

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА АЛЬГОЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОДОЕМА НОВОЛИПЕЦКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА НА ОСНОВЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ

В.В. Кульнев, Г.А. Анциферова, А.Н. Насонов, И.В. Цветков, А.Л. Суздалева, М.В. Графкина

Воронежский государственный педагогический университет, Воронежский государственный университет, РГАУ МСХА им К.А. Тимирязева, Тверской государственный университет, Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", Московский политехнический университет

Предложен способ моделирования и анализа динамики регулирования состояний экосистемы на основе построения мультифрактальных моделей, учитывающих многоуровневость ее биоразнообразия. Интегральный отклик экосистемы на управляющие воздействия предложено оценивать путем наложения ее мультифрактального образа на выделенные формы критической организации, отвечающие пределам восстановления структуры экосистемы.

Ключевые слова: техно-природные процессы, мультифрактальная динамика, коррекция альгоценоза, управляющее воздействие

Modeling and Analysis of Algolization Process of a Technological Pond of the Novolipetsk Metallurgical Plant Based on Multifractal Dynamics

V.V. Kul'nev, G.A. Antsiferova, A.N. Nasonov, I.V. Tsvetkov, A.L. Suzdaleva, M.V. Grafkina

Voronezh State Pedagogical University, 394043 Voronezh, Russia, Voronezh State University, 394018 Voronezh, Russia, Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 127550 Moscow, Russia, Tver State University, 170100 Tver, Russia, National Research University "Moscow Energy Institute", 111250 Moscow, Russia, Moscow Polytechnic University, 107023 Moscow, Russia

A method for modeling and analyzing the dynamics of regulation of ecosystem states based on the construction of multifractal models taking into account the multilevel of its biodiversity is proposed. It is proposed to evaluate the integral response of the ecosystem to control actions by superimposing its multifractal image on the selected forms of critical organization that meet the limits of restoration of the ecosystem structure.

Key words: techno-natural processes, multifractal dynamics, algacenos correction, control action

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-10-66-71

Биологическая реабилитация методом коррекции альгоценоза (альголизация) представляет собой действия, направленные на улучшение состояния водной экосистемы, и входит в группу комплексных мер экологической реабилитации, направленных на улучшение состояния водоема, повышение качества воды и увеличение биоразнообразия гидробионтов [7–10]. Теоретической основой альголизации являются антагонистические отношения между

различными группами фитопланктона.

Альголизация заключается во внесении в водоемы искусственно выращенной зеленой микроводоросли хлореллы, экзометаболиты которой негативно воздействуют на синезеленые водоросли [10, 12], т.е. хлорелла борется с синезелеными водорослями путем прямой конкуренции. Предпосылкой к запуску механизма "цветения" водоема являются сбросы хозяйственно-бытовых сточных вод и поверхностного смыва с территорий,

подверженных интенсивному техногенному воздействию (урбанизации, сельскохозяйственному освоению и т.д.), в результате которого значительно ухудшаются органолептические характеристики воды, снижается рекреационный потенциал водоема [6].

Альголизация приводит к тому, что за несколько лет гарантированно исчезают колонии синезеленых водорослей, улучшается структура гидрохимических и органолептических показателей, в силу чего происходит восстановле-

ние состояния водного объекта до рыбохозяйственного и рекреационного назначения [3].

Применение технологии биологической реабилитации водохранилищ на основе метода коррекции альгоценоза требует динамического мониторинга состояний водного объекта в ходе его восстановления и контроля ежегодных изменений как по гидрохимическим, так и по ценогическим показателям. Однако применение традиционных методик, основанных на индексах качества воды, нормированных к ПДК, не позволяет напрямую оценить эффективность применения технологии на уровне структуры гидробиоценоза.

Это становится возможным в условиях применения методики фрактальной оценки экологических состояний, которая позволяет контролировать динамику восстановления как на уровне структуры гидрохимических показателей, так и на уровне биоразнообразия.

Материал и методы исследований

Биологическая реабилитация методом коррекции альгоценоза проводилась с 2009 по 2011 гг. в рамках областной целевой программы "Охрана окружающей природной среды Липецкой области" на Матырском водохранилище, являющемся технологическим водоемом Новолипецкого металлургического комбината, и, одновременно, самым крупным водным объектом Липецкой области [4] (рис. 1). Площадь водного зеркала Матырского водохранилища составляет около 46 км². Оно относится к категории равнинных водохранилищ, характерным гидроморфным элементом которых являются мелководья — участки с глубинами до 2 м, занимающие до 30 % общей площади водоема. Это стало причиной зарастания мелководий тростником, камышом и другими гидрофильными макрофитами. Сильно прогреваемые летом мелководные участки водохранилища превращаются в своеобразный питомник для синезеленых водорослей и различных насекомых [1, 2].

Перед началом альголизации проводится расчет нормы вселения микроводоросли в зависимости от морфометрической структу-

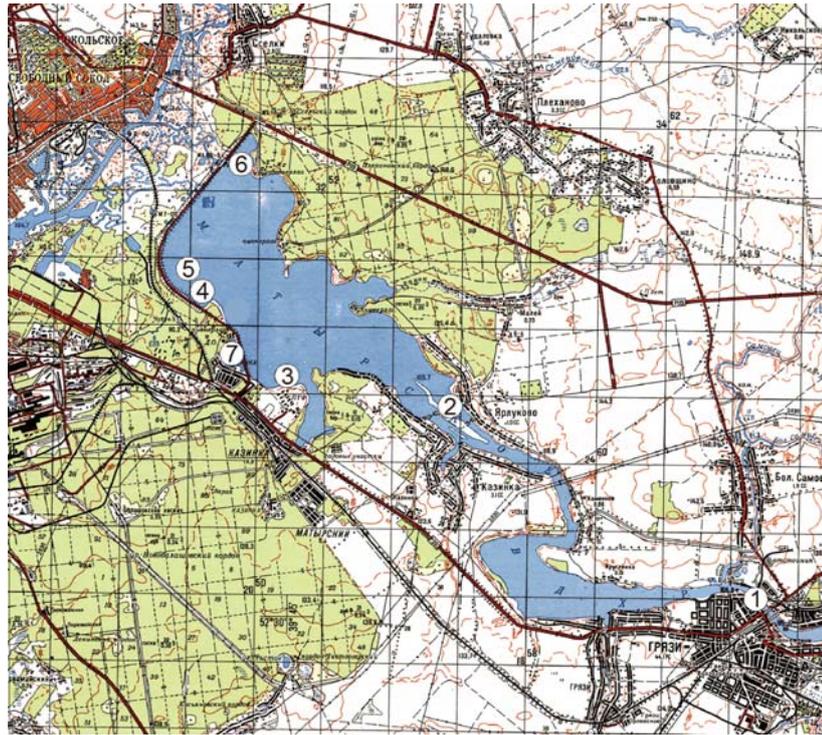


Рис. 1. Точки (1–7) альголизации и мониторинга Матырского водохранилища

Fig. 1. Points (1–7) of algolization and monitoring of the Matyr reservoir

ры водоема, количества притоков, загрязненности воды.

Вселение микроводоросли хлореллы в биоценоз водохранилища (альголизация) начинается в начале весны, затем продолжается в конце мая и заканчивается в июле (рис. 2).

Необходимо отметить, что отсутствие "цветения" водоёма после проведения альголизации не является признаком полного освобождения водоёма от синезеленых водорослей. Для закрепления положительного результата и предотвращения "цветения" необходимо проводить альголизацию четыре года подряд [12]. Вместе с тем, полного освобождения водоёма от синезеленых водорослей быть не может, поскольку представители данного таксона микроводорослей являются полноправным членом сообществ фитопланктона любого водоема. Но при экологическом неблагополучии получают распространение определенные виды микроорганизмов загрязненных местообитаний, и в том числе виды, вызывающие "цветение" вод. Поэтому важная задача мониторинга в ходе реабилитации — контроль изменения состояний экосистемы с целью управления ее развитием.

Авторами была проанализирована проба фитопланктона из Ма-

тырского водохранилища, отобранная 27 июня 2019 г. Средняя численность составляет около 0,98 млн кл./л, биомасса — около 1,09 мг/л. Подобные значения наряду с достаточно высокими значениями оценок обилия видов синезеленых водорослей *Aphanotheca clatrata* W. et G.S. West ("часто") и *Rhabdoderma lineare* Schmidle et Laut. emend. Hollerb. ("нередко") доказывают высокую интенсивность процессов самоочищения, достигнутую с помощью искусственной альголизации планктонными штаммами хлореллы.

Индекс сапробности составляет 1,76, что позволяет по качеству отнести воду к III классу "Удовлетворительной чистоты" при разряде качества вод 3а "До-



Рис. 2. Внесение суспензии микроводоросли *Chlorella sp.*

Fig. 2. Introduction of a suspension of microalgae *Chlorella sp.*

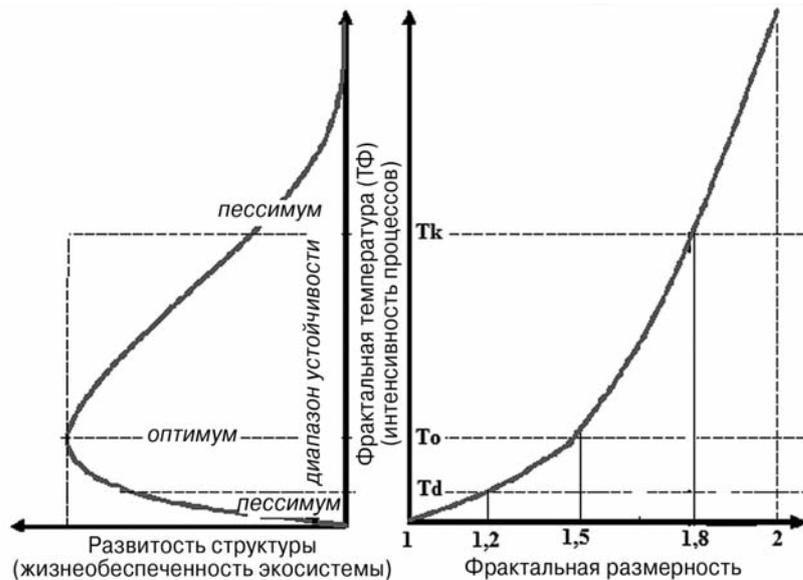


Рис. 3. Отклик экосистемы на воздействие факторов внешней среды в соответствии с принципом толерантности

Fig. 3. The response of the ecosystem to the influence of environmental factors in accordance with the principle of tolerance

статочны чистые". В общем таксономическом составе сообщества фитопланктона доминируют диатомовые водоросли, которые насчитывают 20 видов, принадлежащих 12 родам. В экологическом составе преобладают виды бета-мезосапробные и олиго-бета-мезосапробные, т.е. характерные для достаточно чистых вод. При общем числе 28 видов, которые принадлежат 18 родам, среди синезеленых наблюдается лишь один вид цианобактерий загрязненных местообитаний — *Oscillatoria terebriformis* Ag. с оценкой обилия "нередко". Полученные результаты доказывают полное экологическое благополучие вод Матырского водохранилища, что без сомнения связано с его альголизацией, которая проводилась в этом водоёме в период с 2009 по 2011 гг.

При альголизации происходит искусственное изменение условий существования сообществ гидробионтов, "запускаются" биологические процессы и механизмы их внутренней структурной перестройки, расширяющие число возможных состояний. Задача управления развитием состоит в контроле направления развития самоорганизующейся экосистемы, чтобы способствовать естественному восстановлению водного объекта через следующую последовательность управляющих воздействий, при которых экосистема:

- не меняет направленности своего развития, но при этом

значительно расширяется число новых аттрактивных центров, способствующих локализации ранее избыточной нагрузки;

- изменяет направленность своего развития и движется к новым аттракторам состояний (здесь важно, чтобы новые состояния были метастабильно устойчивыми и поддерживались экосистемой).

Задача управления такими системами сводится к обеспечению такого развития, при котором не происходит упрощения внутрисистемных связей. Проведенный анализ полученных временных рядов гидрохимических показателей позволил установить, что характер поведения экосистемы обладает относительной повторяемостью на различных масштабах их описания, что обеспечивается мультифрактальными свойствами экосистемы, порождающими согласованность поведения компонентов экосистемы на всех уровнях существования, обеспечивая тем самым высокую развитость взаимодействий как внутри системы, так и с окружающей средой [4, 6]. Основной проблемой биологической реабилитации водного объекта является сложность динамического управления процессом альголизации в структуре сложноорганизованного гидробиоценоза.

Новым методологическим приемом, иначе оценивающим сложность и стохастичность многоуровневых живых систем, является анализ их мультифрактальной ор-

ганизации, на которой выстраивается анализируемая иерархия. Для оценки восстановления структуры биоценоза применение методов мультифрактального анализа позволяет судить о характере экосистемных процессов, степени достижения оптимальных показателей и их устойчивости [12].

Отклик экосистемы на воздействие внешних факторов среды можно определить следующей зависимостью:

$$T_{\phi} = 1/(2 - D) - 1, \quad (1)$$

где D — фрактальный показатель (мера) антропогенной преобразованности экосистемы, который вычисляется по временным рядам данных, полученных в ходе экологического мониторинга.

Применительно к сложноорганизованной экосистеме функция $T_{\phi} = F(D)$ является откликом на воздействие антропогенных и абиотических (природно-климатических) факторов, изменение которых также объясняет эффект сезонной варибельности техноприродного взаимодействия и уточняет при этом понятие лимитирующих факторов для сложноорганизованных биоценозов.

Концепция лимитирующих факторов оказалась весьма плодотворной в инженерной экологии, поэтому разработка методов их выявления в структуре антропогенно преобразованных экосистем представляет актуальную практическую задачу.

В соответствии с принципом толерантности, основанном на понятии лимитирующих факторов, область толерантности экосистемы разбивается на зоны качественно разных состояний по интенсивности действия факторов, переход в которые обусловлен достижением характеристических значений функции отклика, обозначенных авторами как пороговые — T_s , T_o , T_k .

При этом D_s , D_o и D_k являются характеристическими фрактальными показателями состояния экосистемы: D_s — состояние истощения или дефицита факторов развития экосистемы, при котором она не может воспроизводиться и утилизировать загрязнения; D_o — экологический оптимум; D_k — состояние избыточности загрязнений (нагрузки), при которых экосистема теряет устойчивость. Из вышеизложенного следует, что T_s , T_o , T_k представляют собой фрак-

тальные показатели отклика экосистемы, соответствующие значениям D_a , D_b , D_k соответственно.

При достижении пороговых значений устойчивости характер процессов обменных взаимодействий экосистемы с внешней средой резко меняется, что объясняется утратой экосистемой свойств фрактальности (рис. 3).

Таким образом, возможна классификация техно-природных процессов по условиям толерантности экосистемы (см. таблицу).

По определению фрактальная размерность определена на фрактальной шкале $D \in [1;2]$. Если в соотношении функции отклика (1) $D = 1$, то $T_\phi = 0$, и, наоборот, если $D = 2$, то $T_\phi = \infty$. Подобные состояния в природе практически не встречаются, поэтому зоны пессимума можно лишь статистически связать с высокой вероятностью развития катастрофных процессов, обусловленных деградацией структуры экосистемы в связи с избыточностью или дефицитом лимитирующих факторов.

Соответственно, диапазон устойчивости экосистемных процессов ограничен пороговыми значениями функции отклика

$$T_a \leq T_\phi \leq T_k \quad (2)$$

Таким образом, появляется возможность по временным рядам экологического мониторинга анализировать динамику развития экосистем. При этом характер исходных данных значения не имеет: это могут быть как гидрохимические, так и гидробиологические показатели или их комбинация, что определяется лишь целями исследования.

В этом случае управление развитием активной системы через природоохранные мероприятия (альголизацию биоценоза) должно основываться на концепции "мягкого" регулирования состояний — создании искусственных условий, при которых система самостоятельно изменяет свои состояния, используя лишь собственный ресурс [13].

Расчёты пороговых значений отклика большинства антропогенно нагруженных водных экосистем показали, что достижение значения функции отклика $T_a = 0,25 \pm 0,15$ свидетельствует о вялотекущих или отсутствующих процессах взаимодействия по исследуемому компоненту вследствие недостатка лимитирующих

Классификация техно-природных процессов по условиям толерантности экосистемы

Classification of technological processes in terms of ecosystem tolerance

Классы техно-природных процессов	Характеристика экологических состояний	Морфологические признаки техно-природных процессов
Оптимальные (непотревоженная биота)	Экологический оптимум	1. Распределение параметров соответствует нормальному 2. Динамическая сбалансированность процессов, $D = D_0$
Нормативные (гомеостаз)	Экологический субоптимум	1. Распределение параметров не соответствует нормальному 2. Динамическая сбалансированность процессов, $D_d < D < D_k$
Предельно допустимые	Неустойчивость	1. Распределение параметров не соответствует нормальному 2. Утрата динамической стабильности процессов, $D_k = D = D_d$
Кризисные с обострением	Экологический пессимум	1. Распределение параметров не соответствует нормальному 2. Дegradация экосистемы, $D_k < D < 2; 1 < D < D_d$

факторов развития. Система слабо реагирует на присутствие компонента, динамика показателей которого анализируется. При значении функции отклика $T_0 = 1 \pm 0,15$ система находится в устойчивом балансовом равновесии со средой при максимально развитой структуре экосистемы. При приближении значения функции отклика к значению $T_k = 4 \pm 0,15$ ситуация по компоненту становится неустойчивой, равновесие нарушается и система может испытывать катастрофические изменения вследствие избыточности лимитирующего фактора, т.е. значение величины за короткий промежуток времени по сравнению со временем наблюдения может измениться в несколько раз, на чем и основан анализ колебаний фрактальной "температуры" временного ряда в качестве "флага" катастрофы. Последовательность процедуры анализа процесса биологической реабилитации водного объекта методом коррекции альгоценоза сводится к следующему.

1. По результатам традиционного мониторинга выбранных параметров экосистемы (гидрохимических параметров) в процессе ее альголизации с периодичностью раз в месяц проводится первичный анализ наблюдаемых временных рядов.

2. Вычисляются фрактальные размерности анализируемых параметров и, соответственно, отклики экосистемы

на их воздействие совместно с управляющим воздействием альголизации.

Процедура определения фрактальной размерности основана на измерении длин временных рядов ее параметров, обладающих свойством масштабной инвариантности, (фрактальных кривых).

Фрактальная кривая на интервале $t \in [a, b]$ определяется как непрерывная и не дифференцируемая кривая, длина которой зависит от масштаба усреднения [11, 14].

Если кривая близка к фрактальной, то с уменьшением масштаба ее длина будет возрастать по степенному закону и рассчитываться через фрактальную размерность:

$$L(\delta) = L_0 \delta^{1-D}, \quad (3)$$



Рис. 4. Отклики экосистемы Матырского водохранилища на коррекцию альгоценоза в виде нормированных фрактальных показателей за 2010, 2011 и 2014 гг.
Fig. 4. Responses of the ecosystem of the Matyr reservoir to the correction of algal bloom in the form of normalized fractal indicators for 2010, 2011 and 2014.

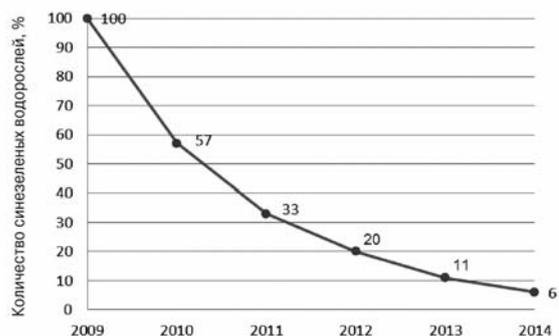


Рис. 5. Динамика очистки Матырского водохранилища в результате применения биологической реабилитации методом коррекции альгоценоза
Fig. 5. The dynamics of cleaning the Matyr reservoir as a result of the application of biological rehabilitation by the method of correction of algacenos

где $L(\delta)$ — длина фрактальной кривой временных рядов; δ — варьируемый масштаб усреднения измерений фрактальной кривой.

3. По результатам вычислений строится фазовая диаграмма состояний экосистемы как сложной мультифрактальной структуры. Такая диаграмма позволяет свести в едином метрическом пространстве (пространстве фрактальных параметров) данные о характере течения разнородных процессов во времени и оценить направленность этих процессов (рис. 4).

4. Процедура вычислений фрактальных показателей и построения на их основе динамик экосистемных процессов повторяется для всех пространственно разнесенных створов водного объекта. Анализ таких динамик может являться сравнительной оценкой неоднородности экологических состояний водного объекта и происходящих в нем процессов.

Анализ диаграмм состояний состоит в том, что динамика откликов по каждому показателю сравнивается с оптимальным откликом T_0 , соответствующим состоянию техноприродного баланса. Направленность процессов от оптимума как к центру диаграммы, так и к ее периферии говорит об усилении тенденции к неустойчивости, пределами которых является нарушение функциональной целостности экосистемы вследствие развития катастрофных процессов (экологический стресс) [12]. Сохранению биоразнообразия экосистемы отвечает лишь зона устойчивости ее состояний с фрактальными откликами (2).

Условно факторы антропогенного воздействия, негативно влияющие на состояние экосистемы и регулируемые посредством альголизации биоценоза, можно подразделить следующим образом:

- факторы блокирования процессов (доступа кислорода, солнечной энергии, влияющие на фотосинтез и тд.) как результат привнесения чужеродных компонентов в природную среду (нефтепродукты, тяжелые металлы);
- факторы ускорения процессов (минеральные соли, биогены);
- мобилизация/иммобилизация субстанций (извлечение природных ресурсов, хозяйственные процессы) [5].

Причиной неблагоприятного развития экосистемы может стать любая группа антропогенных факторов либо их комбинация, нарушающая устойчивость экосистемы — поддержание и сохранение ее структуры за счет стабильности наиболее существенных параметров экосистемы и направленности протекающих процессов [5].

Результаты и их обсуждение

Применение биологической реабилитации методом коррекции альгоценоза на Матырском водохранилище показало, что вегетативные формы и споры синезеленых водорослей уменьшаются за первый год в среднем до уровня 57 % исходного, за два года до уровня 33 % по биомассе, а за пять лет их остается порядка 6 % начального количества, что уже не дает им доминантных преимуществ.

График уменьшения количества синезеленых водорослей приведен на рис. 5 и характеризуется экспоненциальной зависимостью:

$$C = C_0 e^{-t/\tau} \quad (4)$$

где C_0 — первоначальное количество водорослей, выраженное в процентах, τ — постоянная очистки, определяемая временем, в течение которого количество синезеленых водорослей уменьшается в e раз.

По результатам измерений $\tau = 1,79$ года. Цикл технологических работ, за который водный объект практически не подвержен "цветению", составляет 4 года [12].

Полученная экспериментальная зависимость (4) полностью

коррелирует с динамикой мультифрактальных параметров экосистемы по гидрохимическим показателям на основе данных экологического мониторинга (см. рис. 4). Из приведенной диаграммы следует, что корректирующее влияние альголизации в динамике благоприятно влияет на экосистему водного объекта — в 2011–2014 гг. она стала более сбалансированной за счет подавления развития синезеленых водорослей.

Сохранение положительной динамики развития водной экосистемы подтверждается тем, что даже по состоянию на июнь 2019 г. на водохранилище не зафиксировано массового развития синезеленых водорослей.

Выводы

Целью биологической реабилитации методом коррекции альгоценоза является обеспечение экологической безопасности техногенно нагруженных водных объектов, заключающееся в том, чтобы перевести или сбалансировать экосистему в режиме устойчивых колебаний откликов ее компонентов около значения $T_0 = 1 \pm 0,15$, чтобы обеспечить максимальную развитость структуры экосистемы и ее антропогенную пластичность.

Управление развитием водного объекта через альголизацию относится к мягкому регулированию, подразумевающему ликвидацию преимуществ одного режима развития по сравнению с другим за счет внешних управляющих воздействий. Это предполагает, что экосистеме лишают прежней устойчивости, принудительно воздействуя на параметры экосистемы, в результате чего экосистема самостоятельно изменяет направленность своего развития, используя при этом лишь собственный ресурс. Индикатором ответной реакции экосистемы на управляющие воздействия и оценкой качества этих воздействий служат фазовые диаграммы состояний, построенные на фрактальной шкале. Динамика их изменения дает возможность оценки варибельности отклика и устойчивости состояния экосистемы в ответ на управляющие воздействия альголизации.

Литература

1. Анциферова Г.А., Кульнев В.В. Биотехнологии в управлении качеством искусственных водных объектов на примере Матырского водохранилища. Матер. XV Междунар. науч.-практ. конф. "Комплексные проблемы техносферной безопасности". Ч. II. Воронеж, Изд-во ВГТУ, 2016. С. 94–106.
2. Анциферова Г.А., Кульнев В.В. Об изменении структуры фитопланктонного сообщества Матырского водохранилища в течение вегетационных сезонов 2010–2012 и 2014–2015 годов. Матер. XV Междунар. науч.-практ. конф. «Комплексные проблемы техносферной безопасности». Часть VIII. Воронеж, Изд-во ВГТУ, 2016. С. 94–106.
3. Богданов Н.И. Биологическая реабилитация водоемов. Монография. Пенза, RIO ПГСХА, 2008. 126 с.
4. Валяльщикова А.А., Кульнев В.В., Силкин К.Ю. Анализ экологического состояния Матырского водохранилища по данным эколого-гидрохимического и спутникового мониторинга. Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2014. № 1. С. 110–118.
5. Дягилева А.Б. Современные проблемы окружающей среды. Ч. 1. СПб ГТУРП СПб., 2012. 109 с.
6. Кульнев В.В., Базарский О.В. Об определении влияния биологической реабилитации Матырского водохранилища методом коррекции альгоценоза на изменение железа, меди и марганца в воде приплотинной части данного водного объекта. В сб.: Материалы второго молодежного инновационного проекта "Школа экологических перспектив". Под ред. проф. И.И. Косиновой. Воронеж, 2013. С. 28–31.
7. Кульнев В.В., Почечун В.А. Опыт альголизации питьевых водоемов Нижнетагильского промышленного узла. Биосфера. 2016. Т. 8. № 3. С. 287–290.
8. Кульнев В.В., Почечун В.А. Применение альголизации питьевых водоемов Нижнетагильского промышленного узла. Медицина труда и промышленная экология. 2016. № 1. С. 20–21.
9. Кульнев В.В., Богданов Н.И., Лухтанов В.Т. Биологическая реабилитация водных объектов посредством структурной перестройки фитопланктонного сообщества. В сб.: Аквакультура России: вклад молодых. Материалы конференции молодых ученых и специалистов. 2012. С. 51–56.
10. Марченко Е.Е., Кульнев В.В., Анциферова Г.А., Тарасова Н.Г., Еремкина Т.В., Михайлов Б.В. К вопросу о таксономическом составе фитопланктона и качестве воды Леневого водохранилища и Нижнетагильского городского пруда (Свердловская область). Тр. III-го Уральского Междунар. экологического конгресса «Экологическая безопасность промышленных регионов». Пермь, 2015. С. 73–82.
11. Масловская А.Г., Осокина Т.Р., Барабаш Т.К. Применение фрактальных методов для анализа динамических данных. Вестник Амурского государственного университета. Сер. Естеств. и экон. науки. 2010. Вып. 51. С. 13–20.
12. Насонов А.Н., Цветков И.В., Кульнев В.В., Базарский О.В., Жогин И.М. Фрактальный анализ биологической реабилитации водных объектов методом коррекции альгоценоза. Матер. Междунар. научн. форума "Проблемы управления водными и земельными ресурсами". В 3 ч. М., 2015. С. 165–180.
13. Усманов И.Ю., Щербakov А.В. Пульсирующая многомерная ниша растений: расширение объема понятия. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 18. № 2(2). 2016.
14. Цветков И.В. Использование фрактальных временных рядов в комплексном анализе речных систем. Сб. науч. тр. "Моделирование сложных систем". Тверь, Изд-во ТвГУ, 1998. Вып. 1. С. 145–155.

References

1. Antsiferova G.A., Kul'nev V.V. Biotekhnologii v upravlenii kachestvom iskusstvennykh vodnykh ob'ektov na primere Matyrskogo vodokhranilishcha. Mater. XV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Kompleksnyye problemy tekhnosfernoi bezopasnosti". Ch. II. Voronezh, Izd-vo VGTU, 2016. S. 94–106.
2. Antsiferova G.A., Kul'nev V.V. Ob izmenenii struktury fitoplanktonnogo soobshchestva Matyrskogo vodokhranilishcha v techenie vegetatsionnykh sezonov 2010–2012 i 2014–2015 godov. Mater. XV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Kompleksnyye problemy tekhnosfernoi bezopasnosti». Chast' VIII. Voronezh, Izd-vo VGTU, 2016. S. 94–106.
3. Bogdanov N.I. Biologicheskaya reabilitatsiya vodoemov. Monografiya. Penza, RIO PGSKhA, 2008. 126 s.
4. Valyal'shchikova A.A., Kul'nev V.V., Silkin K.Yu. Analiz ekologicheskogo sostoyaniya Matyrskogo vodokhranilishcha po dannym ekologo-gidrokhimicheskogo i sputnikovogo monitoringa. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya. 2014. № 1. S. 110–118.
5. Dyagileva A.B. Sovremennyye problemy okruzhayushchei sredy. Ch. 1. SPb GTURP SPb., 2012. 109 s.
6. Kul'nev V.V., Bazar'skii O.V. Ob opredelenii vliyaniya biologicheskoi reabilitatsii Matyrskogo vodokhranilishcha metodom korrektsii al'gotsezoza na izmenenie zheleza, medi i margantsa v vode priplotinnoi chasti dannogo vodnogo ob'ekta. V sb.: Materialy drugogo molodezhnogo innovatsionnogo proekta "Shkola ekologicheskikh perspektiv". Pod red. prof. I.I. Kosinovi. Voronezh, 2013. S. 28–31.
7. Kul'nev V.V., Pochechun V.A. Opyt al'golizatsii pit'evykh vodoemov Nizhnetagil'skogo promyshlennogo uzla. Biosfera. 2016. T. 8. № 3. S. 287–290.
8. Kul'nev V.V., Pochechun V.A. Primenenie al'golizatsii pit'evykh vodoemov Nizhnetagil'skogo promyshlennogo uzla. Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya. 2016. № 1. S. 20–21.
9. Kul'nev V.V., Bogdanov N.I., Lukhtanov V.T. Biologicheskaya reabilitatsiya vodnykh ob'ektov posredstvom strukturnoi perestroiki fitoplanktonnogo soobshchestva. V sb.: Akvakultura Rossii: vklad molodykh. Materialy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov. 2012. S. 51–56.
10. Marchenko E.E., Kul'nev V.V., Antsiferova G.A., Tarasova N.G., Eremkina T.V., Mikhailov B.V. K voprosu o taksonomicheskom sostave fitoplanktona i kachestve vody Lenevskogo vodokhranilishcha i Nizhnetagil'skogo gorodskogo pruda (Sverdlovskaya oblast'). Tr. III-go Ural'skogo Mezhdunar. ekologicheskogo kongressa «Ekologicheskaya bezopasnost' promyshlennykh regionov». Perm', 2015. S. 73–82.
11. Maslovskaya A.G., Osokina T.R., Barabash T.K. Primenenie fraktal'nykh metodov dlya analiza dinamicheskikh dannykh. Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestv. i ekon. nauki. 2010. Vyp. 51. S. 13–20.
12. Nasonov A.N., Tsvetkov I.V., Kul'nev V.V., Bazar'skii O.V., Zhogin I.M. Fraktal'nyi analiz biologicheskoi reabilitatsii vodnykh ob'ektov metodom korrektsii al'gotsezoza. Mater. Mezhdunar. nauchn. foruma "Problemy upravleniya vodnymi i zemel'nymi resursami". V 3 ch. M., 2015. S. 165–180.
13. Usmanov I.Yu., Shcherbakov A.V. Pul'siruyushchaya mnogomernaya nisha rastenii: rasshirenie ob'ema ponyatiya. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. Tom 18. № 2(2). 2016.
14. Tsvetkov I.V. Ispol'zovanie fraktal'nykh vremennykh ryadov v kompleksnom analize rechnykh sistem. Sb. nauch. tr. "Modelirovanie slozhnykh sistem". Tver', Izd-vo TvGU, 1998. Vyp. 1. S. 145–155.

V.V. Kul'nev – kand. geogr. nauk, docent, Voronezhskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet, 394043 Rossiya, g. Voronezh, ul. Lenina 86, e-mail: kulneff.vadim@yandex.ru • Г.А. Анциферова – д-р геогр. наук, профессор, Воронежский государственный университет, 394068 Россия, г. Воронеж, ул. Хользунова 40, лит. "А", e-mail: g_antisiferova@mail.ru • А.Н. Насонов – канд. техн. наук доцент, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 127550 Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская 49, e-mail: adn22@yandex.ru • И.В. Цветков – д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский университет, 170100 Россия, г. Тверь, ул. Желябова 33, e-mail: mancu@mail.ru • А.Л. Суздалева – д-р биол. наук, профессор, Всероссийский исследовательский университет "Московский энергетический институт", 111250 Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная 14, e-mail: suzdaleva@yandex.ru • М.В. Графкина – д-р техн. наук, зав. кафедрой, Московский политехнический университет, 107023 Россия, г. Москва, ул. Б. Семеновская 38, e-mail: marina.grafkina@rambler.ru

V.V. Kul'nev – Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Voronezh State Pedagogical University, 394043 Russia, Voronezh, Lenin Str. 86, e-mail: kulneff.vadim@yandex.ru • G.A. Antsiferova – Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Voronezh State University, 394068 Russia, Voronezh, Khol'zunova str. 40, lit. "A", e-mail: g_antisiferova@mail.ru • A.N. Nasonov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, RSAU Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 127550 Russia, Moscow, Timiryazevskaya Str. 49, e-mail: adn22@yandex.ru • I.V. Tsvetkov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Tver State University, 170100 Russia, Tver, Zhelyabova Str. 33, e-mail: mancu@mail.ru • A.L. Suzdaleva – Dr. Sci. (Biol.), Professor, National Research University "Moscow Energy Institute", 111250 Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya Str. 14, e-mail: suzdaleva@yandex.ru • M.V. Grafkina – Dr. Sci. (Eng.), Head of Department, Moscow Polytechnic University, 107023 Russia, Moscow, B. Semenovskaya Str. 38, e-mail: marina.grafkina@rambler.ru