

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.062

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-305-318>

Изучение биопродуктивности искусственного водоема на основе графовой модели взаимодействия природных и антропогенных факторов

И.Ю. Кузнецова ID, А.В. Никитина ID

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ mail@kuznetsova-i-yu.ru



EDN: OBWTCN

Аннотация

Введение. Игнорирование системной природы водохранилища обуславливает неэффективные и деструктивные управлительские решения. Однако изучение таких объектов часто фокусируется именно на отдельных факторах. Прогнозный потенциал графовых моделей для этих целей ограничивается дефицитом экспертизы информации и устаревающей базой индикаторов. Представленная работа призвана восполнить эти пробелы. Цель — оценка эффективности мероприятий по улучшению состояния Цимлянского водохранилища. Основа решения — авторская графовая модель взаимодействия антропогенных и биотических характеристик объекта.

Материалы и методы. Анализировались литературные источники, информация о гидробиохимии и видовом составе рыб. В модели учли 20 факторов состояния Цимлянского водохранилища. Анализ гидробиологии позволил составить граф $G(V, E, Y)$. V — множество вершин, $v_k \in V$, $k = \overline{1, 20}$. E — множество ориентированных ребер $e_k = (v_i, v_j)$ в виде упорядоченных пар длины 2, $i \neq j$. Y — отображение, $Y: V \rightarrow V$. Матрицу весов построили по интегральной оценке экспертов для каждого фактора. Весовые коэффициенты ($\pm 0,5 \pm 1$) рассчитали по информационной базе гидробиологических и химических данных.

Результаты исследования. Выяснили, как повлияет на объект устранение дрейссены при однократной очистке (1-й сценарий) и трехлетней (2-й). Визуализировали динамику импульсов для состояния воды (v_{15}) и изменения концентрации биовеществ (v_{18}). В первом сценарии для первого фактора максимальный импульс (0,5) фиксируется с 3-го года воздействия, минимальный (0) — в течение 1-го. Для второго фактора за 3-й год импульс увеличивается с минимума (-0,5) до максимума (0,25). Во втором сценарии оба фактора не меняются в 1-й год. Затем импульс для v_{15} растет (до 0,75), v_{18} падает во 2-й год до -0,5, а потом увеличивается до -0,25.

Оценили воспроизводство леща при подкорме v_5 в течение года (3-й сценарий) и пяти лет (4-й). Учитывалось состояние нерестовой рыбы v_1 , пополнение молоди v_2 , промысел v_7 , эвтрофикация v_{14} . Два года остаются нулевыми импульсы v_2 , v_7 и v_{14} . Затем v_2 и v_7 растут до единицы, в 4-й год падают до нуля. Импульс эвтрофикации падает до -1, к концу 4-го года возвращается к нулю. При пятилетнем подкорме импульс v_1 падает до -1 в 1-й год, v_{14} — в 3-й, и его значение не меняется, а v_1 возвращается к 0 на 5-й год моделирования. Импульс для v_2 и v_7 за три года растет с нуля до единицы.

Обсуждение. Ежегодная очистка водоема от дрейссены более эффективна для улучшения состояния воды и менее — для концентрации биогенных веществ. Единоразовая подкормка повысит поголовье молоди и промысел. Эвтрофикация сократится, однако устойчивых результатов не будет. Ежегодный подкорм увеличит поголовье молоди, сократит эвтрофикацию и обусловит развитие промысла.

Заключение. Предложенное решение позволяет прогнозировать пользу или вред антропогенных воздействий на водохранилище. Модель можно совершенствовать за счет более тонкой настройки весовых коэффициентов, учета нелинейных и пороговых эффектов и других индикаторов.

Ключевые слова: цимлянское водохранилище, графовая модель состояния водоема, антропогенное воздействие на водоем, очистка водоема от дрейссены, воспроизводство леща при подкорме

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25–71–20001, <https://rscf.ru/project/25-71-20001/>

Для цитирования. Кузнецова И.Ю., Никитина А.В. Изучение биопродуктивности искусственного водоема на основе графовой модели взаимодействия природных и антропогенных факторов. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2025;9(4):305–318. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-305-318>

Original Empirical Research

Study of Artificial Reservoir's Bioproductivity Based on a Graph Model of Natural and Anthropogenic Factor Interaction

Inna Yu. Kuznetsova ✉ Alla V. Nikitina 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ mail@kuznetsova-i-yu.ru

Abstract

Introduction. Ignoring the systemic nature of a reservoir can lead to ineffective and damaging management decisions. However, the study of such objects often focuses on individual factors. The predictive potential of graph models is limited by a lack of expert information and outdated databases of indicators. This work aims to address these issues by evaluating the effectiveness of measures to improve the condition of the Tsimlyansk Reservoir. The solution is based on the author's graph model that takes into account the interaction of anthropogenic and biotic characteristics of the object.

Materials and Methods. The literature sources and information on hydrobiochemistry and species composition of fish were analyzed. A model was created that took into account 20 factors related to the state of the Tsimlyansk Reservoir. A hydrobiological analysis allowed us to create graph $G(V, E, Y)$. V — set of vertices, $v_k \in V$, $k = \overline{1, 20}$. E — set of oriented edges $e_k = (v_i, v_j)$ in the form of ordered pairs of length 2, $i \neq j$. Y — mapping, $Y: V \rightarrow V$. A weight matrix was created based on an integral assessment of each factor by experts. The weighting coefficients ($\pm 0.5 \pm 1$) were calculated using information from hydrobiological and chemical databases.

Results. We investigated how the removal of zebra mussels would affect the facility during a single cleaning (scenario 1) and a three-year cleaning (scenario 2). We visualized the dynamics of pulses for the state of the water (v_{15}) and changes in the concentration of biological substances (v_{18}). In the first scenario, for the first factor, the maximum pulse (0.5) was fixed from the third year of exposure; the minimum (0) was during the first year. For the second factor, the pulse increased from a minimum (-0.5) to a maximum (0.25) over the third year. In the second scenario, both factors did not change in the first year. Then the pulse for v_{15} increased (to 0.75), v_{18} fell in the second year to -0.5 , and then increased to -0.25 .

Bream reproduction with v_5 feeding was evaluated for a year (scenario 3) and five years (scenario 4). The state of spawning fish v_1 , replenishment of juveniles v_2 , fishing v_7 , and eutrophication v_{14} were taken into account. v_2 , v_7 , and v_{14} pulses remained zero for two years. Then v_2 and v_7 grew to one, and in the fourth year they fell to zero. The eutrophication pulse dropped to -1 , and returned to zero by the end of the fourth year. With a five-year feeding, v_1 pulse dropped to -1 in the first year, v_{14} — in the third, and its value did not change, and v_1 returned to 0 in the fifth year of modeling. The pulse for v_2 and v_7 grew from zero to one in three years.

Discussion. Annual cleaning of a reservoir from zebra mussel was more effective for improving the water condition and less effective for the concentration of nutrients. One-time feeding would increase the number of juveniles and fishing. Eutrophication would decrease, but there would be no sustainable results. Annual feeding would increase the number of juveniles, reduce eutrophication and lead to the development of fishing.

Conclusion. The proposed solution makes it possible to predict potential benefits or harm of anthropogenic activities on the reservoir. The model can be improved by fine-tuning the weighting coefficients, taking into account non-linear and threshold effects as well as other indicators.

Keywords: Tsimlyansk Reservoir, graph model of reservoir condition, anthropogenic impact on the reservoir, cleaning the reservoir from zebra mussels, bream reproduction with feeding

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and the comments indicated, which made it possible to improve its quality.

Funding Information. The research was done with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 25–71–20001, <https://rscf.ru/project/25-71-20001/>

For Citation. Kuznetsova IYu, Nikitina AV. Study of Artificial Reservoir's Bioproductivity Based on a Graph Model of Natural and Anthropogenic Factor Interaction. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2025;9(4):305–318. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-4-305-318>

Введение. Гидробиологическое исследование водоема позволяет оценить экологическое состояние водных экосистем и разработать меры по их сохранению и восстановлению. Водохранилища — важные объекты природопользования. Они обеспечивают водоснабжение населения, промышленности и сельского хозяйства. При этом качество водной среды ухудшается из-за антропогенного влияния. Городские и сельскохозяйственные стоки меняют температуру водоемов, нарушают естественную кормовую базу и способствуют размножению вредоносных растений и животных [1]. Все это ведет к сокращению биопродуктивности водоемов, т. е. генерирует экологические и экономические риски.

Цимлянское водохранилище — источник питьевой воды для миллионов жителей Ростовской и Волгоградской областей. Важно отслеживать изменения гидробиологических индикаторов водоема, разрабатывать методы защиты и восстановления экосистемы [2].

Создание эффективных стратегий сохранения и восстановления экосистемы водоема требует глубокого понимания механизмов взаимодействия его антропогенных и биотических характеристик. Российские и зарубежные ученые исследовали факторы продуктивности искусственных водоемов. Однако многие задачи не решены. К тому же все еще не стал нормой комплексный подход к проблемам качества среды искусственных водоемов.

Ключевой антропогенный фактор биотического благополучия водоема — уровень воды в водохранилище [3]. От него зависят успешность нереста [4], выживаемость молоди, доступность кормовых биотопов, зимовка [5]. Так, сработка (понижение) уровня воды в водохранилище может быть опасна. Из-за этого во время нереста погибает икра фитофильных рыб (карп, сазан, лещ, карась, плотва). Однако после нереста сработка обеспечивает хороший прогрев мелководий и таким образом улучшает условия нагула молоди.

Как природные, так и антропогенные факторы могут быть причинами эвтрофикации. С одной стороны, она повышает продуктивность зоопланктона (корм для молоди), с другой — может вызвать токсичные цветения, а также гипоксию и гибель бентоса (корм для донных рыб) [6].

В [7] показано влияние токсичных веществ на состояние воды и продуктивность водоема. В книге [8] представлен комплексный анализ влияния рыболовства, перелова и выбора орудий лова на популяции рыб. В [9] анализируются причины и последствия вселения новых видов моллюсков и рыб в пресноводные водоемы. Показано, что чужеродные виды меняют биогеохимические циклы и биотический состав экосистем. Инвазивный вид может создать конкуренцию исконным или стать новым объектом промысла. В [10] обобщаются результаты многолетних исследований ученых Зоологического института Российской академии наук о причинах и механизмах расселения видов, о биоразнообразии наземных и водных экосистем и влиянии чужеродных видов. Авторы [11] оценивают риски бионивазий в морские прибрежные экосистемы на примере Приморского края. Статья [12] посвящается исследованию биоразнообразия Цимлянского водохранилища. В ней выделены новые виды зоопланктона, определены зоны их расселения в водохранилище.

Отметим существенные для продуктивности акваторий биотические факторы:

- обилие и доступность кормовой базы (зоопланктон, бентос, рыбы);
- влияние хищников, включая чужеродные виды, на популяции промысловых рыб [13].

Итак, в открытом доступе есть литература об отдельных условиях, от которых зависит продуктивность водоемов. При этом недостаточно изучено взаимодействие этих факторов и их совокупное влияние на биоразнообразие и популяции промысловых рыб. Экосистемы водоемов характеризуются высокой динамикой трансформаций, пространственной неоднородностью и нелинейными связями между различными факторами [14]. В последние десятилетия широкое распространение получили сетевые модели, позволяющие анализировать динамические связи между отдельными видами и параметрами среды.

Графовые модели позволяют выявлять ключевые узлы, моделировать сценарии воздействий и количественно оценивать силу и направление связей. Такие решения показывают структуру взаимодействий (узлы — факторы, ребра — связи). Один из примеров использования графовых моделей в экологии — описание трофических сетей из нескольких переплетающихся пищевых цепочек. Такая схема нужна для анализа устойчивости и определения ключевых видов [15]. Данный подход широко используется при моделировании связности местообитаний и описании миграционных процессов [16], а также при моделировании влияния того или иного вида или фактора на экосистему [17]. В [18] графовая модель взаимодействия антропогенных и биотических факторов позволила оценить эффективность искусственного восстановления популяций Каспийского моря, подвергавшихся чрезмерному промысловому вылову.

Таким образом, исследование графовой модели взаимодействия антропогенных и биотических факторов открывает возможность качественного решения прикладных задач:

- развития устойчивого рыболовства;
- оптимизации процессов разведения рыбы.

К тому же благодаря предложенному подходу можно научно обосновать рекомендации по защите уникальных экосистем водохранилищ. Графовая модель наглядно отражает сложную структуру причинно-следственных связей в экосистеме водоема, дает возможность количественно оценивать силу, направление вли-

ния различных факторов и выполнять сценарный анализ последствий различных изменений в экосистеме. Цель данного исследования — построение графовой модели взаимодействия антропогенных и биотических факторов для Цимлянского водохранилища, а также оценка эффективности различных мероприятий по улучшению его экологического состояния.

Материалы и методы. При определении материалов и методов исходили, в частности, из особенностей объекта исследования. Цимлянское водохранилище, расположенное на реке Дон в Ростовской и Волгоградской областях, — один из крупнейших и наиболее значимых искусственных водоемов на юге России.

Цимлянское водохранилище относится к типу равнинных русловых, с сильно развитой береговой линией.

Его характеристики:

- большая площадь зеркала (~2700 км²);
- значительная протяженность (~260 км);
- относительно небольшие глубины (средняя ~8,8 м, максимальная ~35 м в старом русле Дона).

Значительные сезонные и многолетние колебания уровня воды определяются режимом работы водозаборов, гидроэлектростанции, а также климатическими условиями (снеговое питание, осадки, испарение). Слабое весеннее половодье объясняется зарегулированностью Дона выше водохранилища. Последние годы отмечается существенное сокращение объемов поступления воды¹.

Для зимы характерен устойчивый ледовый покров. Летом наблюдается четкая температурная стратификация. Из-за этого возникает дефицит кислорода, формируется гиполимнион, особенно в глубоководных участках.

Цимлянское водохранилище построили в 1952 году и полностью заполнили в 1953-м. Объект используется для рыболовства, водоснабжения населения в Ростовской и Волгоградской областях, орошения сельскохозяйственных угодий и выработка электроэнергии. Кроме того, водохранилище обеспечивает работу Волго-Донского судоходного канала.

В последние десятилетия наблюдается изменение гидробиологического режима водоема под влиянием природных и антропогенных факторов.

Хронически высокий уровень биогенных элементов (соединения азота, фосфора) со сточными водами и сельскохозяйственными стоками приводит к ухудшению кислородного режима, формированию заморных зон. В таких условиях развиваются токсичные виды цианобактерий, разрастается фитопланктон («цветение» воды) [19]. Другие особенности водохранилища:

- активное заиление;
- высокая мутность воды в приплотинной части из-за аккумуляции наносов с Верхнего Дона².

Большая масса растительности на мелководье негативно влияет на естественное воспроизводство промысловых видов рыб [20].

Интенсивная многолетняя эксплуатация, мощное антропогенное воздействие и естественные процессы старения водохранилища привели к значительной трансформации его экосистемы и ухудшению гидробиологического состояния.

К тому же продуктивность водохранилища существенно сокращается минимум по двум причинам:

- чрезмерный вылов промысловых видов (лещ, судак, тарань, сазан, щука и толстолобик);
- инвазия чужеродных видов (например, моллюсков *Dreissena polymorpha*, *D. bugensis*, ракообразных).

Для разработки стратегий устойчивого управления водохранилищем³ и предотвращения его дальнейшей деградации критически важны мониторинг и оценка состояния системы, выявление ключевых проблем и прогнозирование их развития [21].

Ниже обосновывается выбор графовой модели и ее элементов.

Анализ искусственного водоема — это длительная, объемная работа. Необходимо учесть несколько факторов, определяющих состояние объекта:

- 1) сложность экосистемы, в которой нелинейно взаимодействуют гидрология, климат, загрязнение, биогены, биота и другие факторы;
- 2) пространственная неоднородность водохранилища с различными условиями (верхний участок, центральное плесо, приплотинная зона);
- 3) недостаток пространственных репрезентативных данных в высоком разрешении по всем компонентам экосистемы (особенно бентос, зоопланктон, микробиология, загрязнители) для калибровки и валидации модели;
- 4) неопределенность входных данных и параметров моделей.

¹ Цимлянское водохранилище и водохранилища бассейна Нижнего Дона. Федеральное агентство водных ресурсов. URL: https://voda.gov.ru/activities/tsimlyanskoe-vodokhranilische-i-vodokhranilishcha-basseyna-nizhnego-dona/?phrase_id=177953&PAGEN_1=2 (дата обращения: 28.10.2025).

² Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник-2023. Ростов: Росгидромет, Гидрохимический институт; 2024. 156 с. URL: <https://clk.ru/3QZ3Sk> (дата обращения: 28.10.2025).

³ Стратегия социально-экономического развития Ростовской области на период до 2030 года. Постановление Правительства Ростовской области № 864 от 26.12.2018. В редакции № 1100 от 19.12.2022). Раздел «Экология». Официальный портал Правительства Ростовской области. URL: <https://www.donland.ru/activity/2158/#pril435> (дата обращения: 28.10.2025).

Модели, описывающие гидробиологические процессы в водоеме, можно разделить на несколько классов.

1. Статистические. Базируются на данных мониторинга и широко используются для выявления значимых связей между отдельными факторами (объемы популяций рыб, фитопланктона, вылов). К недостаткам таких моделей можно отнести слабый учет косвенных эффектов и обратных связей, а также необходимость большого объема замеров [22].

2. Динамические (например, NPZD или NPZD+⁴). Позволяют моделировать потоки, в том числе популяции рыбы, но при этом требуют большого объема входных данных, сложны в калибровке, слабо учитывают некоторые антропогенные воздействия (например, точечное загрязнение) [23].

3. Агент-ориентированные. Моделируют поведение отдельных популяций. Крайне ресурсоемки и требуют детальных знаний о поведении, что ограничивает области их применения.

4. Гидродинамико-экологические (Delft3D, MIKE, Ce-Qual-W2, Azov3D). Позволяют учесть пространственную неоднородность, интегрировать гидрофизические, биологические и химические процессы. Однако их применение в моделировании сложной динамики популяций рыб и множественных антропогенных воздействий в искусственном водоеме — это трудоемкая задача с точки зрения вычислений [24].

5. Концептуальные (DPSIR⁵). Полезны для структурирования проблемы, но не позволяют проводить количественный анализ и прогнозирование.

Таким образом, известные модели либо слишком упрощены и не подходят для учета сложных взаимодействий (как статистические), либо чрезмерно сложны для построения и ресурсоемки для оперативного использования (динамические, агент-ориентированные и гидродинамические), либо не дают количественных прогнозов (концептуальные).

Графовые модели представляют собой относительно простой и гибкий инструмент, способный интегрировать разнородные данные (физические, химические, биологические, антропогенные) и наглядно представлять структуру их взаимодействий для анализа и прогноза состояния рыбных ресурсов.

Анализ моделей ихтиологии позволил детально изучить факторы, определяющие продукционно-дистракционные процессы в водоеме. Так, в статье [18] рассматривается графовая система влияния антропогенных и биотических факторов на продуктивность водоема. Автор указанной работы обозначил как вершины графа 12 факторов, во многом определяющих динамику популяции осетровых. В [25] показана роль промысла в динамике численности популяции с учетом возраста и пола особей. В [26] кроме промысла учитываются сезонные изменения среды обитания минтая *Theragra chalcogramma*.

К недостаткам рассмотренных моделей можно отнести отсутствие учета пространственно-неоднородных гидродинамических процессов. К тому же многие модели игнорируют важное условие воспроизводства промысловых рыб — механизм наружно-гормонального регулирования фито- и зоопланктона.

На основе анализа гидробиологического состояния Цимлянского водохранилища и некоторых математических моделей популяционной динамики при построении графовой модели учтены следующие факторы: v_1 — состояние нерестовой части стада рыб; v_2 — годовое пополнение молоди; v_3 — естественная (компенсационная) убыль поколения; v_4 — благоприятность условий полового созревания; v_5 — удельная эффективность естественного воспроизводства (подкорм); v_6 — масштабы искусственного выпуска; v_7 — уровень промысловой эксплуатации рыбных биоресурсов; v_8 — биомасса доминирующего вида кормового бентоса; v_9 — обеспеченность кислородом кладок икры на нерестилище; v_{10} — трансгрессия уровня Цимлянского водохранилища; v_{11} — численность основных естественных врагов молоди; v_{12} — доступная протяженность путей нерестовой миграции; v_{13} — зарастание ракушкой дрейссена (*Dreissena polymorpha*); v_{14} — эвтрофикация; v_{15} — состояние вод Цимлянского водохранилища; v_{16} — изменение биомассы леща; v_{17} — изменение концентрации фито- и зоопланктона; v_{18} — изменение концентрации биогенных веществ (соединения азота, фосфора, кремния); v_{19} — влияние абиотических факторов (соленость, температура); v_{20} — антропогенное воздействие (очистка дна водохранилища от инвазивного вида — ракушки дрейссена).

На основании анализа гидробиологического состояния Цимлянского водохранилища получен график $G(V, E, Y)$. Здесь:

— V — множество вершин графа (концептов), $v_k \in V$, $k = \overline{1, 20}$;

— E — множество ориентированных ребер (связей) $e_k = (v_i, v_j)$, заданных в виде упорядоченных пар (кортежей) длины 2, $i \neq j$;

— Y — отображение, $Y: V \rightarrow V$.

⁴ От англ. nutrient — питательные вещества, phytoplankton — фитопланктон, zooplankton — зоопланктон, detritus — детрит.

⁵ От англ. driving forces — pressure — state — impact — response (движущие факторы — нагрузки — состояние — воздействие — реакция).

Полученная графовая модель (когнитивная карта) биопродуктивности Цимлянского водохранилища представлена на рис. 1. При изображении ребер графа на рис. 1 пунктирная линия обозначает положительный эффект, сплошная — отрицательный. Слабое воздействие отражается единичной стрелкой, сильное — двойной.

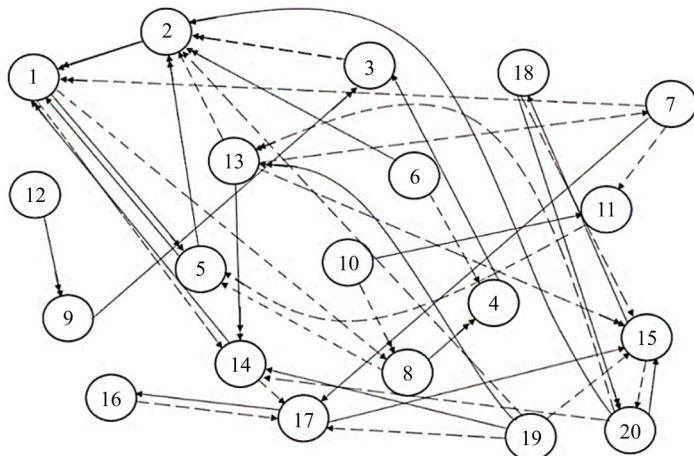


Рис. 1. Графовая модель биопродуктивности Цимлянского водохранилища

Матрица весов графовой модели получена на основе интегральной оценки экспертов мнений с учетом важности влияния каждого фактора (концепта). Эксперты — специалисты в таких областях, как гидробиология, экология водных экосистем, ихтиология, математическое моделирование, вычислительная математика, программирование и пр. При расчете весовых коэффициентов матрицы задействовали постоянно пополняемую информационную базу по гидробиологии и химии. Ее создали авторы в ходе многолетних экспедиционных исследований.

Кроме того, анализировались литературные источники, сведения, полученные при дистанционном зондировании Земли, а также данные:

- о гидробиохимии мелководных водоемов;
- о видовом составе ценных и промысловых рыб.

Далее при анализе влияния тех или иных факторов на продуктивность Цимлянского водохранилища для слабого воздействия (одиночная стрелка) весовой коэффициент составит $\pm 0,5$, а для сильного воздействия (двойная стрелка) — ± 1 .

Результаты исследования. Для численной реализации описанной графовой модели продуктивности Цимлянского водохранилища разработан программный комплекс на языке Python. Он позволяет задействовать и отдельные подграфы, и полную когнитивную карту биопродуктивности Цимлянского водохранилища (рис. 1). Так можно точнее описать процессы, влияющие на экосистему водоема.

Ниже перечислены основные шаги алгоритма реализации графовой модели продуктивности Цимлянского водохранилища.

Шаг 1. Определение множества вершин графа путем выбора рассматриваемых вершин графовой модели (рис. 1). Задание временного промежутка моделирования N (в годах) и номера временного слоя $n = 1$.

Шаг 2. Задание для построенной графовой модели начального вектора веса вершин (факторов):

$$X_{n-1} = \{x_{i(n-1)}\}_{i=1}^k,$$

где k — количество рассматриваемых вершин (факторов).

Шаг 3. Задание матрицы связей (вес ребер графа) U_n , полученной на основе экспертных мнений, для текущего временного слоя n . Для слабого воздействия — $\pm 0,5$, для сильного — ± 1 , при отсутствии воздействия — 0.

Шаг 4. Задание вектора внешних импульсов $Q_{n-1} = \{q_{i(n-1)}\}_{i=1}^k$ для текущего временного слоя n .

Шаг 5. Вычисление вектора импульса R_n для текущего временного слоя n [18]:

$$R_n = X_n - X_{n-1}, \quad n = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Шаг 6. Пересчет вектора веса вершин (факторов) для текущего временного слоя n [18]:

$$X_n = X_{n-1} + UR_{n-1} + Q_{n-1}. \quad (2)$$

Шаг 7. Если $n < N$, то переход к шагу 5. Иначе — завершение работы и построение графика.

С учетом выражения (2) формулу (1) можно представить так:

$$R_n = UR_{n-1} + Q_{n-1},$$

или

$$R_1 = Q_0, \quad R_2 = U^1 Q_0 + EQ_1, \dots, \quad R_n = \sum_{k=1}^{n-1} U^k Q_{n-k-1} + EQ_{n-1}. \quad (3)$$

Полагаем, что возможны несколько сценариев повышения продуктивности Цимлянского водохранилища. В первом рассмотрим избавление водохранилища от инвазивного вида — ракушки дрейссена — в случае проведения разовых очистительных мероприятий (только в первый год).

Сценарий 1. Итак, антропогенное влияние — очистка дна Цимлянского водохранилища от ракушки дрейссена в первый год.

В графовую модель для данного сценария включим следующие факторы (вершины) из полной модели (рис. 1): v_{15} — состояние вод Цимлянского водохранилища; v_{18} — изменение концентрации биогенных веществ (соединения азота, фосфора и кремния); v_{20} — антропогенное воздействие (очистка дна водохранилища от инвазивного вида — ракушки дрейссена).

На рис. 2 представлена графовая модель (подграф графа с рис. 1) данного сценария. Цветом выделен фактор, на который воздействует положительный внешний импульс.

Моделируется развитие ситуации в течение трех лет.

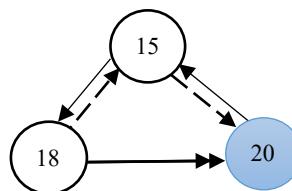


Рис. 2. Графовая модель для сценария 1

Зададим матрицу связей U для графовой модели (рис. 2):

$$U = \begin{pmatrix} 0 & -0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0 & -0,5 \\ \infty & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Зададим вектор внешних импульсов. Очистка происходит только в первый год, поэтому зададим положительный импульс (+1) в вершине v_{20} для Q_0 , а для остальных лет не будем задавать внешние импульсы:

$$Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad Q_1 = Q_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Вычислим импульсы R_n :

$$R_1 = Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_2 = UR_1 + Q_1 = \begin{pmatrix} 0,5 \\ -0,5 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_3 = UR_2 + Q_2 = \begin{pmatrix} 0,25 \\ 0,25 \\ 0,5 \end{pmatrix}.$$

На рис. 3 представлены результаты изменения импульсов R_n для факторов состояния воды (v_{15}) и изменения концентрации биогенных веществ (v_{18}).

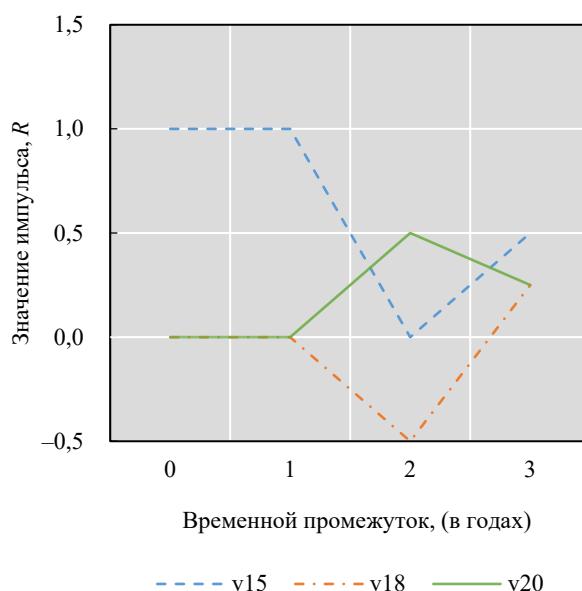


Рис. 3. Результаты моделирования для сценария 1

Сценарий 2. Рассмотрим антропогенное влияние — ежегодную очистку дна Цимлянского водохранилища от дрейссены в течение трех лет.

Когнитивная карта данного сценария также описывается рис. 3. Матрица связей U — как в сценарии 1.

Зададим вектор внешних импульсов (+1) в вершине v_{20} в каждый год моделирования:

$$Q_0 = Q_1 = Q_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Вычислим импульсы R_n :

$$R_1 = Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_2 = UR_1 + Q_1 = \begin{pmatrix} 0,5 \\ -0,5 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_3 = UR_2 + Q_2 = \begin{pmatrix} 0,75 \\ -0,25 \\ 1,5 \end{pmatrix}.$$

На рис. 4 представлены результаты изменения импульсов R_n для рассмотренных трех факторов с течением времени.

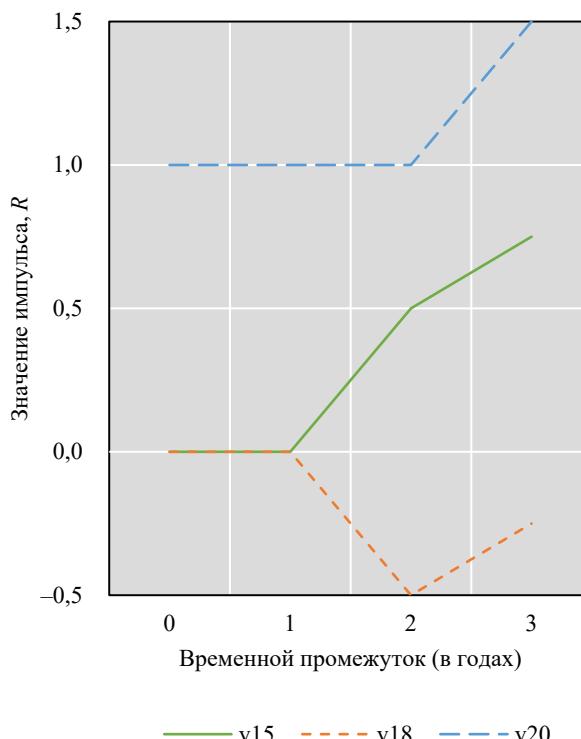


Рис. 4. Результаты моделирования для сценария 2

Рассмотрим два сценария антропогенного влияния на удельную эффективность естественного воспроизводства промысловой рыбы (лещ) в Цимлянском водохранилище — в течение года и пяти лет.

Сценарий 3. Представим удельную эффективность естественного воспроизводства леща в Цимлянском водохранилище при внесении кормовых добавок для его питания в первый год.

В графовую модель включим следующие факторы (вершины): v_1 — состояние нерестовой части стада рыб; v_2 — годовое пополнение молоди; v_5 — удельная эффективность естественного воспроизводства (подкорм рыбы); v_7 — уровень промысловой эксплуатации рыбных биоресурсов; v_{14} — эвтрофикация.

На рис. 5 представлена когнитивная карта данного сценария.

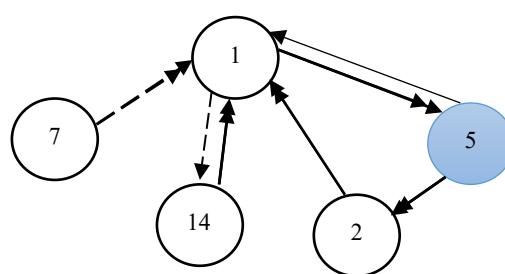


Рис. 5. Графовая модель для сценария 3

Моделируется динамика ситуации в течение пяти лет.

Зададим матрицу связей U , основанную на экспертичных мнениях:

$$U = \begin{pmatrix} 0 & \infty & -1 & \infty & 0,5 \\ -1 & 0 & \infty & \infty & \infty \\ -0,5 & -1 & 0 & \infty & \infty \\ 1 & \infty & \infty & 0 & \infty \\ -1 & \infty & \infty & \infty & 0 \end{pmatrix}.$$

Зададим вектор внешних импульсов. Кормовые добавки вносятся только в первый год, поэтому зададим положительный импульс (+1) в вершине v_5 для Q_0 . Для остальных лет не будем задавать внешние импульсы:

$$Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Вычислим импульсы R_n , $n \in \overline{1,5}$:

$$R_1 = Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_2 = UR_1 + Q_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_3 = UR_2 + Q_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0,5 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_4 = UR_3 + Q_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_5 = UR_4 + Q_4 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

На рис. 6 показано, как с течением времени менялись импульсы R_n для рассмотренных факторов.

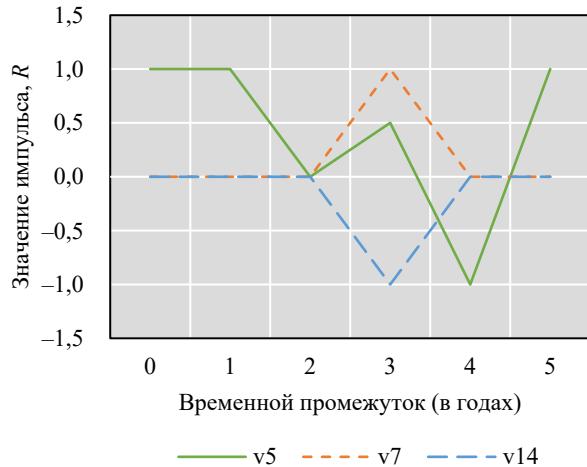
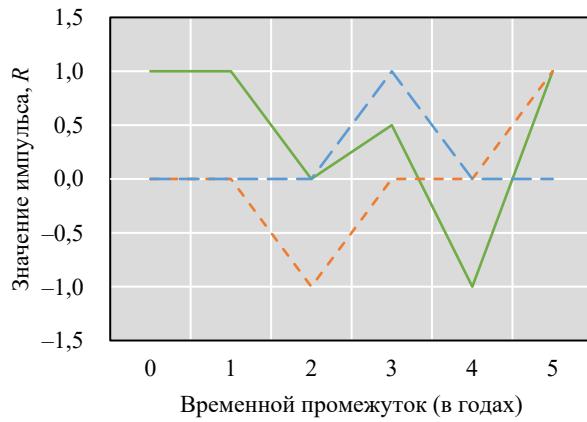


Рис. 6. Результаты моделирования для сценария 3

Сценарий 4. Рассмотрим удельную эффективность естественного воспроизведения промыслового леща в Цимлянском водохранилище при ежегодном внесении кормовых добавок в течение 5 лет.

Когнитивная карта данного сценария также описывается рис. 6. Матрица связей U аналогична сценарию 3.

Зададим вектор внешних импульсов (+1) в вершине v_5 в каждый год моделирования:

$$Q_0 = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Вычислим импульсы $R_n, n \in \overline{1,5}$:

$$R_1 = Q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_2 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad R_3 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1,5 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_4 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 0,5 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad R_5 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0,5 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

На рис. 7 представлены результаты изменения импульсов R_n для рассмотренных факторов с течением времени.

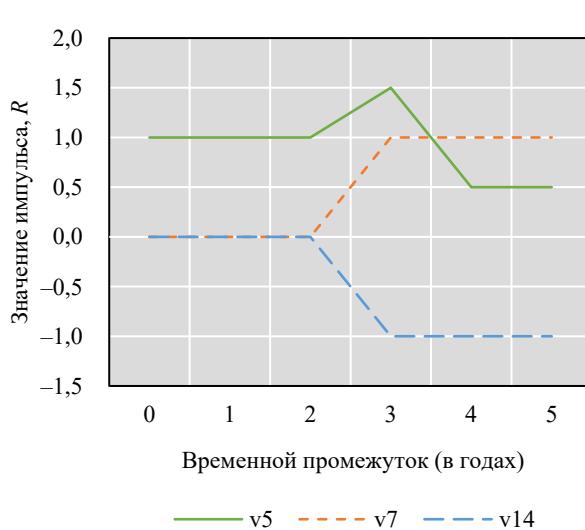
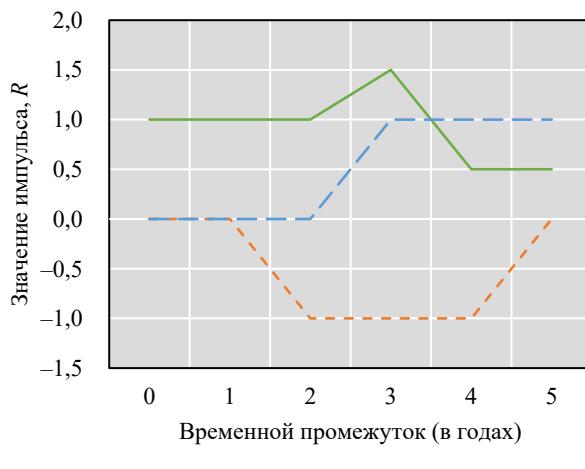


Рис. 7. Результаты моделирования сценария 4

Обсуждение. Итак, первые два сценария отражают влияние очистки дна водохранилища от инвазивного вида — ракушки дрейссена. В первом сценарии очистка проводится только в первый год, во втором — на протяжении всего периода моделирования (3 года). Сравнение результатов моделирования позволяет утверждать, что ежегодная очистка дна водохранилища от ракушки существенно улучшает состояние воды. Такое антропогенное воздействие позволяет сократить концентрацию загрязняющих биогенных веществ (соединения азота, фосфора, кремния). В результате уменьшается эвтрофикация водоема, его зарастание водной растительностью и заболачивание, природное старение, повышается прозрачность вод. При единовременной очистке положительный эффект сохраняется не более года. Далее, со 2-го по 3-й год концентрация соединений азота, фосфора и кремния будет расти, если не возобновить очистку дна от дрейссены.

Визуализация результатов моделирования для второго сценария (рис. 4) показала, что ежегодная очистка дна Цимлянского водохранилища в течение трех лет значительно улучшает состояние вод Цимлянского водохранилища. Эффект лучше, чем в первом сценарии, так как импульс состояния вод Цимлянского водохранилища продолжает более интенсивно расти и в третий год. На третий год импульс в сценарии 2 (рис. 4) составляет 0,75, а в сценарии 1 (рис. 3) — 0,25. Как и в первом сценарии (рис. 3), концентрация биогенных веществ (рис. 4) падает в течение первого года. Во второй год показатель увеличивается, но не столь резко и значительно, как в первом сценарии, то есть при однократной очистке дна. Для второго сценария не наблюдается почти зеркального соответствия графиков антропогенного воздействия и концентрации биогенных веществ. Таким образом, ежегодная очистка дна водоема от дрейссены более эффективна для улучшения состояния воды и менее — для концентрации биогенных веществ.

Вторую пару сценариев составили для ихтиологических процессов искусственного водоема. Рассматривалось влияние подкормки рыб на состояние нерестовой части стада, годовое пополнение молоди, уровень промысловой эксплуатации рыбных биоресурсов и эвтрофикацию водохранилища. В первом случае подкормка вносится только в первый год моделирования, во втором — на протяжении всего периода моделирования (5 лет). Единоразовое внесение подкормки положительно влияет на рост поголовья молоди и уровень промысловой эксплуатации, позволяет сократить эвтрофикацию, однако не дает устойчивых результатов. Ежегодные мероприятия по подкормке рыб позволяют существенно увеличить поголовье молоди и сократить эвтрофикацию. Это ведет к росту промысла.

Согласно данным рис. 6, в течение первого года подкорм не увеличивает ни пополнение молоди, ни уровень промысловой эксплуатации, ни эвтрофикацию водоема. То есть можно говорить об отложенном эффекте. В течение второго года нерестовой рыбы становится больше, растут годовое пополнение молоди и промысловая эксплуатация. Из-за активного промысла в течение третьего года сокращаются объемы пополнения молоди. Это взаимосвязанные факторы, поэтому промысловая эксплуатация падает в это же время. Эвтрофикация водоема сокращается в течение второго года. Это можно объяснить так: возросшая популяция рыб быстрее съедает водоросли. Затем молоди становится меньше, нерестовая часть популяции не растет. Как следствие, рыба съедает меньше водорослей — и в 3-й год эвтрофикация снова увеличивается. На протяжении 4-го года не растут графики пополнения молоди, промысла и эвтрофикации. Улучшение состояния нерестовой части можно объяснить подрастанием молоди.

Из представленных на рис. 7 графиков видно, что состояние водоема изменится более существенно, если продлить подкорм на пять лет. В течение первых трех лет результаты совпадают с результатами сценария 3. Затем наблюдается значительное улучшение годового пополнения молоди и рост промысловой эксплуатации рыбных биоресурсов. При этом отсутствуют столь явные циклические процессы увеличения и снижения поголовья, как это отмечалось по результатам моделирования 6-го сценария. Ухудшение состояния нерестовой части стада рыб до 4-го года можно объяснить ростом промысловой эксплуатации. Затем, к 5-му году, ситуация улучшается — видимо, благодаря подросшей молоди. Растущее поголовье рыбы вносит больший вклад в очистку водоема, так как съедает больше растительности. Поэтому заметно сокращается эвтрофикация.

На рис. 6 и 7 для первого года совпадает импульс от подкормки рыбы, рассчитанный по формуле (1). Во второй год импульс в сценарии 3 (рис. 6) падает до 0. Сценарий 4 (рис. 7) отражает возобновление подкормки, поэтому импульс достигает 1, а затем растет из-за накопительного эффекта и влияния подкормки на сопутствующие факторы. Развитие этой ситуации ведет к тому, что молоди становится больше, ей нужно больше пищи, и подкормка уже не дает столь значительного импульса.

Для интерпретации результатов важно учесть, что, согласно формуле (1), снижение импульса (в случае его положительного значения) не противоречит увеличению значения соответствующего фактора. Таким образом, рис. 6 и 7 математически отражают исследуемые биологические процессы.

На основании полученных результатов можно судить о том, как обеспечить устойчивое экологическое развитие Цимлянского водохранилища. Для этого необходимы ежегодные плановые мероприятия по экологическому мониторингу и антропогенному воздействию (с обязательной оценкой экономической составляющей).

Заключение. Предложенная графовая модель включает 20 факторов (концептов), существенно влияющих на состояние вод и биопродуктивность Цимлянского водохранилища. Решение создавалось в условиях дефицита экспертной информации и редко обновляющейся базы индикаторов. Матрица весовых коэффициентов, соответствующая предложенной графовой модели, основана на экспертных оценках. Они могут быть субъективными и не окончательными (т.е. изменятся с течением времени). Кроме того, при агрегировании данных не исключены погрешности при оценке значений импульсов. В рамках выбранного сценарного подхода предложенная графовая модель позволяет учитывать новую информацию и оперативно, с минимальными вычислительными затратами анализировать эффективность планируемых мероприятий по улучшению экологического состояния водоема.

Итоги работы можно масштабировать, чтобы оценить экономический эффект и ущерб антропогенных воздействий на изучаемые водные экосистемы, которые в идеальном случае должны стремиться к гомеостазу.

Представленную модель можно совершенствовать за счет более тонкой настройки весовых коэффициентов, учета нелинейных и пороговых эффектов, а также других индикаторов.

Список литературы / References

1. Герасимов Ю.В., Малин М.И., Соломатин Ю.И., Косолапов Д.Б., Лазарева В.И., Сабитова Р.З. и др. Итоги комплексного исследования структуры и функционирования экосистем каскада волжских водохранилищ в 2017 г. В: *Тезисы докладов конференции «Экспедиционные исследования на научно-исследовательских судах ФАНО России и архипелаге Шпицберген в 2017 г.»* Севастополь: ФГБУН МГИ РАН; 2018. С. 178–187.
- Gerasimov YuV, Malin MI, Solomatin YuiI, Kosolapov DB, Lazareva VI, Sabitova RZ, et al. Results of a Comprehensive Study of the Structure and Functioning of Ecosystems of the Volga Reservoir Cascade in 2017. In: *Proceedings of the Conference “Expeditionary Research on Research Vessels of the Federal Agency for Scientific Organizations of Russia and the Spitsbergen Archipelago in 2017”*. Sevastopol: Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences; 2018. P. 178–187. (In Russ.)
2. Белова Ю.В., Никитина А.В. Применение методов усвоения данных наблюдений для моделирования распространения загрязняющих веществ в водоеме и управления устойчивым развитием. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(3):39–48. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-39-48>
- Belova YuV, Nikitina AV. Application of Methods of Observational Data Assimilation to Model the Spread of Pollutants in a Reservoir and Manage Sustainable Development. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(3):39–48. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-39-48>
3. Wantzen KM, Rothhaupt K-O, Mörtl M, Cantonati M, G.-Tóth L, Fischer P. Ecological Effects of Water-Level Fluctuations in Lakes. *Hydrobiologia*. 2008;613:1–4. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9466-1>
4. Минина Л.М., Минин А.Е., Моисеев А.В. Влияние динамики уровней воды в весенний период на площадь нерестилищ и эффективность естественного воспроизводства лимнофильных видов рыб Чебоксарского водохранилища. *Труды ВНИРО*. 2021;185:84–93. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-185-84-93>
- Minina LM, Minin AE, Moiseev AV. Influence of the Dynamics of Water Levels in Spring on the Area Spawning Grounds and Efficiency of Natural Reproduction Limnophilic Fish Species of the Cheboksary Reservoir. *Trudy VNIRO*. 2021;185:84–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-185-84-93>
5. Logez M, Roy R, Tissot L, Argillier C. Effects of Water-Level Fluctuations on the Environmental Characteristics and Fish-Environment Relationships in the Littoral Zone of a Reservoir. *Fundamental and Applied Limnology*. 2016;189(1):37–49. <https://doi.org/10.1127/fal/2016/0963>
6. Белова Ю.В., Рахимбаева Е.О., Литвинов В.Н., Чистяков А.Е., Никитина А.В., Атаян А.М. Изучение качественных закономерностей процессаeutрофирования мелководного водоема на основе математической модели биологической кинетики. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование*. 2023;16(2):14–27. <https://doi.org/10.14529/mmp230202>
- Belova YuV, Rahimbaeva EO, Litvinov VN, Chistyakov AE, Nikitina AV, Atayan AM. The Qualitative Regularities of the Eutrophication Process of a Shallow Water Research Based on a Biological Kinetics Mathematical Model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2023;16(2):14–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/mmp230202>
7. Moiseenko TI. Aquatic Ecotoxicology: Theoretical Principles and Practical Application. *Water Resources*. 2008;35(5):530–541. <https://doi.org/10.1134/S0097807808050047>
8. Шибаев С.В. *Промысловая ихтиология*. Санкт-Петербург: Проспект Науки; 2024. 399 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/79996.html> (дата обращения: 30.08.2025).
- Shibaev SV. *Commercial Ichthyology*. Saint Petersburg: Prospekt Nauki; 2024. 399 p. (In Russ.) URL: <https://www.iprbookshop.ru/79996.html> (accessed: 30.08.2025).
9. Strayer DL. Alien Species in Fresh Waters: Ecological Effects, Interactions with Other Stressors, and Prospects for the Future. *Freshwater Biology*. 2010;55:152–174. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02380.x>
10. Алимов А.Ф., Богутская Н.Г. *Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах*. Монография. Москва: Общество с ограниченной ответственностью Товарищество научных изданий КМК; 2004. 436 с.
- Alimov AF, Bogutskaya NG. *Biological Invasions in Aquatic and Terrestrial Ecosystems*. Monograph. Moscow: Limited Liability Company Scientific Publications Partnership KMK; 2004. 436 p. (In Russ.)
11. Звягинцев А.Ю., Гук Ю.Г. Оценка экологических рисков, возникающих в результате биоинвазий в морские прибрежные экосистемы Приморского края (на примере морского обрастания и балластных вод). *Известия ТИНРО*. 2006;145:3–38.

- Zviagintsev AYu, Guk YuG. Estimation of Ecological Risk Arising from Bioinvasion in Marine Coastal Ecosystems of Primorye Region (with Sea Fouling and Ballast Waters as an Example). *Izvestya TINRO*. 2006;145:3–38. (In Russ.)
12. Лазарева В.И., Сабитова Р.З. Зоопланктон Цимлянского водохранилища и канала Волга-Дон. *Зоологический журнал*. 2021;100(6):603–617. <https://doi.org/10.31857/S0044513421040115>
- Lazareva VI, Sabitova RZ. Zooplankton of the Tsimlyansk Reservoir and Volga–Don Shipping Canal. *Zoologicheskii Zhurnal*. 2021;100(6):603–617. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0044513421040115>
13. Persson L, De Roos AM, Claessen D, Byström P, Lövgren J, Sjögren S, et al. Gigantic Cannibals Driving a Whole-Lake Trophic Cascade. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2003;100(7):4035–4039. <https://doi.org/10.1073/pnas.0636404100>
14. Sukhinov AI, Chistyakov AE, Belova YV, Nikitina AV, Sumbaev VV, Semenyakina AA. Supercomputer Modeling of Hydrochemical Condition of Shallow Waters in Summer Taking into Account the Influence of the Environment. *Communications in Computer and Information Science*. 2018;910:336–351. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99673-8_24
15. Williams RJ, Martinez ND. Simple Rules Yield Complex Food Webs. *Nature*. 2000;404:180–183. <https://doi.org/10.1038/35004572>
16. Urban D, Keitt T. Landscape Connectivity: A Graph-Theoretic Perspective. *Ecology*. 2001;82(5):1205–1218. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[1205:LCAGTP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[1205:LCAGTP]2.0.CO;2)
17. Dambacher JM, Hang-Kwang Luh, Hiram W Li, Rossignol PA. Qualitative Stability and Ambiguity in Model Ecosystems. *The American Naturalist*. 2003;161(6):876–888. <https://doi.org/10.1086/367590>
18. Переварюха А.Ю. Графовая модель взаимодействия антропогенных и биотических факторов в продуктивности Каспийского моря. *Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия*. 2015;21(10):181–198. <https://doi.org/10.18287/2541-7525-2015-21-10-181-198>
- Perevaryukha AYu. Graph Model of Interaction of Anthropogenic and Biotic Factors for Productivity of the Caspian Sea. *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*. 2015;21(10):181–198. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2541-7525-2015-21-10-181-198>
19. Голоколенова Т.Б. Динамика фитоценоза Верхнего плеса Цимлянского водохранилища. В: *Труды XVII Международной научно-практической конференции «Проблемы устойчивого развития и эколого-экономической безопасности регионов», Волжский, 27–28 апреля 2023 г.* Волгоград: Сфера; 2023. С. 145–149.
- Golokolenova TB. Dynamics of the Phytocenosis of the Upper Reach of the Tsimlyansk Reservoir. In: *Proceedings of the XVII International Scientific-Practical Conference “Problems of Sustainable Development and Ecological and Economic Security of Regions”, Volzhsky, April 27–28, 2023*. Volgograd: Sfera; 2023. P. 145–149. (In Russ.)
20. Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С., Калужная И.Ю., Сиротина С.Л., Самотеева В.В., Ракшенко Е.П. Динамика зарастания Цимлянского водохранилища. *Принципы экологии*. 2018;(1):60–72. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2018.7202>
- Kochetkova AI, Bryzgalina ES, Kaluzhnaya IY, Sirotnina SL, Samoteyeva VV, Rakshenko EP. Overgrowth Dynamics of the Tsimlyanskoe Reservoir. *Principles of the Ecology*. 2018;1:60–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.15393/j1.art.2018.7202>
21. Чистяков А.Е., Кузнецова И.Ю. Оценка экологических рисков мелководного водоема при проведении дноуглубительных работ. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;9(2):37–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46>
- Chistyakov AE, Kuznetsova IYu. Assessment of Environmental Risks of a Shallow Water Body during Dredging Works. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;2:37–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46>
22. Дудкин С.И., Леонтьев С.Ю., Мирзоян А.В. Состояние запасов и уловов промысловых видов рыб Азовского и Черного морей за период 2000–2020 гг.: динамика и тенденции. *Труды ВНИРО*. 2024;195:35–44. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-35-44>
- Dudkin SI, Leontiev SYu, Mirzoyan AV. The State of Stocks and Catches of Commercial Fish Species of the Azov and Black Seas for the Period 2000–2020: Dynamics and Trends. *Trudy VNIRO*. 2024;195:35–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-35-44>
23. Heinle A, Slawig T. Internal Dynamics of NPZD Type Ecosystem Models. *Ecological Modelling*. 2013;254:33–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.01.012>
24. Литвинов В.Н., Чистяков А.Е., Никитина А.В., Атаян А.М., Кузнецова И.Ю. Математическое моделирование гидродинамических процессов Азовского моря на многопроцессорной вычислительной системе. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2024;16(3):647–672. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-3-647-672>
- Litvinov VN, Chistyakov AE, Nikitina AV, Atayan AM, Kuznetsova IY. Mathematical Modeling of Hydrodynamics Problems of the Azov Sea on a Multiprocessor Computer System. *Computer Research and Modeling*. 2024;16(3):647–672. (In Russ.) <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-3-647-672>

25. Ревуцкая О.Л., Фрисман Е.Я. Промысловое воздействие на динамику популяции с возрастной и половой структурой: оптимальный равновесный промысел и эффект гидры. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2022;14(5):1107–1130. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-5-1107-1130>

Revutskaya OL, Frisman EY. Harvesting Impact on Population Dynamics with Age and Sex Structure: Optimal Harvesting and the Hydra Effect. *Computer Research and Modeling*. 2022;14(5):1107–1130. (In Russ.) <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-5-1107-1130>

26. Абакумов А.И., Израильский Ю.Г. Эффекты промыслового воздействия на рыбную популяцию. *Математическая биология и биоинформатика*. 2016;11(2):191–204. <https://doi.org/10.17537/2016.11.191>

Abakumov AI, Izrailsky YuG. The Harvesting Effect on a Fish Population. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 2016;11(2):191–204. (In Russ.) <https://doi.org/10.17537/2016.11.191>

Об авторах:

Инна Юрьевна Кузнецова, старший преподаватель кафедры «Математика и информатика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), mail@kuznetsova-i-yu.ru

Алла Валерьевна Никитина, доктор технических наук, профессор кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), nikitina.vm@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

И.Ю. Кузнецова: написание черновика рукописи, разработка программного обеспечения, визуализация, написание рукописи — внесение замечаний и исправлений.

А.В. Никитина: разработка концепции, научное руководство, написание рукописи — внесение замечаний и исправлений.

Конфликт интересов, авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Inna Yu. Kuznetsova, Senior Lecturer of the Department of Mathematics and Computer Science, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), mail@kuznetsova-i-yu.ru

Alla V. Nikitina, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Computer Engineering and Automated Systems Software, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), nikitina.vm@gmail.com

Claimed Contributorship:

IYu Kuznetsova: writing – original draft preparation, software, visualization, writing – review & editing.

AV Nikitina: conceptualization, supervision, writing – review & editing.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 22.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 17.10.2025

Принята к публикации / Accepted 26.10.2025