

Применение вейвлет-анализа для выявления многолетних закономерностей цветения Воронежского водохранилища по спутниковым материалам Landsat

А. А. Елисеев, К. Ю. Силкин

Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018, Россия
E-mail: eliseev.36@yandex.ru, const.silkin@yandex.ru

По нерегулярному набору многозональных материалов спутниковой съёмки Landsat выполнен анализ пространственно-временных закономерностей «цветения» воды Воронежского водохранилища. Данный водоём целиком находится в административных пределах города-миллионника, и неблагоприятное его состояние серьёзно снижает комфортность жизнедеятельности населения. Кроме того, косвенным образом воды Воронежского водохранилища используются для питьевого водоснабжения, что грозит серьёзными проблемами для социальной сферы города. Для контроля состояния подобных объектов традиционно используется дистанционное зондирование. Предложена улучшенная формулировка трансформанты многозональных данных — нормализованного разностного альгоиндекса (*англ.* Normalized Difference Algae Index — NDAI), позволяющего объективно оценивать интенсивность развития фитопланктона в водоёме. Как и все подобные индексы, NDAI — это удобный инструмент для обоснованного решения того типа задач, для которых он создавался, и некоторых других. Разработана и применена система наблюдения значений NDAI, учитывающая особенности морфологии данного водного объекта, представляющего собой русловое водохранилище в виде протяжённого изгибающегося канала. Получен типичный для водохранилища сезонный ход функции NDAI за почти 40 лет наблюдений. Зафиксирован период, когда обычно Воронежское водохранилище цветёт наиболее сильно, — конец августа или начало сентября. Выполнен вейвлет-анализ многолетнего ряда значений NDAI (за вычетом сезонного тренда) для выявления в нём характерных циклических составляющих. Обнаружено, что преобладают 2- и 12-летние циклы. Предложен анализ выявленных закономерностей и осуществлена попытка кратковременного прогноза состояния Воронежского водохранилища вследствие его цветения.

Ключевые слова: Landsat, цветение воды, Воронежского водохранилища, NDAI, альгоиндекс, вейвлет-анализ, природная цикличность, прогноз

Одобрена к печати: 10.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-235-248

Введение

Одной из основных проблем Воронежского водохранилища в тёплый период является цветение воды из-за интенсивного развития фитопланктона, при котором происходит массовое развитие одного или двух-трёх видов планктонных водорослей, сопровождающееся значительным ухудшением качества воды (Лаврова и др., 2014). В качестве объекта исследований мы выбрали акваторию Воронежского водохранилища с периодически развивающимися в её пределах рассеянными и концентрированными водорослевыми скоплениями.

Цель данной работы состоит в совершенствовании предложенного нами ранее метода альгоиндекса NDAI (*англ.* Normalized Difference Algae Index) и исследовании с его помощью особенностей пространственно-временного распределения цветения Воронежского водохранилища на основании анализа многозональных спутниковых снимков Landsat. Для этого потребовалось решить следующие задачи: 1) улучшить принцип трансформации материалов Landsat в альгоиндекс, представляющий собою чувствительный и надёжный инструмент оценки интенсивности цветения водоёма; 2) разработать систему наблюдения значений альгоиндекса, позволяющую детально анализировать пространственные особенности развития фитопланктона с учётом морфологии ложа водоёма; 3) оценить типичные сезонные

закономерности цветения водоёма; 4) исследовать многолетнюю цикличность в интенсивности размножения фитопланктона; 5) сделать прогноз состояния Воронежского водохранилища в ближайшие годы.

Актуальность исследования заключается в повышении важности проблемы цветения водоёма и снижения качества экосистемы водохранилища за последние тридцать лет. Возможной причиной представляется смена климата, более интенсивное поступление в воду промышленных, ливневых и канализационных стоков и минеральных удобрений, тепловое загрязнение и (или) ряд факторов естественного происхождения (Лаврова и др., 2014). Наиболее опасным видом фитопланктона являются цианобактерии, которые вырабатывают цианотоксины, оказывающие негативное воздействие на здоровье человека и экосистему водоёма (Анциферова и др., 2023). Помимо этого, «цветение» водоёма сопровождается неприятным запахом гниения, который образуется из-за разложения умерших бактерий. В пиковый период их развития на поверхности воды образуются дурно пахнущие плотные биогенные скопления в виде «матов».

Актуальность исследований для Воронежского водохранилища заключается ещё и в том, что его вода в значительной степени питает неоген-четвертичный водоносный горизонт, который используется в качестве источника питьевого водоснабжения города (Бережнова, Мамчик, 2010; Петросян и др., 2019).

Методика относительного нормализованного альгоиндекса NDAI позволяет оценить степень развития фитопланктона в численной форме. Это даёт возможность объективно сравнить показатели исследуемого объекта с другими водоёмами или с ним самим в другое время, выявить циклы пикового развития цветения и т. п.

Обзор применения методики

Впервые методика расчёта альгоиндекса NDAI была разработана и применена для оценки экологического состояния Воронежского водохранилища с помощью материалов дистанционного зондирования (Силкин, 2012). Целью создания данной методики было своевременное обнаружение предпосылок для образования скоплений цианобактерий в виде матов с большой мощностью. Данная методика позволила выявить несколько мощных всплесков размножения фитопланктона, а также определить типичные спектральные характеристики развивающегося планктонного фитоценоза.

В 2014 г. метод NDAI был применён для оценки развития фитопланктона на акватории Матырского водохранилища Липецкой области. Данный метод был частью комплексных исследований, включавших, кроме дистанционных, также многолетние эколого-гидрохимические. Благодаря взаимному согласованию и дополнению наземных и спутниковых результатов были сделаны обоснованные выводы о причинах того экологического состояния Матырского водохранилища, которое сложилось на момент исследований. Кроме того, по данным NDAI были выделены солнечные циклы с периодом 22 года и 11–12 лет, которые нашли отражение в данных по химическому анализу поверхностных вод и объяснили мощнейший всплеск развития фитопланктона в 2007 г. (Валяльщикова и др., 2014).

В обзорной статье (Кутявина и др., 2020) были детально рассмотрены разные методы изучения эвтрофированных водоёмов по данным многозональной космической съёмки. Были изучены следующие индексы: индекс хлорофилла *a* (Chl-*a*); индекс максимума хлорофилла (*англ.* Maximum Chlorophyll Index — MCI); нормализованный разностный индекс хлорофилла (*англ.* Normalized Difference Chlorophyll Index — NDCI); нормализованный разностный вегетационный индекс (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) и другие данные. По результатам их сравнения было отмечено, что все методы обладают достоинствами и недостатками, имеют региональную привязку и требуют калибровки по наземным данным. Однако в качестве наиболее удачного для дальнейших исследований эти авторы выбрали именно метод NDAI (Кутявина и др., 2021а, б). С помощью расчёта NDAI ими успешно была проведена оценка степени развития фитопланктона в Белохолуницком, Омутнинском,

Большом Кирсинском, Чернохолуницком и других водохранилищах Кировской области. По результатам анализа авторы сделали вывод, что наиболее благоприятным участком для развития фитопланктона являлась прибрежная территория водоёма. Была составлена диаграмма сезонного развития цветения и отмечены наиболее неблагоприятные периоды, которые соответствовали июлю и августу. Также сделана отметка пиков для циклов наибольшего «цветения» воды, которые повторялись через два года и приходились на 2016, 2018, 2020 гг.

Метод NDAI также стал частью комплексной методики оценки состояния городской водной среды озёр Опеченское, Вербное и Редкино в Киеве с использованием методов системного анализа (Fedorovsky et al., 2021). Спектрально-текстурный анализ спутниковых изображений был использован для получения входной информации для дистанционной оценки водоёмов в виде индексных изображений: нормализованного разностного индекса пруда (NDPI), нормализованного разностного индекса мутности (NDTI) и нормализованного разностного альгоиндекса (NDAI). С помощью вероятностного и статистического подходов представлен статистический критерий распознавания классов объектов по результатам измерения их информативных признаков. Эти подходы используются для решения оптимизационных задач в статистических теориях идентификации и распознавания. Данный метод позволил картографически отобразить изменение качества воды и водной экосистемы в соответствии с эталонными участками состояния водохранилища в 2017 г.

В работе (Силкин, 2017) метод NDAI с успехом был применён к сравнительному анализу экологического состояния двух водохранилищ, которые являются прудами-охладителями атомных электростанций — Смоленской и Белоярской. Обнаружено, что у каждого водоёма в силу разных природно-климатических условий и специфики антропогенной нагрузки на водосборный бассейн наблюдаются индивидуальные отличия по разным характеристикам, определяемым на основании NDAI. Например, каждое водохранилище в своё время начинает и заканчивает цветение; цветение развивается и затухает с разной скоростью. Кроме главного максимума цветения у каждого водоёма имеются и второстепенные, происходящие в разные месяцы тёплого времени года. Более того, вейвлет-анализ показал, что Смоленское и Белоярское водохранилища по-разному и несинхронно реагируют на многолетние природные циклы.

В результате наших исследований (Елисеев, Силкин, 2024), проведённых синхронно с получением ряда значений NDAI за 2023 г. и заключающихся в химическом анализе содержания макрокомпонентов в воде Воронежского водохранилища, была выявлена сильная корреляционная связь между этими параметрами.

Таким образом, на нескольких примерах в разных регионах России и за рубежом с привлечением независимых источников наземных и дистанционных сведений была доказана действенность и точность метода NDAI.

Данные

Для наблюдения за развитием цианобактерий и своевременного обнаружения скоплений цианобактерий используется метод многозонального дистанционного зондирования Земли. Исходными данными являются архивы спутниковых сцен Landsat-5, Landsat-7–9. Источник использованных данных — Collection 2 Level-2 Science Products (L2SP), включающий в себя сцены с предварительно вычисленными значениями отражения от подстилающей поверхности (https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-1328_Landsat8-9_OLI-TIRS-C2-L2_DFCB-v7.pdf).

Всего было обработано 150 сцен (за безлёдные месяцы с 1984 по 2023 г.), из которых 120 обладают отличным качеством. Остальные 30 сцен проблемны из-за характерного дефекта съёмочной аппаратуры спутника Landsat-7, который проявляется в появлении на изображениях полос, затрудняющих пространственный анализ значений NDAI. Проблемные сцены были использованы в качестве заполнения временных пробелов наблюдения за объектом. Это позволило сделать исследование более регулярным.

Методы

Методической основой для оценки интенсивности «цветения» воды в масштабе Воронежского водохранилища по многозональному изображению Landsat в данном исследовании явился альгоиндекс NDAI, сформулированный для данного исследования в новой форме:

$$NDAI = 2 \frac{A - B}{A + B}, \quad (1)$$

где $A = G + 2NIR$, $B = 3R$, соответственно NIR (англ. Near InfraRed), R , G — яркость ближнего инфракрасного, красного и зелёного спектральных каналов в данном месте водоёма. Нормирующие коэффициенты в формуле подобраны так, чтобы в подавляющем числе случаев применения выдавать значения в интервале (0, 1).

В построении NDAI при этом заключены следующие наблюдения и принципы, подмеченные в результате длительного наблюдения за Воронежским водохранилищем в последнее десятилетие.

Во-первых, если водоём не находится на пике цветения (начало лета или средняя осень), то это проявляется лишь в наличии рассеянного скопления водорослевых частичек в толще воды. Поскольку вода поглощает инфракрасное излучение, то характерный спектр отражения хлорофилла с максимумом в ближнем инфракрасном интервале не наблюдается. Сквозь воду пробивается только ослабленное зелёное свечение. Следовательно, неяркая пигментация воды не должна указывать на благополучие, требуется принимать данную ситуацию как переходную (рис. 1а, секторы III и IV). Отмеченный факт учитывается при построении NDAI таким образом, что значение зелёного канала G также добавлено в формулу коэффициента A , входящего в формулу (1). Следовательно, даже такой слабый вид цветения водоёма уже даст заметную положительную аномалию конечного значения NDAI.

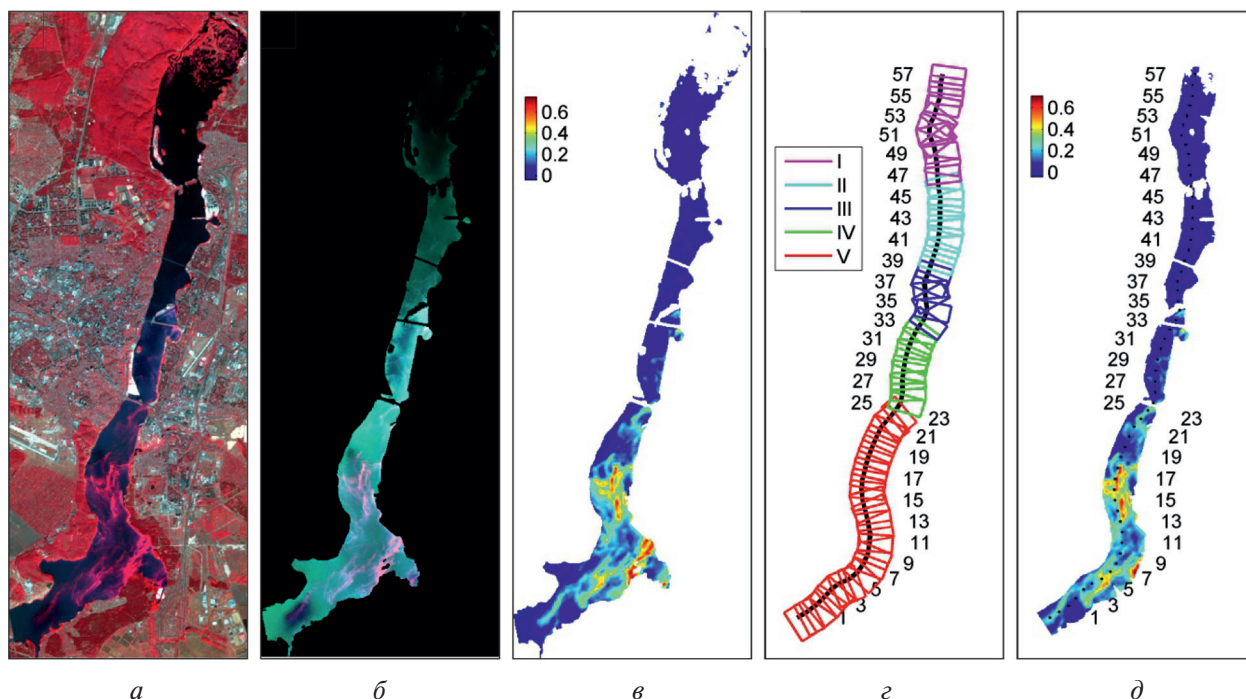


Рис. 1. Пример организации обработки космоснимка Landsat-8 от 23 сентября 2020 г. по Воронежскому водохранилищу для анализа его цветения: а — псевдоцветовая комбинация исходной сцены; б — изображение, обнулённое по внешней маске берегов и с растяжением гистограммы по оставшимся внутри значениям; в — схема NDAI (значения цветовой шкалы) по маскированному изображению; г — система наблюдения по окнам (показаны их номера), скользящим вдоль фарватера (чёрная линия), где цветом прямоугольников показано разделение водохранилища на сегменты; д — конечный вариант схемы NDAI (значения цветовой шкалы) в соответствии с системой наблюдений

Во-вторых, к моменту максимального цветения водоёма его значительное пространство покрывается скоплениями водорослевых матов, чья толщина позволяет им приподниматься из-под поверхности воды. В этот момент акватория вспыхивает в ближнем инфракрасном диапазоне (см. *рис. 1а*, сектор V), что особым образом отражено в формуле NDAI, так как второе слагаемое в коэффициенте A из выражения (1) включает значение ближнего инфракрасного канала NIR. Поскольку водорослевые маты несут на себе явные следы ветрового нагона, т. е. это структуры дискретные, то для компенсации их неоднородности в пределах акватории применён повышающий коэффициент 2 перед значением NIR.

В-третьих, в качестве начальной отметки для оценки относительных изменений создаваемого индекса NDAI, как и в случае обычного вегетационного индекса NDVI, используется красный канал R (правильнее — значения спектральной яркости). Эти значения входят в формулу (1) с повышающим коэффициентом 3, чтобы уравновесить другие аргументы NDAI. Такой подход работает таким образом, что числитель выражения (1) имеет конечный вид $G + 2NIR - 3R$, благодаря чему в условиях чистой воды он принимает значения около нуля. Следовательно, аналогичный уровень при этом будет и у всего альгоиндекса NDAI.

Знаменатель уравнения (1) нужен, как и в случае NDVI, для нормирования, т. е. проецирования значений в условный безразмерный интервал, интерпретировать которые при этом значительно проще, чем исходные значения. Построение альгоиндекса описанным образом заметно снижает влияние атмосферных помех на получаемые результаты.

Как можно понять по формуле NDAI, достоверность его работы определённо зависит от красной пигментации воды вследствие присутствия в ней растворённых или взвешенных железосодержащих минеральных компонентов. Присутствие таковых приводит к снижению значений NDAI вплоть до появления порой небольших отрицательных значений. В прежних наших исследованиях мы использовали другую формулу для вычисления NDAI, которая содержала значения и синего канала. Это было введено специально для контроля содержания красных пигментов в воде. Однако сейчас мы отошли от такого подхода. Дело в том, что в последнее десятилетие Воронеж сильно вырос и по нашим наблюдениям стал гораздо больше загрязнять атмосферу над водохранилищем пылевыми и аэрозольными частицами, которые особенно проявляются именно в синем диапазоне. Поэтому учёт красной пигментации воды в настоящее время мы осуществляем только ситуативно. Однако этот фактор не критичен. Кроме того, использование меньшего объёма данных (три канала вместо четырёх) повышает точность результатов.

При изучении конкретного водоёма — Воронежского водохранилища — потребовалось разработать специфическую систему наблюдений встречающихся значений NDAI. Эта система учитывает следующие аспекты.

Во-первых, водоём имеет русловой тип, его ширина многократно меньше длины. Во-вторых, водоём ориентирован практически меридионально и в силу западных ветров умеренных широт его левый берег всегда отличается от правого по интенсивности цветения прибрежных вод. В-третьих, водоём имеет несколько изгибов, а также местами его канал пережат дамбами мостов, островами и искусственными намывными территориями.

Для учёта всех этих особенностей сначала был найден фарватер как протянувшаяся от устья к истоку линия, максимально удалённая от любых участков суши. Затем каждый изучаемый космоснимок был обнулён по внешней маске, задаваемой коренными берегами, дамбами, мостами и т. п. (см. *рис. 1б*). На третьем этапе вдоль фарватера от устья к истоку пропускалось скользящее окно, в пределах которого оценивалось значение NDAI (см. *рис. 1в*) для той части акватории, что покрывалась этим окном. Окно всюду было ортогонально текущему отрезку фарватера (см. *рис. 1г*).

На выборе параметров для такого скользящего анализа следует остановиться особо.

К числу регулируемых значений относились: шаг между окнами, длина окна (размер окна вдоль фарватера), ширина окна (размер окна поперёк фарватера), соотношение левого и правого крыльев окна. Если двигаться по фарватеру Воронежского водохранилища от устья к истоку, то левое крыло окна — это его западная половина, т. е. обращённая к правому берегу водохранилища. Соответственно правое крыло окна — это его восточная половина,

обращённая к левому берегу водохранилища. Асимметрия скользящего окна требуется для учёта асимметричности цветения самого водоёма, так как его левый берег всегда страдает от этого сильнее.

Все эти параметры были предметом предварительно методического исследования, детали которого здесь опущены. Для реализации описанной системы наблюдений нами разработано программное обеспечение, позволяющее выполнять все вычисления оперативно и автоматически создавать графическое представление результатов.

В конечном итоге выбор был сделан на таком варианте системы наблюдений. Шаг по фарватеру — 500 м, длина окна — 750 м, ширина левого крыла окна — 500 м, ширина правого крыла — 1000 м. Благодаря тому, что шаг между скользящими окнами немного меньше длины окна, происходит небольшое перекрытие смежных окон, что позволяет без заметных пропусков скользить вдоль изгибов фарватера (см. *рис. 1д*).

При каждом положении плавающего окна оценивались значения NDAI в пределах него: минимальное, среднее и максимальное (*рис. 2*).

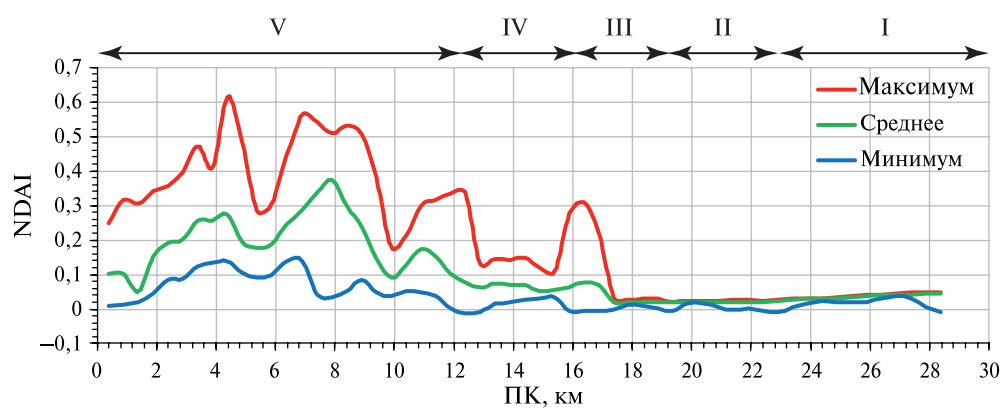


Рис. 2. Графики значений NDAI (минимального, среднего и максимального в пределах скользящего окна) вдоль фарватера с указанием разбиения водохранилища на сегменты: I — от Окружного моста до Железнодорожных мостов, II — далее вниз до Северного моста, III — далее до Чернавского, IV — до Вогрессовского, V — до дамбы гидроузла

На *рис. 2* вместо формальных значений минимума и максимума в пределах данного окна взяты 5-й и 95-й процентиля соответственно. Это сделано для исключения случайных ураганных выбросов.

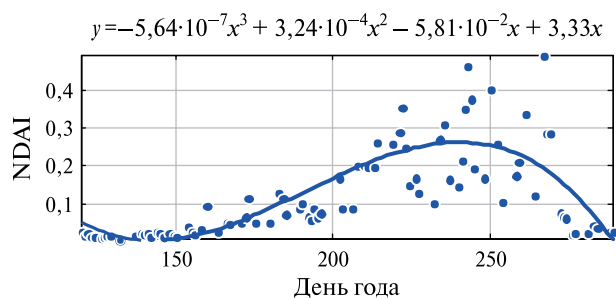


Рис. 3. Распределение размаха всех значений NDAI в зависимости от дня года с полиномиальной аппроксимацией (показано уравнение полинома)

Подобным образом были обработаны все собранные сцены Landsat за тёплые месяцы доступного периода (по одному в месяц, с 1985 по 2023 г.). Очень интересные результаты дал временной анализ даже самых простых сведений о развитии цветения водоёма, полученных

по методике NDAI вдоль фарватера. Например, высокой информативностью обладает отношение превышения максимального (из средних) значения NDAI в пределах всего водоёма к минимальному (тоже из средних). Например, если смотреть по *рис. 2*, то максимальное значение по зелёному графику наблюдается близ отметки на профиле 8 км, а минимальное — приблизительно у 18 км. Величина размаха между ними для всех лет наблюдений составила ряд значений, упорядоченных по дню года (*рис. 3*, см. с. 240).

Полиномиальный тренд на этом рисунке демонстрирует средний многолетний сезонный тренд NDAI для Воронежского водохранилища. Значения фенологических метрик, определяемых с его помощью, приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Параметры среднемноголетнего тренда

№	Фенологическая стадия	День года	Дата	NDAI
1	SOS (Start of season)	172	21 июня	0,050
2	80 % AMP (Amplitude)↑	213	1 августа	0,204
3	MAX (Maximum)	240	28 августа	0,251
4	80 % AMP↓	262	19 сентября	0,205
5	EOS (End of season)	283	10 октября	0,053

В этой таблице обозначения следующие: AMP (*англ.* Amplitude) — максимальная высота сезонного тренда; SOS — начало сезона (дата, определяемая по пересечению аппроксимирующим полиномом отметки 20 % от AMP весной); EOS — конец сезона (дата, определяемая по пересечению аппроксимирующим полиномом отметки 20% от AMP осенью); 80 % AMP↑ — начало пика сезона (дата, определяемая по пересечению аппроксимирующим полиномом отметки 80 % от AMP весной); 80 % AMP↓ — конец пика сезона (дата, определяемая по пересечению аппроксимирующим полиномом отметки 80 % от AMP осенью); MAX — дата максимального значения (AMP) сезонного тренда (Силкин, Кизеев, 2018).

Далее мы воспользовались методикой, аналогичной применённой в последней процитированной статье, для того чтобы можно было на фоне выявленного интенсивного сезонного изменения обнаружить многолетние эпохальные тенденции. Суть подхода в том, что данный тренд был вычтен из наблюдаемых данных. Результат показан на *рис. 4а*. Значения NDAI во всех случаях относительные.

Поскольку данные NDAI неравномерны во времени, для проведения вейвлет-анализа они были аппроксимированы сглаживающим сплайном. Параметр сглаживания был подобран таким образом ($1-10^{-6}$), чтобы максимально бережно отобразить все имеющиеся значения, не создавая при этом слишком заметных посторонних артефактов.

Вейвлет-анализ, благодаря тому, что в качестве ядра своего преобразования он использует компактный ограниченный базис, обладает непревзойдённой способностью к выявлению циклических составляющих даже на очень коротких рядах, когда в данных присутствуют лишь считанные периоды. Вейвлет-анализ требует обоснованного выбора материнского вейвлета, по форме напоминающего искомым сигнал. По-видимому, это должен быть осесимметричный и очень компактный (с концентрацией большей части энергии в одной центральной фазе) вейвлет. Например, «мексиканская шляпа» или вейвлет Гаусса (2-я производная). Последний и получил предпочтение как более компактный.

Вейвлетограмма, показанная на *рис. 4б* (см. с. 242), была получена с помощью алгоритма непрерывного вейвлет-преобразования (Suvichakorn et al., 2011), позволяющего проанализировать циклические составляющие в исходных данных в виде двумерной функции. На изображении по вертикальной оси в логарифмическом масштабе отложены периоды искомым циклов. Поскольку некоторые из них явно преобладают, то для удобства анализа были сделаны горизонтальные сечения двумерной вейвлетограммы по уровням 2 года и 12 лет, которые в виде графиков показаны на *рис. 4в*.

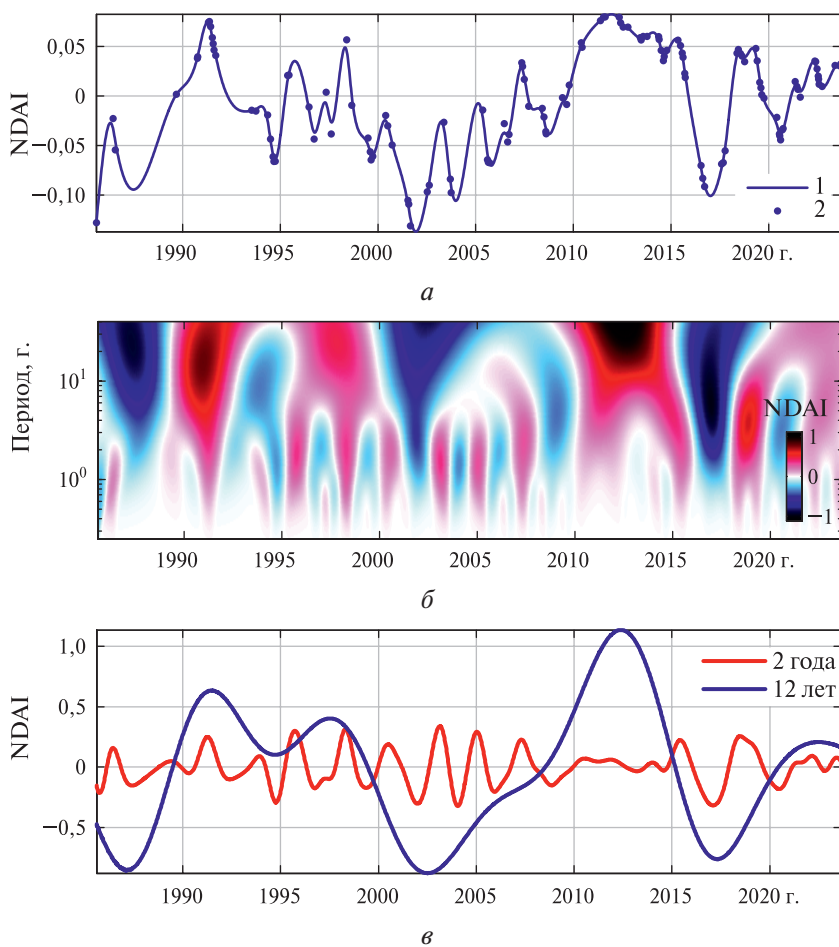


Рис. 4. Данные и результаты вейвлет-анализа многолетнего хода NDAI для Воронежского водохранилища за всё время наблюдений миссии Landsat: а — значения NDAI, скомпенсированные за сезонный тренд (1 — значения NDAI, 2 — сглаживающий сплайн); б — вейвлетограмма исходных данных; в — сечения вейвлетограммы по преобладающим периодам 2 года и 12 лет

Анализ

Анализ начнём с того, как был представлен и обработан многозональный космоснимок, взятый для примера. На рис. 1а хорошо видны интенсивно светящиеся в ближнем инфракрасном диапазоне (изображён красным цветом) скопления водорослевых матов, нагоняемых или уже прибитых ветром к левому (восточному) берегу водохранилища в нижней его части (сегмент V).

В то же время вода в IV сегменте весьма зелена (изображено синим цветом), что говорит о высокой концентрации рассеянного фитопланктона в воде, но выступающие на воздух водорослевые маты ещё не образовались. Сегменты I–III пигментацию воды, в том числе и от взвешенных железосодержащих частиц или растворов, в таком изображении не демонстрируют.

Однако контрастированный вариант (см. рис. 1б), сделать который удалось после обрезки всей суши, показывает всё же очень небольшое, но заметное количество красного свечения (изображено зелёным) во всех сегментах водоёма, включая даже самый чистый сегмент I. Интересно, что появление этой пигментации в верховьях водохранилища неслучайно соответствует расположению там на обоих берегах крупных водоподъёмных станций, снабжающих Воронеж питьевой водой. Эти водозаборы оснащены установками обезжелезивания, сбросы от деятельности которых поступают в водохранилище и, по-видимому, окрашивают заметным образом воду в нём.

Схема NDAI (см. *рис. 1в*) демонстрирует все отмеченные выше особенности состояния воды в Воронежском водохранилище, практически не добавляя к сказанному ничего нового. Смысл её только в том, что эта информация представлена не в виде трудно интерпретируемых троек цветов, а простыми однозначными значениями альгоиндекса NDAI.

На *рис. 1г* можно видеть фарватер водохранилища, вдоль которого проводился анализ распределения NDAI. Скользящие окна пронумерованы. Поскольку шаг между окнами был взят 500 м и окон на фарватере поместилось 57, то должен получиться профиль длиной около 30 км. Графики NDAI вдоль этого профиля можно видеть на *рис. 2*. Для дальнейшего анализа интересны все изображённые на нём линии. По размаху между минимумом и максимумом, а также по наличию сильной изрезанности графика максимума можно однозначно утверждать о присутствии на акватории дискретных густых скоплений водорослей. Они всегда появляются на пике цветения водохранилища. С гниением этих водорослевых матов обычно бывает связан самый неприятный запах, отравляющий жизнь горожан.

Судя по поведению графиков NDAI в сегментах I–II можно оценить степень влияния железосодержащих сбросов на значения альгоиндекса. По среднему графику видно, что от точки на профиле 28 км вниз до точки 18 км идёт монотонное понижение на небольшую величину около $0,02\text{NDAI}$. Именно так должна влиять красная пигментация воды — уменьшать значения альгоиндекса. И этот эффект можно даже таким образом отдельно изучать для иных целей.

Из наших исследований других водоёмов известно, что у каждого из них имеются свои сроки начала, максимума и окончания цветения. Скорость его нарастания в начале сезона и спада в конце тоже всегда разная. Как это происходит в случае Воронежского водохранилища, показано на *рис. 3* и в *табл. 1*. Можно видеть, что пик цветения в среднем за все изученные годы приходится на конец календарного лета (28 августа), которое в Воронеже обычно на этом ещё не заканчивается. Интересна существенная асимметрия отмеченного сезонного тренда. Его нарастание от первых признаков до максимума длится более двух месяцев (9 нед), в то время как обратный спад — только полтора месяца (6 нед), что указывает на существенную инертность запускающих цветение процессов.

После вычитания сезонного тренда стало возможным проанализировать собранные данные по интенсивности цветения Воронежского водохранилища в многолетнем разрезе. Было интересным выяснить, какие имеются циклические составляющие в этих данных, насколько интенсивно каждое из них проявлено.

Поскольку собранный ряд данных простирается чуть менее чем на 40 лет (что очень коротко), лишь вейвлет-анализ способен помочь нам в решении поставленной задачи. Вследствие использования при этом сильно ограниченного во времени базиса разложения, у него имеется значительно более высокое временное разрешение по сравнению с простым спектральным анализом на основе преобразования Фурье.

Вейвлетограмма, изображённая на *рис. 4б* с помощью непрерывного вейвлет-преобразования, демонстрирует две чётко различающиеся по масштабу циклические составляющие, явно преобладающие над всеми иными. Поэтому в виде графиков на *рис. 4в* вынесены сечения этой двумерной функции по периодам 2 года и 12 лет.

Начнём с двухлетнего цикла. Его максимальная амплитуда достигает уровня 0,3 от максимального, что говорит о его средней интенсивности. Выдержанность данного цикла нестабильная. В период с середины 1990-х гг. до конца нулевых цикл проявлялся очень чётко, затем он опять начал действовать только с 2015 до 2021 г. В остальные интервалы пропадал, почти не влияя на суммарный эффект. В последние два года наблюдается очередное затишье двухлетнего цикла.

Двенадцатилетний цикл характеризуется самой высокой интенсивностью, превышая двухлетний порой в три раза по амплитуде. Однако он такой же нестабильный. Максимальная интенсивность пришлась на 2012–2013 гг. В остальные периоды как подъём, так и спад его был не столь силён. Интересно отметить два момента, когда и 12-летний цикл проявлялся слабо. Это 1994–1996 и 2020–2023 гг. Промежуток между этими временами близок к 36 годам. Видимо, трёхкратное различие с основным циклом неслучайно и характеризует присутствие

в данных ещё более масштабной компоненты, явно отобразить которую в силу недостаточности наблюдений не получилось.

Взаимная связь между разномасштабными циклами не совсем однозначная, но прослеживается. Например, максимумы 12-летнего цикла в двух случаях (2010–2015 гг. и после 2020 г.) из четырёх соответствуют почти полному исчезновению 2-летнего цикла, а в одном (1990–1995) — заметному ослаблению. Одновременно минимумы крупномасштабного цикла (2000–2009 и 2015–2020 гг.) сопутствуют усилению амплитуды мелкомасштабного, хотя такое усиление может попадать и на максимум (1995–2000).

В то же время ослабление амплитуды 12-летнего цикла (в 1990–2000 гг. и после 2019 г.) не соответствует одновременному ослаблению или, наоборот, усилению 2-летнего цикла. Это происходит рассогласованно.

Есть некоторые основания полагать, что в последние пять лет Воронежское водохранилище находится в состоянии подготовки предстоящего бурного роста цветения, которое следует ожидать в 2025 г. К этим признакам следует отнести следующие факторы. Отрицательный полупериод 12-летнего цикла был сокращённым (в продолжительности) по сравнению с обычными и, скорее всего, оказался перебитым интенсивным положительным полупериодом 2-летнего цикла. Следующий положительный полупериод последнего, будучи более слабым, пришёлся на начало роста 12-летнего цикла, и в сумме они пока дают значения около среднего уровня. В 2024 г. крупномасштабный цикл, очевидно, продолжит расти, но этот год придётся на спад мелкомасштабного цикла. Поэтому особенно бурный рост следует ждать только годом позже. В 2025 г., если 12-летний цикл не будет серьёзно чем-либо ослаблен, можно предполагать сильное цветение Воронежского водохранилища.

Никакой динамичной антропогенной составляющей в наблюдаемых данных мы не обнаружили. Разумеется, ни в коем случае мы не утверждаем, что её там нет совсем. Однако улучшения (ухудшения) ситуации со временем, что можно было бы отнести к ослаблению (усилению) влияния Воронежской агломерации на цветение водохранилища, выявить не удалось. Если крупномасштабный цикл связан с солнечной активностью, то оставшийся 2-летний цикл точно не имеет отношения к деятельности человека. Очевидно, что объёмы хозяйственно-бытовых стоков постоянно расширяющегося города Воронежа могут только возрастать, а периодически (через год на второй) падать на треть — никогда. Поэтому следует признать, что и мелкомасштабный цикл, скорее всего, тоже происходит по естественным причинам.

Влияние глобального потепления полностью исключить нельзя, хотя, если это воздействие и сказывается, то не вполне определённо. Так, можно видеть, что максимум 12-летнего цикла в 2012–2013 гг. явно выделяется на фоне остальных. Но продолжение этой тенденции после 2021 г. в чётко обозначенном виде не последовало, хотя всё ещё возможно.

Обсуждение

Альгоиндекс NDAI в том виде, как мы его построили для данного исследования, конечно, не лишён недостатков, однако его достоинства явно превышают их по возможной пользе. Воронежское водохранилище, вероятно, — объект более удобный для работы с NDAI. В других водоёмах, куда вносятся притоками больше твёрдого стока, вследствие чего пигментация воды более высока, возможно, наш метод подходит для этого хуже, если не предпринимать дополнительных мер по калибровке NDAI. Тем не менее влияние зелёной пигментации воды от рассеянного фитопланктона и, особенно, ближнего инфракрасного свечения выступающих из воды водорослевых матов многократно превышает эффект от присутствия в воде железа и других красных пигментов.

В данной статье для анализа цветения водохранилища мы использовали только одну, самую простую, характеристику, образованную из первичных рядов NDAI вдоль фарватера, — разницу между максимумом и минимумом средних значений по всем скользящим окнам в пределах целой схемы NDAI. Для более детального анализа можно извлекать допол-

нительные сведения по отдельным сегментам водохранилища. Кроме того, высокой информативностью обладают графики NDAI по профилю: локальное значение NDAI (среднее и дисперсия), пространственная вариабельность NDAI и т. п.

Использование вейвлет-анализа — это изощрённый способ красиво показать то, что в реальных данных присутствует, но не вполне очевидно при первом рассмотрении. Разумеется, всё, что мы написали по поводу результатов применения непрерывного вейвлет-преобразования многолетнего ряда NDAI для Воронежского водохранилища, можно увидеть, внимательно изучая график этого ряда (см. *рис. 4а*), но для этого надо иметь соответствующий опыт.

Кроме того, в данной статье мы не привели результаты наших экспериментов по обоснованию выбора оптимального сорта материнского вейвлета для выполнения с его помощью объективного частотно-временного анализа. Наш опыт позволяет подходить к этой проблеме просто. Если результаты вейвлет-анализа столь коротких и нерегулярных временных рядов дают чёткое разделение хотя бы на две-три обособленные циклические составляющие, то большего и ждать не требуется. Нас не смущает тот факт, что на 39-летнем временном ряду мы выделяем 12-летний цикл, который помещается в наблюдаемых данных всего три с четвертью раза. Собственный обширный опыт применения вейвлет-анализа к разнообразным данным подтверждает его способность к этому. Более того, для него это ещё не предел.

Интерпретацией природы выявленных циклов (с периодом 2 года и 12 лет) мы здесь специально не занимались, хотя для крупномасштабного цикла она, скорее всего, тривиальна и связана с активностью Солнца.

Выводы

Данная статья подводит итог методическим и экспериментальным исследованиям. Главное при этом заключается в следующем.

1. Предложена новая формулировка альгоиндекса, позволяющая тщательно оценивать интенсивность всех стадий цветения водоёма: как с рассеянными в тоще воды массами фитопланктона, так и со сформированными плотными скоплениями на поверхности.
2. Получены данные о характере динамики процессов цветения водоёма с начала появления качественных материалов миссии Landsat (1984) до наших дней, т. е. почти за 40 лет.
3. Обнаружено, что для Воронежского водохранилища в многолетнем разрезе характерно довольно позднее наступление максимума цветения, приходящееся на самый конец календарного лета.
4. В результате вейвлет-анализа полученных рядов данных выявлены присущие им циклические составляющие, наиболее интенсивные из которых имеют преобладающий период 2 года и 12 лет.
5. Обнаружено, что периодические изменения цветения водохранилища характеризуются нестабильностью своих периодов, но в значительно большей степени — амплитуд.
6. Предполагается, что предстоящий 2025 г. имеет шансы стать довольно неблагоприятным в смысле цветения Воронежского водохранилища, так как к тому времени ожидается взаимно усиливающая интерференция разномасштабных циклов.
7. Антропогенное влияние и глобальное потепление явного выражения в выявленных закономерностях цветения Воронежского водохранилища не обнаружили. Они, конечно, влияют на происходящие процессы, но только как более-менее стабильный фон, а не динамично изменяющийся фактор.
8. Предложенная методика сулит много интересных применений и требует дальнейшего использования.

Литература

1. Анциферова Г. А., Шевырев С. Л., Кульнев В. В. и др. Эколого-санитарное состояние Воронежского водохранилища в условиях «цветения» вод по материалам 2016–2022 годов // Изв. Саратовского ун-та. Сер.: «Науки о Земле». 2023. Т. 23. № 3. С. 147–154. DOI: 10.18500/1819-7663-2023-23-3-147-154.
2. Бережнова Т. А., Мамчик Н. П. Оценка состояния водных объектов в местах водопользования населения г. Воронежа // Фундам. исслед. Экология и здоровье населения. 2010. № 9. С. 115–120.
3. Валяльщиков А. А., Силкин К. Ю., Кульнев В. В. Анализ экологического состояния Матырского водохранилища по данным эколого-гидрохимического и спутникового мониторинга // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: Геология. 2014. № 1. С. 110–117.
4. Елисеев А. А., Силкин К. Ю. Корреляция между данными многозональных спутниковых наблюдений и мониторингом поверхностных вод Воронежского водохранилища // Всероссийская научно-практ. конф. «Геоинформ. картографирование в регионах России»: сб. ст. 2024 (в печати).
5. Кутявина Т. И., Кантор Г. Я., Ашихмина Т. Я. и др. Применение методов обработки и анализа космических снимков для изучения эвтрофированных водоёмов (обзор) // Теоретические проблемы экологии. 2020. Т. 2. С. 14–25. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-2-014-025.
6. Кутявина Т. И., Рутман В. В., Ашихмина Т. Я. (2021a) Использование нормализованного относительного альгоиндекса для оценки «цветения» воды в водохранилищах Вятско-Камского Предуралья // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 60–65. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-3-060-065.
7. Кутявина Т. И., Рутман В. В., Ашихмина Т. Я. (2021б) Оценка степени развития фитопланктона в крупных водохранилищах Кировской области по результатам расчёта нормализованного относительного альгоиндекса // Материалы 19-й Всероссийской научно-практ. конф. с международным участием «Биодиагностика состояния природ. и природно-техноген. систем». 2021. С. 85–88.
8. Лаврова О. Ю., Соловьев Д. М., Строчков А. Я., Шендрик В. Д. Спутниковый мониторинг цветения вредоносных водорослей на Рыбинском водохранилище // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т. 11. № 3. С. 54–72.
9. Петросян В. С., Анциферова Г. А., Акимов Л. М. и др. Оценка и прогноз эколого-санитарного состояния Воронежского водохранилища на 2018–2019 гг. // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 7. С. 52–56. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-7-52-56.
10. Силкин К. Ю. Методика оценки экологического состояния Воронежского водохранилища по материалам многозонального дистанционного зондирования // Вестн. Воронежского гос. ун-та. 2012. № 1. С. 220–223.
11. Силкин К. Ю. Вейвлет-анализ спутниковых данных по интенсивности «цветения» водохранилищ при атомных станциях // Материалы 5-й Международ. научно-практ. конф. «Эколог. геология: теория, практика и региональные проблемы». Воронеж: Изд-во «Науч. кн.», 2017. С. 300–302. EDN ZMIBUN.
12. Силкин К. Ю., Кизеев А. Н. Опыт применения данных нерегулярных спутниковых наблюдений для многолетнего мониторинга благополучия фитоценозов в зонах повышенной радиационной опасности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 84–99. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-84-99.
13. Fedorovsky O. D., Khyzhniak A. V., Tomchenko O. V. Assessing aquatic environment quality of the urban water bodies by system analysis methods based on integrating remote sensing data // Space Science and Technology. 2021. V. 27. No. 5(132). P. 11–18. DOI: 10.15407/knit2021.05.011.
14. Suvichakorn A., Lemcke Ch., Schuc A. Jr., Antoine J.-P. The continuous wavelet transform in MRS / Institut de Recherche en Mathématique et Physique Université catholique de Louvain. 2011. 81 p.

Application of wavelet analysis to identify long-term patterns of blooming in Voronezh Reservoir using Landsat satellite images

A. A. Eliseev, K. Yu. Silkin

Voronezh State University, Voronezh 394018, Russia
E-mail: eliseev.36@yandex.ru, const.silkin@yandex.ru

An irregular set of multispectral Landsat satellite imagery data allowed us to analyze the spatiotemporal patterns of water blooms in Voronezh Reservoir. This reservoir is entirely located within the administrative boundaries of a million-plus city and its harmful condition seriously reduces the living comfort of the population. In addition, the waters of Voronezh Reservoir are indirectly used for drinking water supply, which is fraught with serious problems for the social sphere of the city. Remote sensing is traditionally used to monitor the condition of such objects. We have proposed an improved formulation of the transform of multispectral data — the normalized difference algae index (NDAI), which allows us to objectively assess the intensity of phytoplankton reproduction in a given reservoir. Like all similar indexes, NDAI is a convenient tool for an informed solution to the type of problems for which it was created and some others. We have developed and applied a system for monitoring NDAI values taking into account the morphological features of this water body, which is a river-bed reservoir in the form of an extended bending channel. We obtained a typical seasonal variation of NDAI values for the reservoir over almost 40 years of observations. The period when Voronezh Reservoir usually “blooms” the most is recorded — the end of August or the beginning of September. We performed a wavelet analysis of a long-term series of NDAI values (minus the seasonal trend) to identify its inherent periodic components. We found that 2- and 12-year cycles predominate. We also analyzed the identified patterns and attempted a short-term forecast of the state of Voronezh Reservoir due to its bloom.

Keywords: Landsat, water bloom, Voronezh Reservoir, NDAI, algoindex, wavelet analysis, natural cyclicity, forecast

Accepted: 10.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-235-248

References

1. Antsiferova G. A., Shevyrev S. L., Kul'nev V. V. et al., Ecological and sanitary condition of the Voronezh water reservoir under “blooming” conditions based on materials from 2016–2022, *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2023, Vol. 23, No. 3, pp. 147–154 (in Russian), DOI: 10.18500/1819-7663-2023-23-3-147-154.
2. Berezhnova T. A., Mamchik N. P., Water objects assessment in the water consumption places in Voronezh, *Fundamentalnye issledovaniya. Ekologiya i zdorov'e naseleniya*, 2010, No. 9, pp. 115–120 (in Russian).
3. Valyalschikov A. A., Silkin K. Yu., Kulnev V. V., Matyrsky reservoir: environmental, hydrochemical and satellite monitoring for the analysis of its ecological state, *Proc. Voronezh State University. Ser.: Geology*, 2014, No. 1, pp. 110–117 (in Russian).
4. Eliseev A. A., Silkin K. Ju., Correlation between data from multispectral satellite observations and monitoring of surface waters of the Voronezh reservoir, *Vserossiiskaya nauchno-prakt. konf. “Geoinform. kartografirovaniye v regionakh Rossii”*: sb. st. (Proc. All-Russia Scientific and Practical Conf. “Geoinformation Mapping in the Regions of Russia”), 2024 (in print, in Russian).
5. Kutyavina T. I., Kantor G. Ya., Ashikhmina T. Ya. et al., Application of methods for processing and analyzing of satellite images for the study of eutrophicated reservoirs (Review), *Theoretical and Applied Ecology*, 2020, Vol. 2, pp. 14–25 (in Russian), DOI: 10.25750/1995-4301-2020-2-014-025.
6. Kutyavina T. I., Rutman V. V., Ashikhmina T. Ya. (2021a), The use of the normalized relative algoindex for the assessment of algae blooms in the reservoirs of the Vyatka-Kama Cis-Urals, *Theoretical and Applied Ecology*, 2021, No. 3, pp. 60–65 (in Russian), DOI: 10.25750/1995-4301-2021-3-060-065.
7. Kutyavina T. I., Rutman V. V., Ashikhmina T. Ya. (2021b), Assessment of the degree of phytoplankton development in large reservoirs of the Kirov region based on the results of calculating the normalized relative algoindex, *Materialy 19-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii c mezhdunarodnym uchastiem «Biodiagnostika sostoyaniya prirodnikh i prirodno-tekhnogennykh sistem»* (Proc. 19th All-Russian Scientific and Practical Conf. with international participation “Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems”), 2021, pp. 85–88 (in Russian).

8. Lavrova O. Yu., Solovyov D. M., Stochkov A. Ya., Shendrik V. D., Satellite monitoring of harmful algae blooms in the Rybinsk Reservoir, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 54–72 (in Russian).
9. Petrosyan V. S., Antsiferova G. A., Akimov L. M. et al., Valuation and prognosis of ecologic-sanitary state for the Voronezh water basin in 2018–2019, *Ecology and Industry of Russia*, 2019, Vol. 23, No. 7, pp. 52–56 (in Russian), DOI: 10.18412/1816-0395-2019-7-52-56.
10. Silkin K. Yu., Methodology for assessing the ecological state of the Voronezh reservoir based on multispectral remote sensing materials, *Proc. Voronezh State University*, 2012, No. 1, pp. 220–223 (in Russian).
11. Silkin K. Yu., Wavelet analysis of satellite data of flower power of nuclear station reservoirs, *Materialy 5-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Ekologicheskaya geologiya: teoriya, praktika i regional’nye problemy”* (Proc. 5th Intern. Scientific and Practical Conf. “Ecological geology: theory. practice and regional problems”), Vronezh: Publ. House “Scientific book”, 2017, pp. 300–302, EDN ZMIBUN.
12. Silkin K. Yu., Kizeev A. N., Experience of long-term monitoring of phytocenosis condition using temporary irregular remote sensing data in zones of increased radiation hazard, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 84–99 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-84-99.
13. Fedorovsky O. D., Khyzhniak A. V., Tomchenko O. V., Assessing aquatic environment quality of the urban water bodies by system analysis methods based on integrating remote sensing data, *Space Science and Technology*, 2021, Vol. 27, No. 5(132), pp. 11–18, DOI: 10.15407/knit2021.05.011.
14. Suvichakorn A., Lemcke Ch., Schuck A. Jr., Antoine J.-P., *The continuous wavelet transform in MRS*, Institut de Recherche en Mathématique et Physique Université catholique de Louvain, 2011, 81 p.