3).

Представленные снимки с обработкой и расчетом индекса NDVI иллюстрируют изменение активности поглощения кислорода при фотосинтезе (см. рис. 1). Замечено, что на снимке от 20 июня практически отсутствует биомасса. На снимках, сделанных позднее, начиная с 18 июля, видны значительные массивные скопления. Наиболее интенсивное образование биомассы происходит вдоль прибрежной полосы. Увеличение количества сине-зеленых водорослей в данной области обусловлено более высокой температурой, небольшой глубиной и наличием стоков, поступающих в водохранилище с близлежащих территорий. Воды малых рек, впадающие в водохранилище,

содержат большое количество удобрений, вымываемых с сельскохозяйственных полей. Удобрения в основном представлены химическими соединениями на основе калия, азота и фосфора. Кроме вод, поступающих с сельскохозяйственных полей, в водохранилище сбрасываются неочищенные хозяйственно-бытовые стоки с высокими концентрациями органических веществ и неорганических солей. Они поглощаются сине-зелеными водорослями, являясь их питательной средой и стимулируют рост.

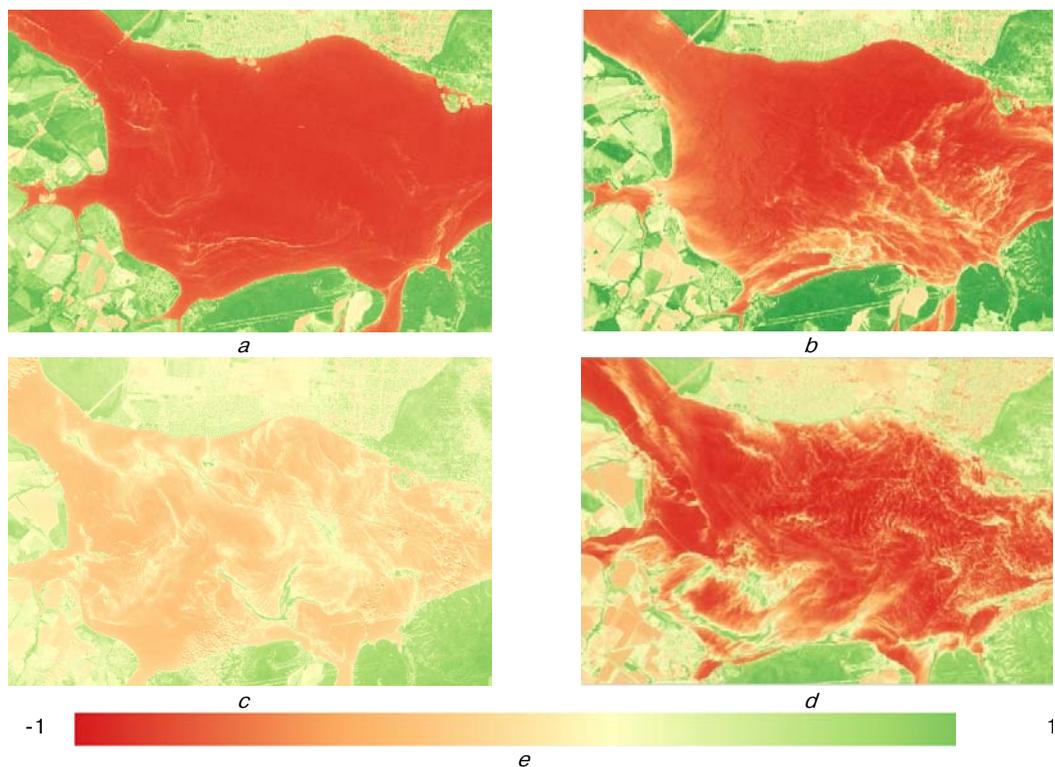


Рис. 1. Спутниковые снимки, обработанные при помощи NDVI:
a – дата снимка: 20.06.2021; *b* – дата снимка: 18.07.2021; *c* – дата снимка: 14.08.2021;
d – дата снимка 19.08.2021; *e* – шкала значений NDVI

Снимок от 14 августа иллюстрирует более интенсивное распространение сине-зеленых водорослей по всей площади Куйбышевского водохранилища в районе г. Тольятти. Сниженная четкость снимка, обработанного при помощи NDVI, является результатом детектирования атмосферного аэрозоля и препятствует анализу полученных данных.

При помощи снимка, сделанного 19 августа, спустя 5 дней после предыдущего, появилась возможность определить изменение местоположения сине-зеленных водорослей, которое вызвано в первую очередь движением потоков воды. Именно на эти даты выпадает пик интенсивности развития биомассы. При этом не выявлено существенных изменений количества биомассы (не более 3 %) по общей площади водной поверхности, на которой детектируется присутствие водорослей.

В отличие от NVDI NDWI в основном используются для определения различных характеристик водных объектов. Авторами предложено использование данного индекса для более четкого определения границ распространения сине-зеленых водорослей (см. рис. 2). В частности, отмечено, что снимки, обработанные при помощи NDWI, а именно снимок от 14 августа, являются более информативными в связи с тем, что они меньше подвержены влиянию атмосферных явлений. Определено, что снижение площади покрытия поверхности воды водорослями, рассчитанное с использованием NDWI между 14 и 19 августа, составило порядка 5 %.

SIPi, в отличие от вегетационного и водного индекса, напрямую связан с оценкой жизнедеятельности фитопланктона. В отличие от NDVI он не только учитывает наличие объема хлорофилла, но затрагивает обменные процессы, которые могут свидетельствовать о стадиях роста и развития сине-зеленых водорослей (см. рис. 3).

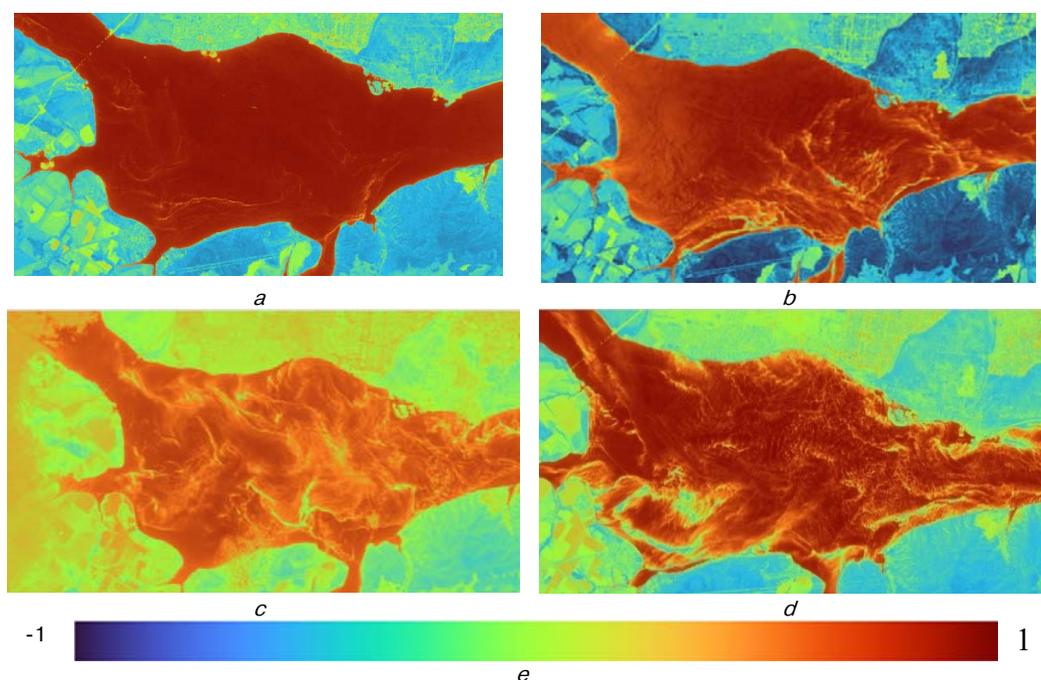


Рис. 2. Спутниковые снимки, обработанные при помощи NDWI:
a – дата снимка: 20.06.2021; *b* – дата снимка: 18.07.2021; *c* – дата снимка: 14.08.2021;
d – дата снимка 19.08.2021; *e* – шкала значений NDWI

На снимке от 20 июня происходит очаговое развитие биомассы. Далее, с повышением температуры воды к 18 июля, идет более интенсивное размножение сине-зеленых водорослей, при этом отсутствуют участки с отмирающими водорослями. На снимке от 14 августа можно заметить участки синего цвета, которые могут являться скоплением угнетенной биомассы со сниженным метаболизмом. Снимок от 18 августа уже не детектирует значительную

часть еще выделяемых на снимках, обработанных при помощи вегетационных индексов синие-зеленых водорослей. Так, с 14 по 19 августа произошло значительное изменение биомассы, с 47 до 38 %.

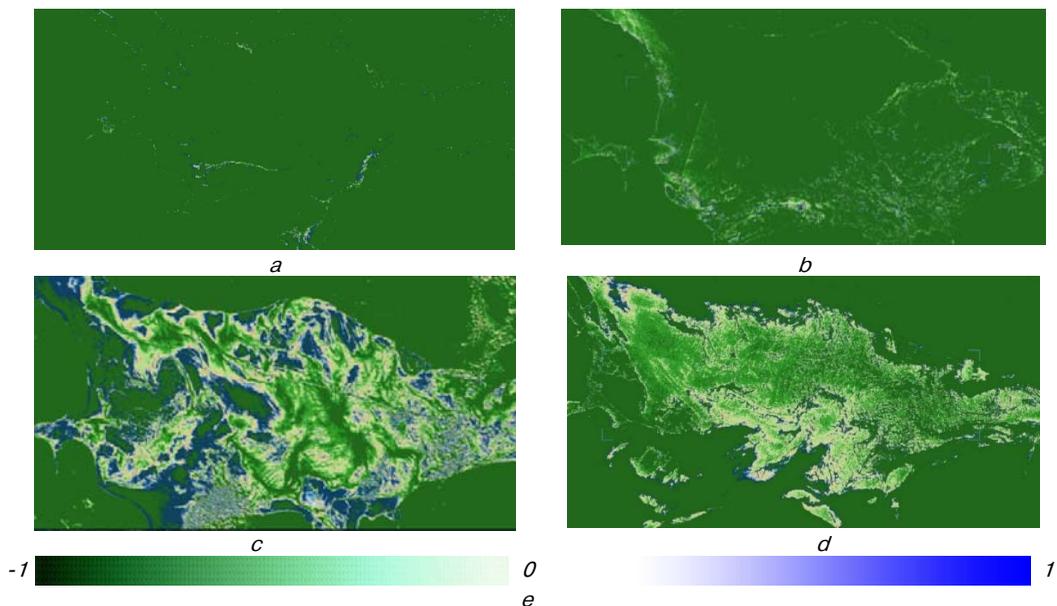


Рис. 3. Спутниковые снимки, обработанные при помощи SIPI:
a – дата снимка: 20.06.2021; *b* – дата снимка: 18.07.2021; *c* – дата снимка: 14.08.2021;
d – дата снимка 19.08.2021; *e* – шкала значений SIPI

Заключение

Многопараметрический анализ развития синие-зеленых водорослей в Куйбышевском водохранилище при помощи индексов дистанционного зондирования может использоваться для принятия решений по своевременной защите водоема. Наиболее доступный для пользователей NDVI показывает наличие биомассы и ее перемещение и в общем виде может применяться для корректировки положений установок сбора синие-зеленых водорослей. NDWI имеет более высокую точность по сравнению с NDVI за счет атмосферной коррекции.

Снимки высокого разрешения с данной обработкой могут быть использованы для поиска участков несанкционированного сброса сточных вод по наличию интенсивного развития водорослей.

SIPi позволяет оценить жизненный цикл водорослей и создает возможность прогноза изменения количества биомассы в ближайшие несколько дней.

В перспективе разработки темы планируется совместный анализ данных дистанционного зондирования Земли и лабораторного изучения состояния воды и биомассы. Подобные исследования позволят достоверно соотнести значения индексов с состоянием объектов, а также разработать собственные индексы, наиболее подходящие под решаемую задачу.

Список литературы

- [1] Davis T.W., Berry D.L., Boyer G.L., Gobler C.J. The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacteria blooms // *Harmful Algae*. 2009. Vol. 8, no. 5. P. 715–725.
- [2] Apeldoorn M.E., Egmond H.P., Speijers G.J., Bakker G.J. Toxins of cyanobacteria // *Molecular Nutrition & Food Research*. 2007. Vol. 51. P. 7–60.
- [3] Codd G., Morrison L., Metcalf J.S. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection // *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2005. Vol. 203. P. 264–272.
- [4] Paerl H.W., Huisman J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms // *Environmental Microbiology Reports*. 2009. Vol. 1. P. 27–37.
- [5] Pearson L., Mihali T., Moffitt M., Kellmann R., Neilan B. On the chemistry, toxicology and genetics of the cyanobacterial toxins, microcystin, nodularin, saxitoxin and cylindrospermopsin // *Marine Drugs*. 2010. Vol. 8. P. 1650–1680.
- [6] Бородулин И.В., Милюткин В.А., Розенберг Г.С. Разработка технологий и технических средств для сбора и утилизации сине-зеленых водорослей // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2016. Т 25, № 4. С. 123–129.
- [7] Hu C., He M.-X. Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area // *Eos Transactions American Geophysical Union*. 2008. Vol. 89, no. 33. P. 302–303. <https://doi.org/10.1029/2008EO330002>
- [8] Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans // *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113, no. 10. P. 2118–2129.
- [9] Siddiqui M.D., Zaidi A.Z., Abdullah M. Performance assessment of newly developed seaweed enhancing index // *Remote Sensing*. 2008. Vol. 11, no. 12. P. 1–14. <https://doi.org/10.1029/2008EO330002>

Сведения об авторах:

Шерстобитов Данил Николаевич, аспирант, кафедра химической технологии и промышленной экологии, Самарский государственный технический университет. Российская Федерация, 443100, Самарская область, город Самара, Молодогвардейская ул., д. 244. ORCID: 0000-0002-9160-5317, eLIBRARY SPIN-код: 6822-4868. E-mail: shersobitovdn@gmail.com

Ермаков Василий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра химической технологии и промышленной экологии, Самарский государственный технический университет. Российская Федерация, 443100, Самарская область, город Самара, Молодогвардейская ул., д. 244. ORCID: 0000-0001-7720-2418, eLIBRARY SPIN-код: 5201-1408. E-mail: wassiliy@rambler.ru

Пыстин Виталий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра химической технологии и промышленной экологии, Самарский государственный технический университет. Российская Федерация, 443100, Самарская область, город Самара, Молодогвардейская ул., д. 244. ORCID: 0000-0002-4027-1804, eLIBRARY SPIN-код: 8568-1200. E-mail: vitaliy.pystin@yandex.ru

Тулицына Ольга Владимировна, доктор технических наук, профессор, кафедра химической технологии и промышленной экологии, Самарский государственный технический университет. Российская Федерация, 443100, Самарская область, город Самара, Молодогвардейская ул., д. 244. ORCID: 0000-0003-0638-2700, eLIBRARY SPIN-код: 4203-9529. E-mail: olgatupicyna@yandex.ru