

Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 2 (52). Март, 2024

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugotek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





Содержание № 2. 2024

От редакции

Тема «Экология»

3

Оригинальные исследования

- Гаврилко Д. Е. *Сезонная сукцессия сообществ зоопланктона зарослей макрофитов малой реки (на примере р. Левинки г. Нижнего Новгорода)* 4 – 17
- Кузьмина А. М. *Влияние условий произрастания на активность аскорбинатоксидазы и полифенолоксидазы в листьях древесных растений* 18 – 27
- Кутявина Т. И. *Пигментные характеристики фитопланктона Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ* 28 – 39
- Лазарева Г. А.,
Потютко О. М. *Эколого-флористическая характеристика фитопланктона в контактной зоне на каскаде Волжских водохранилищ* 40 – 58
- Пристова Т. А. *Запасы органического вещества и углерода в подземной фитомассе среднетаежных листовенных фитоценозов* 59 – 71
- Ракитин Т. Д. *Принципы ландшафтно-биономического районирования береговой зоны и шельфа на примере северо-западной части Японского моря* 72 – 85
- Романова Е. Б.,
Столярова И. А.,
Бакиев А. Г.,
Горелов Р. А. *Среднеазиатская черепаха *Testudo horsfieldii* gray, 1844 (*Reptilia: Testudinidae*): адаптивные реакции крови* 86 – 93
- Сивков Ю. В.,
Никифоров А. С. *Снижение фитотоксичности нефтезагрязненных торфяных почв за счет применения восстановительных комплексов на основе поверхностно-активных веществ* 94 – 103
- Вести**
- Розенберг Г. С.,
Хасаев Г. Р. *Юбилей Сергея Андреевича Остроумова (к 75-летию со дня рождения)* 104 – 106



Выпуск № 2

От редакции

Тема «Экология»

Уважаемые читатели, авторы и рецензенты!

В последнее время к нам поступил ряд статей, тематика которых очень косвенно относится к экологии. Их авторы, видимо, полагали, что экология изучает любые явления или изменения в природной среде. Возможно, это были очень хорошие статьи в своей области (утилизации и сортировки отходов, технологии изменения объема сточных вод, процессов разрушения природных объектов и пр.). Тем не менее мы не могли их принять, поскольку наш журнал посвящен вопросам в основном биологической экологии, ориентирован на выявление закономерностей реакции организмов на биотическую и абиотическую среду обитания. Эту тематику определяют специальности членов редколлегии, а также направления, зарегистрированные в ВАКе, – Экология, Зоология, Гидробиология. В любой статье должны рассматриваться реакции биоты, причем доказанные с помощью статистических методов. Об этом сказано на первой странице нашего сайта. Просим авторов внимательнее определять тематику своей рукописи. В любом случае перед загрузкой статьи на сайт можно проконсультироваться с нами о соответствии материала направленности нашего журнала.

Обращаем внимание авторов на необходимость указания DOI для источников литературы. Эта просьба исходит от РИНЦ, что позволяет эффективнее анализировать публикационную активность авторов и журналов. Со своей стороны мы просим авторов по возможности указывать и URL-ссылки на ресурсы Интернета, которые предоставляют доступ к полным текстам цитированных документов. Так читатели получают возможность полнее освоить тему исследований, представленную в статье.

*С неизменной готовностью к сотрудничеству,
редколлегия электронного журнала «Принципы экологии»*



УДК 574.583

СЕЗОННАЯ СУКЦЕССИЯ СООБЩЕСТВ ЗООПЛАНКТОНА ЗАРОСЛЕЙ МАКРОФИТОВ МАЛОЙ РЕКИ (НА ПРИМЕРЕ Р. ЛЕВИНКИ Г. НИЖНЕГО НОВГОРОДА)

ГАВРИЛКО
Дмитрий Евгеньевич

кандидат биологических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, dima_gavrilk@mail.ru

Ключевые слова:

коловратки
ракообразные
видовая структура
видовое разнообразие
планктонные комплексы
анализ избыточности

Аннотация: Сезонная сукцессия сообществ зоопланктона зарослей макрофитов малых рек до сих пор остается малоизученной. В работе дана характеристика сезонной сукцессии как изменения во времени видовой структуры зоопланктоценозов разнотипных зарослей макрофитов малой реки Левинки (г. Нижний Новгород) и анализ влияния на нее факторов среды. На основе иерархической кластеризации в исследуемых биотопах были выделены планктонные комплексы. Показаны различия в структуре планктонных комплексов в разнотипных зарослях макрофитов. В зарослях погруженных макрофитов формировался наиболее долгоживущий планктонный комплекс. В зарослях растений одной экологической группы в течение летнего сезона выделялись сходные по видовой структуре зоопланктонные комплексы с доминированием *Sida crystallina* (O. F. Müller, 1776). Наиболее значительные перестройки видовой структуры сообществ зоопланктона в зарослях происходили в июне и октябре. Выявлен циклический характер сезонной сукцессии сообществ зоопланктона зарослей макрофитов. Наибольшее влияние на ход сезонной сукцессии оказывали температура воды и проективное покрытие макрофитов. Впервые показано, что чужеродная коловратка *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) в зарослях макрофитов достигала массового развития в период отмирания растений. Выявлено, что индекс видового разнообразия Шеннона является отражением перестроек видовой структуры сообществ зоопланктона зарослей макрофитов малой реки.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 15 апреля 2024 года

Подписана к печати: 27 июня 2024 года

Введение

Экологическая сукцессия есть развитие биологических сообществ с течением времени в результате естественных или антропогенных изменений. Сукцессии продолжают играть центральную роль в современной экологической теории (Chang, Turner, 2019). Сукцессионные изменения сообществ в разной степени связаны с внешними и внутренними по отношению к сообществу факторами (Уиттекер, 1980). Сезонная сукцессия планктона считается предсказуемым и на-

правленным процессом и включает только ту смену видов, которая является результатом либо взаимодействий между самими организмами, либо влиянием хищничества и конкуренции (Sommer et al., 1986). Последовательность смены видов, понимаемая как сукцессионная смена популяций, вызывается ограничением ресурсов и межвидовой конкуренцией, а также хищничеством (Gliwicz, Pijanowska, 1989; Donet, Hoffman, 1995). Сезонная сукцессия зоопланктона в малых реках представляет собой цикличе-

скую сукцессию, пусковым механизмом которой служит весеннее половодье (Крылов, 2005). Сезонные воздействия окружающей среды являются основными драйверами наблюдаемых колебаний видов, изменяющими основные качественные характеристики циклической сукцессии (Benincà et al., 2015). Сезонная динамика сообществ зоопланктона зависит также от трофических взаимодействий (Romagnan et al., 2015; Kenitz et al., 2017) и характеристик среды обитания (например, состава и обилия макрофитов) (Fu et al., 2021).

В исследовании сукцессии водных экосистем часто отсутствуют критерии, по которым можно было бы определить сукцессионное состояние отдельных биоценозов. Биоценозы являются развивающимися системами, переходящими из одного качественного состояния в другое как под воздействием внешних факторов, так и под влиянием изменений взаимодействий между компонентами биоценоза. В водоемах и водотоках одним из ведущих внешних факторов, формирующих среду для зоопланктона, является высшая водная растительность (Зимбалевская и др., 1987). Последовательное уменьшение пространственной неоднородности макрофитов, а также абиотических переменных оказывает комбинированное влияние на структуру сообществ зоопланктона (Fu et al., 2021). Развитие зоопланктона в течение сезона тесно связано с развитием зарослей макрофитов (Kuczynska-Kirpen, 2003; Jeong et al., 2014). Изучение сезонной сукцессии зарослевых сообществ зоопланктона чаще проводят на озерах и водохранилищах (Столбунова, 2005; Бурмистрова, 2007; Маркачева, 2008; Палаш, 2010). Малые реки до сих пор остаются мало затронутыми в подобных исследованиях.

Большинство отечественных исследований по сезонной динамике зоопланктона сводится к выделению планктонных комплексов, под которыми понимают специфический видовой состав, приуроченный к какому-либо сезону года (Столбунова, 2006; Лазарева, 2010; Попов, Мухортова, 2016). Сезонную сукцессию рассматривают также как динамику численности и биомассы за вегетационный сезон (Черевичко, 2007; Зарубина, Ермолаева, 2014; Литвинова, Федяева, 2016). При этом часто не учитываются изменения видовой структуры сообществ зоопланктона, связанные с влиянием макрофитов. В ходе сезонной сукцессии, представляющей собой ежегодно повторяющийся

процесс сборки сообществ, можно изучить все основные внешние факторы и внутренние взаимодействия, формирующие сообщества (Sommer et al., 2012).

Целью работы была характеристика сезонной сукцессии как изменения во времени видовой структуры зоопланктоценозов разнотипных зарослей макрофитов малой реки Левинки и анализ влияния на нее факторов среды.

Материалы

Исследования зоопланктона были проведены в среднем течении р. Левинки, расположенной в г. Нижнем Новгороде. Отбор проб проводили с 26 мая по 10 октября 2018 г. с периодичностью две недели в пяти прибрежных биотопах с разнотипной растительностью и без нее, расположенных на однородном участке реки. Были выбраны заросли растений с плавающими на поверхности воды листьями (кубышка желтая *Nuphar lutea* (L.) Sm, рдест плавающий *Potamogeton natans* L.), гелофиты (манник большой *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb.), погруженные (пузырчатка обыкновенная *Utricularia vulgaris* L.), а также участок побережья, лишенный высшей водной растительности (чистая рипаль). В зарослях пузырчатки отбор проб начали проводить с 18 июня в связи с отсутствием или недостаточным развитием растений в предыдущие даты отбора проб. Обследованные биотопы располагались на расстоянии 20–500 м друг от друга. Скорость течения в зарослях макрофитов была крайне низкой и не превышала 0.05 м/с. Исследованный участок реки подвержен незначительной антропогенной нагрузке. В пределах акватории отсутствуют места точечных сбросов в воду. Отмечено превышение ПДК по железу и марганцу, что в целом является региональной особенностью водоемов и водотоков (Экологическое состояние..., 2005).

Методы

Пробы зоопланктона отбирали мерным ведром на глубине 0.5 м путем процеживания 50 литров воды через планктонную сеть (нейлоновое сито с ячейей 70 мкм) и фиксировали 40 % раствором формалина. Отбор проб проводили с 10:00 до 12:00 ч Московского времени. Обработку материала осуществляли общепринятыми методами (Методические рекомендации..., 1982). Идентификацию видов зоопланктона проводили с использованием определителей (Кутикова, 1970; Определитель..., 2010). Параллельно

с отбором проб проводили измерения ряда абиотических параметров среды. Прозрачность воды определяли по белому диску Секки. Температуру, активную реакцию среды (рН) и электропроводность воды измеряли мультипараметрическим зондом YSI Pro 1030. Также оценивали процент проективного покрытия растениями биотопа.

Доминирующие виды зоопланктона выявляли согласно индексу Палия – Ковнацки (Шитиков и др., 2003). Пробы зоопланктона классифицировали с помощью кластерного анализа на основе сходства видовой структуры, в качестве меры сходства использовали косинус угла между векторами проб в многомерном пространстве численностей видов (Шурганова и др., 2004; Шурганова, 2007). Кластерный анализ проводили на основе расчетов расстояния между группами проб (кластерами) методом средней связи (Якимов и др., 2016). Ординацию данных проводили с применением анализа избыточности (RDA) (Шитиков, Розенберг, 2013; Legendre & Legendre, 2012). Все расчеты проводились в среде R (R Core Team, 2015).

Результаты

В период исследований наблюдалось изменение рН воды р. Левинки от слабодиссоцированной до щелочной (6.20–8.60). Электропроводность изменялась в пределах 262–427 мкСм/см. Температура воды варьировала от 9.0 до 24.6 °С.

В зоопланктоне было идентифицировано 128 видов, из них 65 принадлежало коловраткам (Rotifera), 41 – ветвистоусым ракообразным (Cladocera), 22 – веслоногим ракообразным (Copepoda). Среди обнаруженных видов был найден трансконтинентальный вид-вселенец – коловратка североамериканского происхождения *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908).

Кластеризация проб с использованием многомерного векторного анализа позволила нам выделить в исследуемых биотопах планктонные комплексы. Под планктонным комплексом мы понимаем временной промежуток существования сообщества зоопланктона со сходной видовой структурой.

В зарослях кубышки желтой четко выделялось два зоопланктонных комплекса: раннелетний (конец мая – начало июня) и летне-осенний (середина августа – начало октября) (рис. 1). Высокая степень сходства видовой структуры в раннелетний период связана с доминированием в сообществе ветвистоусого рачка *Chydorus* cf. *sphaericus*

(O. F. Müller, 1785) и науплиальных стадий веслоногих ракообразных. С середины июня до конца июля видовая структура сообщества зоопланктона претерпевала изменения. Однако во все даты отбора в число доминантов входил крупный фитофильный ветвистоусый рачок *Sida crystallina* (O. F. Müller, 1776). Высокая степень доминирования этого рачка обуславливала сходство видовой структуры зоопланктоценозов в середине июня и конце июля. С середины августа до начала октября в зоопланктоне преобладали науплиальные и копепоидитные стадии веслоногих ракообразных. Также в число доминантов входили ветвистоусые ракообразные семейства Chydoridae, добывающие пищу с поверхности субстрата, – *Acroperus harpae* (Baird, 1834) и *C. sphaericus*. В начале октября в состав доминантов вошла чужеродная коловратка *K. bostoniensis*.

В зарослях рдеста плавающего на протяжении вегетационного сезона формировалось три зоопланктонных комплекса: раннелетний (конец мая – начало июня), летний (середина июня – начало июля) и летне-осенний (середина июля – середина сентября) (см. рис. 1). Раннелетний зоопланктонный комплекс характеризовался доминированием ветвистоусых ракообразных *C. cf. sphaericus* и *A. harpae*, а также копепоидитных стадий веслоногих рачков. С середины июня до начала июля в зоопланктоне на первый план выходил ветвистоусый рачок *S. crystallina*, который обуславливал формирование отдельного комплекса в этот период. К середине июля *S. crystallina* вошла в число субдоминантов, а ее место занял ветвистоусый рачок *Ceriodaphnia pulchella* Sars, 1862. Вместе с науплиальными и копепоидитными стадиями веслоногих ракообразных они формировали ядро доминирующих видов до середины сентября. В конце сезона произошли структурные перестройки в сообществе зоопланктона. Здесь на первое место вышли младшие возрастные стадии веслоногих рачков, *C. cf. sphaericus*, а также коловратка *K. bostoniensis*.

В зарослях манника большого в течение сезона четко формировалось три зоопланктонных комплекса: раннелетний (конец мая – начало июня), летний (середина июля – середина августа) и осенний (сентябрь – начало октября) (см. рис. 1). Перестройки видовой структуры наблюдались с середины июня до середины июля и в конце августа и были связаны со сменой доминантов в сообществе. Так, раннелетний комплекс

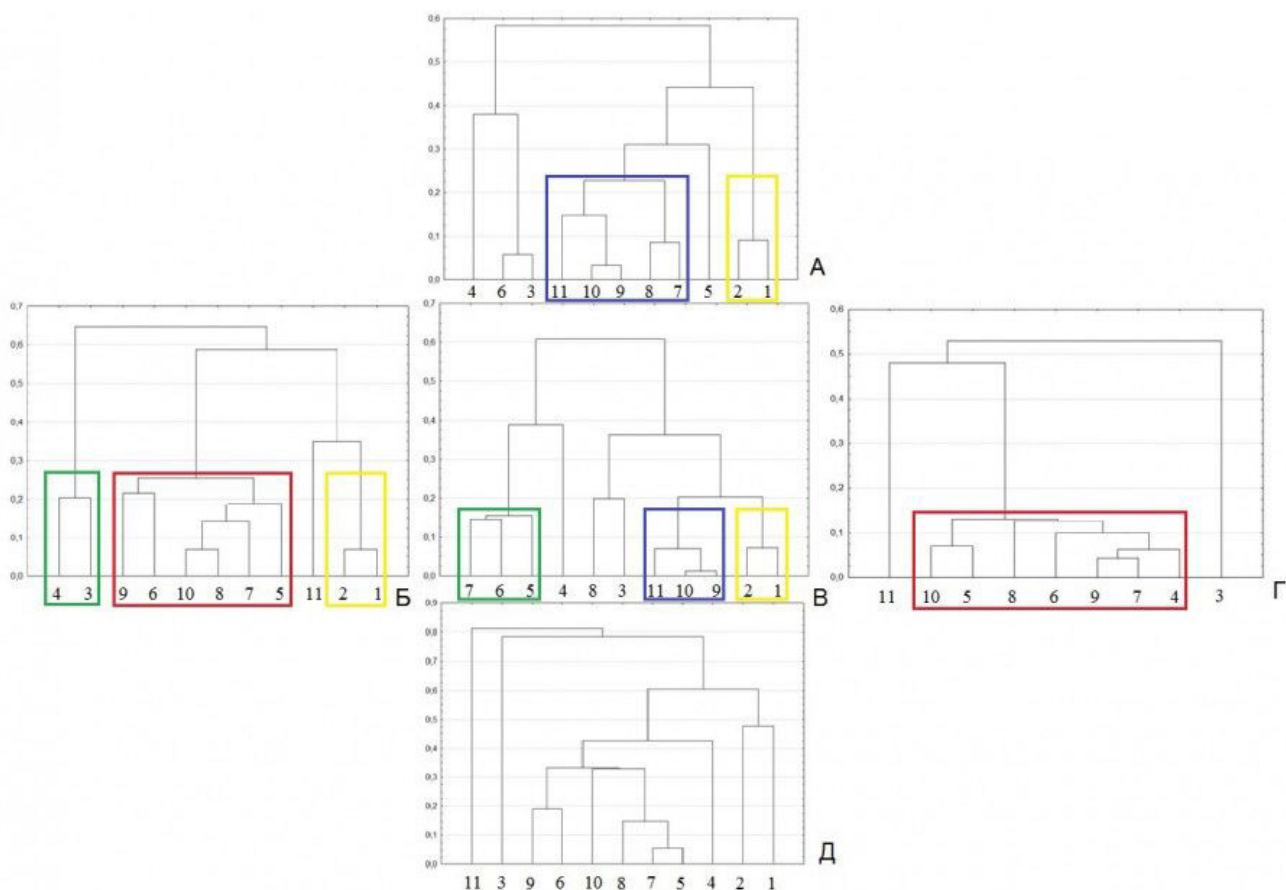


Рис. 1. Дендрограмма иерархической кластеризации проб зоопланктона биотопов р. Левинка на основе видовой структуры. По осям Y отложено расстояние объединения. По осям X отложены даты отбора проб: 1 – 26.05, 2 – 5.06, 3 – 18.06, 4 – 3.07, 5 – 16.07, 6 – 31.07, 7 – 14.08, 8 – 28.08, 9 – 11.09, 10 – 21.09, 11 – 10.10. Буквами обозначены исследованные биотопы: А – кубышка желтая, Б – рдест плавающий, В – манник большой, Г – пузырчатка обыкновенная, Д – чистая рипаль. Цветными линиями обведены отдельные планктонные комплексы: желтыми – раннелетний, зелеными – летний, красными – летне-осенний, синими – осенний

Fig. 1. Dendrogram of hierarchical clustering of zooplankton samples from biotopes of the Levinka River based on species structure. Y axes show the distance of association. X-axes show sampling dates: 1 – 26.05, 2 – 5.06, 3 – 18.06, 4 – 3.07, 5 – 16.07, 6 – 31.07, 7 – 14.08, 8 – 28.08, 9 – 11.09, 10 – 21.09, 11 – 10.10. The letters indicate the biotopes studied: A – *Nuphar lutea*, Б – *Potamogeton natans*, В – *Glyceria maxima*, Г – *Utricularia vulgaris*, Д – clean riparian. Coloured lines encircle separate plankton complexes: yellow – early summer, green – summer, red – summer-autumn, blue – autumn

формировали науплиальные и копеподитные стадии веслоногих ракообразных и ветвистоусый рачок *C. cf. sphaericus*. В середине июня в число доминантов вошел ветвистоусый рачок *Simocephalus vetulus* (O. F. Müller, 1776). Это обусловило обособление пробы на дендрограмме (см. рис. 1). В начале июля лидирующее место в числе доминантов занял ветвистоусый рачок *C. pulchella*. С середины июля до середины августа наблюдалось формирование зоопланктонного комплекса с преобладанием *Ceriodaphnia megops* Sars, 1862 и *C. pulchella*, а также науплиальных стадий *Sopropoda*. Осенний комплекс характеризовался высоким сходством видовой структуры и преобладанием в зо-

опланктоне науплиальных и копеподитных стадий веслоногих ракообразных.

В зарослях пузырчатки обыкновенной был выявлен зоопланктонный комплекс, существующий наиболее продолжительное время, с начала июля до конца сентября (см. рис. 1). В этот период лидирующее положение среди доминантов занимал ветвистоусый рачок *C. pulchella*. Также в число доминантов входили науплиальные и копеподитные стадии веслоногих ракообразных и *C. megops*. В середине июня и начале октября видовая структура сообществ зоопланктона существенно отличалась от летнего комплекса. В июне доминантом в планктоне являлась колониальная коловратка *Conochilus*

unicornis Rousset, 1892. В октябре лидирующее положение в сообществе приобрела коловратка *K. bostoniensis*. Также доминантами выступали науплиальные и копеподитные стадии веслоногих ракообразных.

В отличие от зарослей макрофитов в открытом прибрежье видовая структура сообщества зоопланктона претерпевала существенные изменения в течение вегетационного сезона. Только в августе формировался зоопланктонный комплекс с доминированием науплиальных и копеподитных стадий веслоногих ракообразных и ветвистоусого рачка *A. harpae* (см. рис. 1). В начале сезона в сообществе преобладали коловратки *Asplanchna priodonta* Gosse, 1850, *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851) и *K. quadrata* (O. F. Müller, 1786). В середине июня абсолютным доминантом стал ветвистоусый рачок *S. pulchella*. В начале июля в число доминан-

тов вошла коловратка *K. longispina*, а в конце июля – *Polyarthra major* Burckhardt, 1900. Наиболее существенные перестройки видовой структуры произошли в начале октября, когда лидирующее место в числе доминантов заняла коловратка *K. bostoniensis*.

Для установления влияния факторов среды на сезонную сукцессию сообществ зоопланктона была построена модель на основе анализа избыточности. Статистический анализ вспомогательных моделей, которые были построены для каждого отдельного фактора, показал, что значимым влиянием $p < 0.05$ обладали все факторы (табл. 1). Полная модель RDA объясняла 23.42 % ($p < 0.001$) от общей дисперсии видовой структуры сообществ зоопланктона. Статистически значимыми в модели были пять осей (табл. 2).

Таблица 1. Статистический анализ значимости объяснения изменчивости видовой структуры для каждого отдельного фактора

Фактор	Скорректированная доля объясняемой дисперсии, %	Значение критерия Фишера, F	p
Температура	9.17	6.25	0.001
Проективное покрытие растений	8.13	5.60	0.001
Прозрачность	5.04	3.76	0.001
Глубина	4.89	3.67	0.001
Электропроводность	4.66	3.54	0.001
pH	1.85	1.98	0.032

Таблица 2. Статистический анализ данных модели на основе анализа избыточности

Модель, ось	Скорректированная доля объясняемой дисперсии, %	Значение критерия Фишера, F	p
Полная модель	23.42	3.65	0.001
Ось I	9.65	9.03	0.001
Ось II	5.28	4.94	0.001
Ось III	3.54	3.31	0.001
Ось IV	2.29	2.15	0.015
Ось V	2.08	1.95	0.038

По результатам анализа избыточности построена ординационная диаграмма (рис. 2). Положение проб вдоль горизонтальной и вертикальной осей связано с сезонными изменениями видовой структуры сообществ зоопланктона.

В начале вегетационного сезона наблюдалось высокое сходство видовой структуры зарослевых биотопов, что обуславливалось близостью расположения станций на диаграмме. В этот период растения харак-

теризовались низкой степенью развития, а в планктоне преобладали представители семейства Chydoridae. Анализ диаграммы показывает, что пробы, собранные в июне и начале июля из зарослей кубышки и рдеста, тяготели к увеличению прозрачности воды. На эти даты приходился период «чистой воды», когда в планктоне развивался крупный фильтратор *S. crystallina*, тяготеющий к макрофитам с плавающими на поверхности воды листьями.

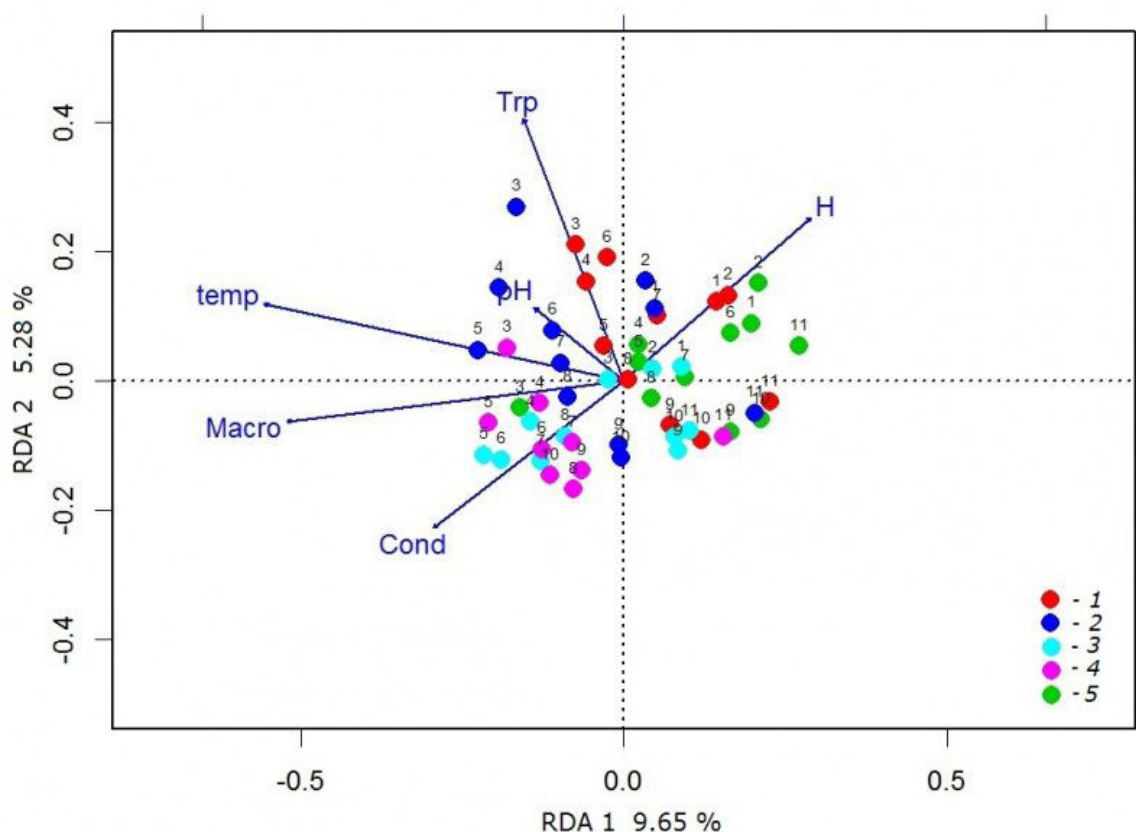


Рис. 2. Ординационная диаграмма, построенная по результатам анализа избыточности (RDA) для проб зоопланктона р. Левинка. Н – глубина, temp – температура, Cond – электропроводность, Trp – прозрачность, pH – водородный показатель, Macro – проективное покрытие макрофитов. Цифрами обозначены даты отбора проб: 1 – 26.05, 2 – 5.06, 3 – 18.06, 4 – 3.07, 5 – 16.07, 6 – 31.07, 7 – 14.08, 8 – 28.08, 9 – 11.09, 10 – 21.09, 11 – 10.10. Цветными точками обозначены биотопы: 1 – кубышка желтая, 2 – рдест плавающий, 3 – манник большой, 4 – пузырчатка обыкновенная, 5 – чистая рипаль

Fig. 2. Ordination diagram based on the results of redundancy analysis (RDA) for zooplankton samples of the Levinka River. H – depth, temp – temperature, Cond – conductivity, Trp – transparency, pH – acidity, Macro – plant cover by biotope. Numbers indicate the dates of sampling: 1 – 26.05, 2 – 5.06, 3 – 18.06, 4 – 3.07, 5 – 16.07, 6 – 31.07, 7 – 14.08, 8 – 28.08, 9 – 11.09, 10 – 21.09, 11 – 10.10. The coloured dots indicate biotopes: 1 – *Nuphar lutea*, 2 – *Potamogeton natans*, 3 – *Glyceria maxima*, 4 – *Utricularia vulgaris*, 5 – clean riparian

В сторону векторов температуры воды и проективного покрытия макрофитов расположилось большинство летних проб рдеста, манника и пузырчатки. С летним ростом температуры воды связано отрастание и формирование большой биомассы макрофитов, обеспечивающее пространственную неоднородность биотопов. В дальнейшем происходило накопление перифитона и детрита в зарослевых биотопах, что провоцировало рост минерализации воды (электропроводности). С этим связано расположение августовских проб зарослей рдеста, манника и пузырчатки и сентябрьских проб зарослей рдеста и пузырчатки.

Большинство сентябрьских проб и все октябрьские расположились в относительной близости друг от друга. Это свидетельствует о сходстве видовой структуры сообществ зо-

опланктона в разных биотопах. К осени наблюдалось снижение температуры воды и отмирание высшей водной растительности в биотопах, где формировались сходные условия для зоопланктона. В этот период, как и в мае, в планктоне преобладали ракообразные семейства Chydoridae, добывающие пищу с поверхности субстрата.

Летние пробы из открытого побережья были расположены наиболее далеко от зарослевых проб, что обусловлено различиями в составе доминантов.

Обсуждение

Во всех зарослевых биотопах в течение сезона наблюдалась последовательная смена доминирующих видов в сообществах, что обуславливало формирование планктонных комплексов. Ход сезонной сукцессии

зоопланктоценозов зарослей растений с плавающими листьями (кубышки и рдеста) имел сходные черты. В начале лета в обоих биотопах выделялись однородные по видовой структуре планктонные комплексы с доминированием ветвистоусого рачка *S. crystallina*. Его массовое развитие приурочено к периоду «чистой воды» и высокой плотности плавающих на поверхности воды листьев (Коровчинский, 1978; Столбунова, 2006; Кривенкова, 2018).

Зоопланктоценоз зарослей погруженно-го макрофита (пузырчатка) в летний период наиболее сильно отличался по видовой структуре от остальных зарослевых сообществ. Максимальное развитие пузырчатки приходилось на июль – август, что обуславливало долговременное существование планктонного комплекса. Большой объем погруженных растений в наибольшей степени формировал гетерогенность водного пространства и ограничивал зоопланктоценоз от влияния неблагоприятных факторов среды. Это позволяло сообществу зоопланктона длительное время сохранять консолидированную видовую структуру. Заполняя толщу воды плотной и сложной физической структурой, погруженные макрофиты обеспечи-

вают среду для множества организмов и оказывают глубокое влияние на взаимодействие видов (Lauridsen et al., 1996; Jeppensen et al., 1998; Scheffer, 2004).

В октябре для зарослей кубышки, рдеста, пузырчатки и открытого побережья было характерно доминирование чужеродной коловратки *K. bostoniensis*. В зарослях пузырчатки ее численность была максимальной среди всех биотопов (табл. 3). Во всех этих биотопах к октябрю проективное покрытие растений снизилось до минимальных за сезон значений или растение полностью исчезло из биотопа (кубышка желтая). Отмирание погруженных и плавающих растений приводило к накоплению детрита, что провоцировало развитие бактерий и гетеротрофных жгутиконосцев, потребителем которых является чужеродная коловратка (Starkweather, Bogdan, 1980; Arndt, 1993; Oliveira et al., 2019). В ряде водных объектов также отмечено массовое развитие *K. bostoniensis* в октябре (Orcutt, Pace, 1984; Иванова, Телеш, 2004). В зарослях манника, где к октябрю большая часть растений оставалась в вегетирующем состоянии, количественное развитие *K. bostoniensis* было низким (табл. 3).

Таблица 3. Количественное развитие *K. bostoniensis* в исследованных биотопах

Биотоп	Численность, тыс. экз./м ³		Доля от общей численности, %	
	31.07.2018	10.10.2018	31.07.2018	10.10.2018
Кубышка желтая	0.02	5.2	0.1	16.1
Рдест плавающий	0.02	3.0	0.006	11.7
Манник большой	-	0.14	-	0.37
Пузырчатка обыкновенная	-	12.8	-	25.3
Чистая рипаль	0.02	9.3	0.4	48.9

В гидроэкологии индекс видового разнообразия Шеннона стал общепринятым количественным критерием, позволяющим судить о стадиях развития сообществ (Зимбалевская, 1981; Алимов, 1982). В исследованиях зарослевого зоопланктона Днепровских водохранилищ (Зимбалевская, 1981) показано, что индекс Шеннона изменяется в течение сезона, нарастая до максимального уровня к осени. Высокие значения этого индекса используются как характеристики зрелости (климаксности) сообществ.

Анализ динамики индекса видового разнообразия Шеннона сообществ зоопланктона зарослей макрофитов показал, что наибольшие его колебания наблюдались в период перестройки видовой структуры и смены сезонных комплексов

зоопланктона (рис. 3). Во всех зарослях макрофитов происходило снижение значения индекса при смене раннелетнего и летнего комплексов. В период начала существования планктонного комплекса происходит возрастание индекса Шеннона с дальнейшей стабилизацией при длительном существовании комплекса. В сентябре для всех зарослей характерно снижение индекса Шеннона, связанное с уменьшением числа видов в зоопланктоне. Однако к октябрю наблюдалось возрастание индекса, связанное с увеличением выравненности зоопланктона. В отличие от зарослей макрофитов, в зоопланктоне открытого побережья в осенний период наблюдалось снижение индекса видового разнообразия с минимальными значениями в октябре.

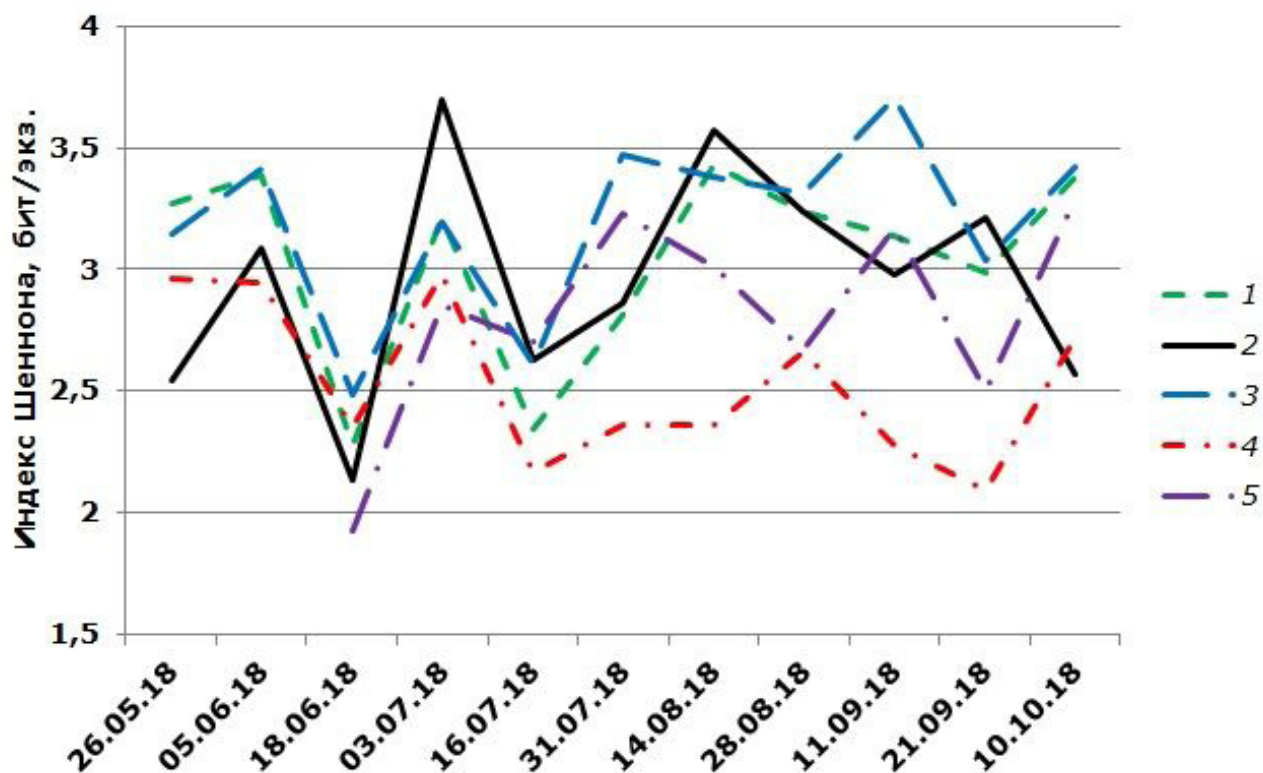


Рис. 3. Динамика индекса видового разнообразия Шеннона (бит/экз.), рассчитанного по численности зоопланктона зарослей макрофитов р. Левинки. Цветными линиями обозначены исследованные биотопы: 1 – кубышка желтая, 2 – чистая рипаль, 3 – рдест плавающий, 4 – манник большой, 5 – пузырчатка обыкновенная

Fig. 3. Dynamics of the Shannon species diversity index (bits/ind.) calculated from zooplankton abundance in macrophyte thickets of the Levinka River. The coloured lines indicate the studied biotopes: 1 – *Nuphar lutea*, 2 – pure riparian, 3 – *Potamogeton natans*, 4 – *Glyceria maxima*, 5 – *Utricularia vulgaris*

Таким образом, индекс видового разнообразия Шеннона отражает перестройки видовой структуры сообществ зоопланктона зарослей макрофитов. Высокие значения индекса наблюдаются в разные сезоны года, что свидетельствует о невозможности использования его как показателя зрелости зоопланктоценозов зарослей макрофитов малой реки при исследовании сезонной сукцессии.

Проведенный анализ показал, что ход сезонной сукцессии сообществ зоопланктона был обусловлен преимущественно изменениями температуры, прозрачности воды и проективного покрытия макрофитов. В начале и в конце вегетационного сезона в разнотипных зарослевых биотопах наблюдался сходный состав доминантов зоопланктоценозов. При этом в октябре в доминирующий комплекс большинства зарослей вошла коловратка *K. bostoniensis*. Накопление детрита при отмирании растений к осени обуславливало развитие в планктоне вторичных фильтраторов (*C. cf. sphaericus*) и собирателей (копеподиты). Преобладание этих таксонов

в начале сезона связано с собиранием пищи с поверхности субстрата (неразложившихся остатков прошлогодних растений). Таким образом, смена зоопланктонных комплексов зарослей макрофитов в малой реке представляет собой циклическую сукцессию.

Заключение

Проведенные исследования показали, что изменение видовой структуры в ходе сезонной сукцессии сообществ зоопланктона зарослевых биотопов имеет циклический характер. Наибольшая гетерогенность видовой структуры наблюдалась летом и была обусловлена различиями в экологических группах макрофитов и плотности зарастания биотопа. В зарослях растений с плавающими листьями (кубышка, рдест) в течение летнего сезона выделялись сходные по видовой структуре зоопланктонные комплексы с доминированием *S. crystallina*.

Наиболее значительные перестройки видовой структуры сообществ зоопланктона в зарослях происходили в июне и октябре. Июньские были связаны с повышением температуры воды и ростом проективного по-

крытия растений, а октябрьские – с понижением температуры воды и отмиранием высшей водной растительности.

Впервые показано, что чужеродная коловратка *K. bostoniensis* в зарослях макрофитов достигала массового развития в период отмирания растений. Вероятно, это связано с благоприятной для нее пищевой базой.

Значения индекса видового разнообразия Шеннона являются отражением перестроек видовой структуры сообществ зоопланктона зарослей макрофитов малой реки. Смена планктонных комплексов сопровождается снижением, а в период существования комплексов – возрастанием индекса Шеннона.

Библиография

- Алимов А. Ф. Структурно-функциональный подход к изучению сообществ водных животных // Экология. 1982. № 3. С. 45–51.
- Бурмистрова О. С. Зоопланктон зарослей макрофитов Телецкого озера // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы III Международ. науч. конф. Минск – Нарочь. Минск: БГУ, 2007. С. 204–205.
- Зарубина Е. Ю., Ермолаева Н. И. Сезонная динамика макрофитов и зоопланктона литоральной зоны Новосибирского водохранилища в 2013 г. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 11. С. 216–220.
- Зимбалева Л. Н. Фитофильные беспозвоночные равнинных рек и водохранилищ. Киев: Наукова думка, 1981. 216 с.
- Зимбалева Л. Н., Плигин Ю. В., Хороших Л. А., Долинский В. Л., Сидоренко В. М., Левина О. В., Георгиевская Л. М., Ревенко И. Г., Гошовская Г. А., Козина С. Я., Емельянов Л. В., Левитская Н. А. Структура и сукцессии литоральных биоценозов днепровских водохранилищ. Киев: Наукова думка, 1987. 204 с.
- Иванова М. Б., Телеш И. В. Сезонная и межгодовая динамика планктонных коловраток и ракообразных // Закономерности гидробиологического режима водоемов разного типа / Под общ. ред. А. Ф. Алимова, М. Б. Ивановой. М.: Научный мир, 2004. С. 71–83.
- Коровчинский Н. М. Изменчивость *Sida crystallina* и *Diaphanosoma cf. brachyurum* (Crustacea, Cladocera) озера Глубокого // Зоологический журнал. 1978. Т. 57, № 9. С. 1330–1342.
- Кривенкова И. Ф. Значение фитофильного зоопланктона для экосистемы озера Кенон // Ученые записки Забайкальского государственного университета. 2018. Т. 13, № 1. С. 60–65.
- Крылов А. В. Зоопланктон равнинных малых рек. М.: Наука, 2005. 263 с.
- Кутикова Л. А. Коловратки фауны СССР. Л.: Наука, 1970. 742 с.
- Лазарева В. И. Структура и динамика зоопланктона Рыбинского водохранилища / Под ред. А. И. Копылова. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 183 с.
- Литвинова Н. В., Федяева Л. А. Влияние развития макрофитов в формировании структуры зоопланктона низовьев дельты р. Волги // Поволжский экологический журнал. 2018. № 4. С. 399–410.
- Макарцева Е. С. Функционирование зоопланктона в условиях интенсивного зарастания (на примере оз. Свиночное) // Водные экосистемы: трофические уровни и проблемы поддержания биоразнообразия: Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Водные и наземные экосистемы: проблемы и перспективы исследований». Вологда, 2008. С. 192–194.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах // Зоопланктон и его продукция. Л.: Гос. НИИ озер. и реч. рыб. хоз-ва, 1982. 33 с.
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / Под ред. В. Р. Алексеева, С. Я. Цалолыхина. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 495 с.
- Палаш А. Л. Сезонная изменчивость придонного зоопланктона в растительных биотопах озер разного типа // Экология водных беспозвоночных: Сборник материалов Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Ф. Д. Мордухай-Болтовского. ИБВВ РАН, Борок. Ярославль: Принтхаус, 2010. С. 217–218.
- Попов А. И., Мухортова О. В. Пелагический и литоральный зоопланктон Саратовского водохранилища: видовой состав, биологические инвазии, особенности формирования фауны / Отв. ред. Г. С. Розенберг. Тольятти: Кассандра, 2016. 158 с.
- Столбунова В. Н. Зоопланктоценозы прибрежных мелководий водохранилищ Верхней Волги // Биологические ресурсы пресных вод: беспозвоночные. Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский дом печати», 2005. С. 357–373.
- Столбунова В. Н. Зоопланктон озера Плещеево. М.: Наука, 2006. 152 с.
- Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. М.: Прогресс, 1980. 328 с.
- Черевичко А. В. Зоопланктон зарослей высшей водной растительности озера Полисто // Актуальные вопросы изучения микро-, мейзообентоса и фауны зарослей пресноводных водоемов:

- Тематические лекции и материалы I Международной школы-конференции. ИБВВ РАН, Борок. Н. Новгород: Вектор ТиС, 2007. С. 297–300.
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. Тольятти: Кассандра, 2013. 314 с.
- Шурганова Г. В., Черепенников В. В., Артельный Е. В. Динамика численности дискриминантных видов основных зоопланктоценозов Чебоксарского водохранилища // Поволжский экологический журнал. 2004. № 2. С. 200–209.
- Шурганова Г. В. Динамика видовой структуры зоопланктоценозов в процессе их формирования и развития (на примере водохранилищ средней Волги: Горьковского и Чебоксарского) : Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Н. Новгород, 2007. 48 с.
- Экологическое состояние водных объектов Нижнего Новгорода. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2005. 414 с.
- Якимов В. Н., Шурганова Г. В., Черепенников В. В., Кудрин И. А., Ильин М. Ю. Методы сравнительной оценки результатов кластерного анализа структуры гидробиоценозов (на примере зоопланктона реки Линда Нижегородской области) // Биология внутренних вод. 2016. № 2. С. 94–103.
- Arndt H. Rotifers as predators on components of the microbial web (bacteria, heterotrophic flagellates, ciliates)? A review // Hydrobiologia. 1993. Vol. 255–256. P. 231–246.
- Benincà E., Ballantine B., Ellner S. P., Huisman J. Species fluctuations sustained by a cyclic succession at the edge of chaos // PNAS. 2015. Vol. 112, № 20. P. 6389–6394.
- Chang C. C., Turner B. L. Ecological succession in a changing world // Journal of Ecology. 2019. Vol. 107. P. 503–509.
- Donet A., Hoffman L. Seasonal succession and spatial distribution of the zooplankton community in the reservoir of Esch-Sur-Sûre (Luxembourg) // Belg. J. Zool. 1995. Vol. 125, iss. 1. P. 109–123.
- Fu H., Özkan K., Yuan G., Johansson L.S., Søndergaard M., Lauridsen T. L., Jeppesen E. Abiotic and biotic drivers of temporal dynamics in the spatial heterogeneity of zooplankton communities across lakes in recovery from eutrophication // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 778. P. 146368.
- Gliwicz Z. M., Pijanowska J. The role of predation in zooplankton succession // Sommer U. (ed.). Plankton ecology: Succession in Plankton Communities. Brockj Springer series in contemporary bioscience. Springer-Verlag. Berlin, 1989. P. 253–296.
- Jeong K. S., Choi J. Y., Jeong Kw. S. Influence of aquatic macrophytes on the interactions among aquatic organisms in shallow wetlands (Upo Wetland, South Korea) // J. Ecol. Environ. 2014. Vol. 37 (4). P. 185–194.
- Jeppesen E., Lauridsen T. L., Kairesalo T., Perrow M. R. Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton interactions in lakes // The structuring role of submerged macrophytes in lakes / E. Jeppesen, M. Søndergaard, M. Søndergaard, K. Christoffersen (eds.). 1998. Ecol. Stud. Ser. 131. P. 91–114.
- Kenitz K. M., Visser A. W., Mariani P., Andersen K. H. Seasonal succession in zooplankton feeding traits reveals trophic trait coupling // Limnology and Oceanography. 2017. Vol. 62. P. 1184–1197.
- Kuczynska-Kippen N. The distribution of rotifers (Rotifera) within a single *Myriophyllum* bed // Hydrobiologia. 2003. Vol. 506–509. P. 327–331.
- Lauridsen T. L., Pedersen L. J., Jeppesen E., Søndergaard M. The importance of macrophyte bed size for cladoceran composition and horizontal migration in a shallow lake // Journal of Plankton Research. 1996. Vol. 18. P. 2283–2294.
- Legendre P., Legendre L. Numerical ecology. Oxford: Elsevier, 2012. 990 p.
- Oliveira F. R., Lansac-Tôha F. M., Meira B. R. et al. Effects of the exotic rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) on the microbial food web components // Aquatic Ecology. 2019. № 53. P. 581.
- Orcutt J. D., Pace M. L. Seasonal dynamics of rotifer and crustacean zooplankton populations in a eutrophic, monomictic lake with a note on rotifer sampling techniques // Hydrobiologia. 1984. Vol. 119 (1). P. 73–80.
- Romagnan J.-B., Legendre L., Guidi L., Jamet J.-L., Jamet D., Mousseau L. et al. Comprehensive Model of Annual Plankton Succession Based on the Whole-Plankton Time Series Approach // PLoS ONE. 2015. Vol. 10 (3). P. e0119219.
- Scheffer M. Ecology of Shallow Lakes. New York: Springer Science & Business Media, 2004. 457 p.
- Sommer U., Gliwicz Z. M., Lampert W., Duncan A. The PEG model of a seasonal succession of planktonic events in fresh waters // Arch. Hydrobiol. 1986. Vol. 106. P. 433.
- Sommer U., Adrian R., De Senerpont Domis L. et al. Beyond the Plankton Ecology Group (PEG) Model: Mechanisms driving plankton succession // Annu. Rev. Ecol. Evo. Syst. 2012. Vol. 43. P. 429.
- Starkweather P. L., Bogdan K. G. Detrital feeding in natural zooplankton communities: discrimination

between live and dead algal foods // Hydrobiologia. 1980. Vol. 73. P. 83–85.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. 2015. URL: <http://www.R-project.org> (дата обращения: 13.05.2024).

SEASONAL SUCCESSION OF ZOOPLANKTON COMMUNITIES IN MACROPHYTE THICKETS OF A SMALL RIVER (ON THE EXAMPLE OF THE LEVINKA RIVER, NIZHNY NOVGOROD)

GAVRILKO
Dmitriy Evgenievich

PhD, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, 603022, Nizhni Novgorod, Gagarin avenue, 23, dima_gavrilko@mail.ru

Keywords:
rotifera
crustacean
species structure
species diversity
plankton complex
redundancy analysis

Summary: Seasonal succession of zooplankton communities in macrophyte thickets of small rivers is still poorly studied. In this paper we characterize seasonal succession as a change in the species structure of zooplankton communities of different types of macrophyte thickets of the small river Levinka (Nizhny Novgorod) and analyze the influence of environmental factors on it. On the basis of hierarchical clustering, planktonic complexes were identified in the studied biotopes. Differences in the structure of planktonic complexes in different types of macrophyte thickets were shown. In thickets of submerged macrophytes, the most long-lived planktonic complexes were formed. In thickets of plants of the same ecological group, zooplankton complexes with *Sida crystallina* dominance were similar in species structure during the summer season. The most significant changes in the species structure of zooplankton communities in thickets occurred in June and October. The cyclic character of seasonal succession of zooplankton communities in macrophyte thickets was revealed. Water temperature and projective cover of macrophytes had the greatest influence on the course of seasonal succession. It was shown for the first time that the alien rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) reached mass development in macrophyte thickets during the period of plant die-off. It was revealed that the Shannon species diversity index reflects the restructuring of the species structure of zooplankton communities in macrophyte thickets of a small river.

Received on: 15 April 2024

Published on: 27 June 2024

References

- Alimov A. F. Structural-functional approach to the study of aquatic animal communities, *Ekologiya*. 1982. No. 3. C. 45–51.
- Arndt H. Rotifers as predators on components of the microbial web (bacteria, heterotrophic flagellates, ciliates)? A review, *Hydrobiologia*. 1993. Vol. 255–256. P. 231–246.
- Benincà E., Ballantine B., Ellner S. P., Huisman J. Species fluctuations sustained by a cyclic succession at the edge of chaos, *PNAS*. 2015. Vol. 112, No. 20. P. 6389–6394.
- Burmistrova O. S. Zooplankton of macrophyte thickets of Teletskoye Lake, Ozernye ekosistemy: biologicheskie processy, antropogennaya transformaciya, kachestvo vody: Materialy III Mezhdunar. nauch. konf. Minsk – Naroch'. Minsk: BGU, 2007. P. 204–205.
- Chang C. C., Turner B. L. Ecological succession in a changing world, *Journal of Ecology*. 2019. Vol. 107. P. 503–509.
- Cherevichko A. V. Zooplankton of thickets of higher aquatic vegetation of Lake Polisto, Aktual'nye voprosy izucheniya mikro-, mezozoobentosa i fauny zarosley presnovodnyh vodoemov: Tematicheskie lekci i materialy I Mezhdunarodnoy shkoly-konferencii. IBVV RAN, Borok. N. Novgorod: Vektor TiS, 2007. P. 297–300.
- Determinator of zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia. T. 1. Zooplankton, Pod red. V. R. Alekseeva, P. Ya. Calolihina. M.: Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2010. 495 p.
- Donet A., Hoffman L. Seasonal succession and spatial distribution of the zooplankton community in the reservoir of Esch-Sur-Sûre (Luxembourg), Belg. *J. Zool.* 1995. Vol. 125, iss. 1. P. 109–123.
- Ecological condition of water bodies of Nizhny Novgorod. N. Novgorod: Izd-vo NNGU, 2005. 414 p.
- Fu H., Özkan K., Yuan G., Johansson L.S., Søndergaard M., Lauridsen T. L., Jeppesen E. Abiotic and biotic drivers of temporal dynamics in the spatial heterogeneity of zooplankton communities across lakes in recovery from eutrophication, *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 778. P. 146368.
- Gliwicz Z. M., Pijanowska J. The role of predation in zooplankton succession, Sommer U. (ed.) *Plankton ecology: Succession in Plankton Communities*. Brockj Springer series in contemporary bioscience. Springer-Verlag. Berlin, 1989. P. 253–296.

- Ivanova M. B. Telesh I. V. Seasonal and interannual dynamics of planktonic rotifers and crustaceans, *Zakonomernosti gidrobiologicheskogo rezhima vodoemov raznogo tipa*, Pod obsch. red. A. F. Alimova, M. B. Ivanovoy. M.: Nauchnyy mir, 2004. P. 71–83.
- Jeong K. S., Choi J. Y., Jeong Kw. S. Influence of aquatic macrophytes on the interactions among aquatic organisms in shallow wetlands (Upo Wetland, South Korea), *J. Ecol. Environ.* 2014. Vol. 37 (4). P. 185–194.
- Jeppesen E., Lauridsen T. L., Kairesalo T., Perrow M. R. Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton interactions in lakes, *The structuring role of submerged macrophytes in lakes*, E. Jeppesen, M. Søndergaard, M. Søndergaard, K. Christoffersen (eds.). 1998. *Ecol. Stud. Ser.* 131. P. 91–114.
- Kenitz K. M., Visser A. W., Mariani P., Andersen K. H. Seasonal succession in zooplankton feeding traits reveals trophic traitcoupling, *Limnology and Oceanography*. 2017. Vol. 62. P. 1184–1197.
- Korovchinskiy N. M. Variability of *Sida crystallina* and *Diaphanosoma cf. brachyurum* (Crustacea, Cladocera) of Lake Gluboky, *Zoologicheskij zhurnal*. 1978. T. 57, No. 9. P. 1330–1342.
- Krivenkova I. F. Importance of phytophilic zooplankton for the ecosystem of Lake Kenon, *Uchenye zapiski Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018. T. 13, No. 1. P. 60–65.
- Krylov A. V. Zooplankton of lowland small rivers. M.: Nauka, 2005. 263 p.
- Kuczynska-Kippen N. The distribution of rotifers (Rotifera) within a single *Myriophyllum* bed, *Hydrobiology*. 2003. Vol. 506–509. P. 327–331.
- Kutikova L. A. Rotifers of the fauna of the USSR. L.: Nauka, 1970. 742 p.
- Lauridsen T. L., Pedersen L. J., Jeppesen E., Søndergaard M. The importance of macrophyte bed size for cladoceran composition and horizontal migration in a shallow lake, *Journal of Plankton Research*. 1996. Vol. 18. P. 2283–2294.
- Lazareva V. I. Structure and dynamics of zooplankton in Rybinsk Reservoir, Pod red. A. I. Kopylova. M.: *Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK*, 2010. 183 p.
- Legendre P., Legendre L. *Numerical ecology*. Oxford: Elsevier, 2012. 990 p.
- Litvinova N. V. Fedyaeva L. A. Influence of macrophyte development in the formation of zooplankton structure in the lower reaches of the Volga River delta, *Povolzhskiy ekologicheskij zhurnal*. 2018. No. 4. P. 399–410.
- Makarceva E. S. Functioning of zooplankton in conditions of intensive overgrowing (on the example of Lake Svinechnoye), *Vodnye ekosistemy: troficheskie urovni i problemy podderzhaniya bioraznoobraziya: Materialy Vserossiyskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Vodnye i nazemnye ekosistemy: problemy i perspektivy issledovaniy»*. Vologda, 2008. P. 192–194.
- Methodological recommendations on collection and processing of materials for hydrobiological studies in freshwater bodies of water, *Zooplankton i ego produkcija*. L.: Gop. NII ozer. i rech. ryb. hoz-va, 1982. 33 p.
- Oliveira F. R., Lansac-Tôha F. M., Meira B. R. et al. Effects of the exotic rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) on the microbial food web components, *Aquatic Ecology*. 2019. No. 53. P. 581.
- Orcutt J. D., Pace M. L. Seasonal dynamics of rotifer and crustacean zooplankton populations in a eutrophic, monomictic lake with a note on rotifer sampling techniques, *Hydrobiologia*. 1984. Vol. 119 (1). P. 73–80.
- Palash A. L. Seasonal variability of benthic zooplankton in vegetated biotopes of lakes of different types, *Ekologiya vodnyh bespozvonochnyh: Sbornik materialov Mezhdunarodnoy konferencii, posvyaschennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya F. D. Morduhay-Boltovskogo*. IBVV RAN, Borok. Yaroslavl': Prinhaus, 2010. P. 217–218.
- Popov A. I. Muhortova O. V. Pelagic and littoral zooplankton of the Saratov reservoir: species composition, biological invasions, peculiarities of fauna formation, *Otv. red. G. P. Rozenberg. Tol'yatti: Cassandra*, 2016. 158 p.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. 2015. URL: <http://www.R-project.org> (data obrascheniya: 13.05.2024).
- Romagnan J, B, Legendre L., Guidi L., Jamet J, L., Jamet D., Mousseau L. et al. Comprehensive Model of Annual Plankton Succession Based on the Whole-Plankton Time Series Approach, *PLoS ONE*. 2015. Vol. 10 (3). P. e0119219.
- Scheffer M. *Ecology of Shallow Lakes*. New York: Springer Science & Business Media, 2004. 457 r.
- Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Zinchenko T. D. Quantitative hydroecology: system identification methods. Tol'yatti: IEVB RAN, 2003. 463 p.
- Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Randomisation and bootstrap: statistical analysis in biology and ecology using R. Tol'yatti: Cassandra, 2013. 314 p.
- Shurganova G. V. Cherepennikov V. V. Artel'nyy E. V. Population dynamics of discriminant species of the main zooplanktocenoses of the Cheboksarsky reservoir, *Povolzhskiy ekologicheskij zhurnal*. 2004. No. 2. P. 200–209.
- Shurganova G. V. Dynamics of species structure of zooplanktocenoses in the process of their formation

- and development (on the example of reservoirs of the middle Volga: Gorky and Cheboksary): Avtoref. dip. ... d-ra biol. nauk. N. Novgorod, 2007. 48 p.
- Sommer U., Adrian R., De Senerpont Domis L. et al. Beyond the Plankton Ecology Group (PEG) Model: Mechanisms driving plankton succession, *Annu. Rev. Ecol. Evo. Syst.* 2012. Vol. 43. P. 429.
- Sommer U., Gliwicz Z. M., Lampert W., Duncan A. The PEG model of a seasonal succession of planktonic events in fresh waters, *Arch. Hydrobiol.* 1986. Vol. 106. P. 433.
- Starkweather P. L., Bogdan K. G. Detrital feeding in natural zooplankton communities: discrimination between live and dead algal foods, *Hydrobiologia*. 1980. Vol. 73. P. 83–85.
- Stolbunova V. N. Zooplanktocenoses of coastal shallow waters of Upper Volga reservoirs, *Biologicheskie resursy presnyh vod: bespozvonochnye*. Rybinsk: Izd-vo OAO «Rybinskiy dom pečhati», 2005. P. 357–373.
- Stolbunova V. N. Zooplankton of Lake Pleshcheevo. M.: Nauka, 2006. 152 p.
- Uitteker R. Communities and ecosystems. M.: Progress, 1980. 328 p.
- Yakimov V. N. Shurganova G. V. Cherepennikov V. V. Kudrin I. A. Il'in M. Yu. Methods of comparative assessment of the results of cluster analysis of the structure of hydrobiocenoses (on the example of zooplankton of the Linda River, Nizhny Novgorod region), *Biologiya vnutrennih vod*. 2016. No. 2. P. 94–103.
- Zarubina E. Yu. Ermolaeva N. I. Seasonal dynamics of macrophytes and zooplankton of the littoral zone of the Novosibirsk Reservoir in 2013, *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy*. 2014. No. 11. P. 216–220.
- Zimbalevskaya L. N. Pligin Yu. V. Horoshih L. A. Dolinskiy V. L. Sidorenko V. M. Levina O. V. Georgievskaya L. M. Revenko I. G. Goshovskaya G. A. Kozina S. Ya. Emel'yanov L. V. Levitskaya N. A. Structure and succession of littoral biocenoses of the Dnieper reservoirs. Kiev: Naukova dumka, 1987. 204 p.
- Zimbalevskaya L. N. Phytophilous invertebrates of plain rivers and reservoirs. Kiev: Naukova dumka, 1981. 216 p.



УДК 581.5

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОИЗРАСТАНИЯ НА АКТИВНОСТЬ АСКОРБИНАТОКСИДАЗЫ И ПОЛИФЕНОЛОКСИДАЗЫ В ЛИСТЯХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

КУЗЬМИНА

Айгуль Мухаметнагимовна

Ижевская государственная сельскохозяйственная академия,
426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая,
11, AMSharifullina@yandex.ru

Ключевые слова:
аскорбинатоксидаза
полифенолоксидаза
Acer platanoides L.
Betula pendula Roth.
локальные условия
произрастания

Аннотация: В работе представлены исследования по выявлению видовых особенностей у аборигенных видов древесных растений, произрастающих в насаждениях с различной интенсивностью антропогенного стресса. Показано влияние локальных условий произрастания на активность ферментов аскорбинатоксидазы и полифенолоксидазы. Объектами исследования являлись аборигенные виды *Acer platanoides* L., *Betula pendula* Roth. Для определения особенностей динамики активности исследуемых ферментов с учетом уровня загрязнения окружающей среды и локальных условий места произрастания были определены пробные площади 1 и 2, которые отличались по микрорельефу и, как следствие, абиотическим параметрам условий произрастания растений. Пробные площади на возвышенных, хорошо продуваемых участках, имеющих выровненную поверхность, были обозначены «пробная площадь 1». Пробные площади в пределах каждого типа насаждений на участках, имеющих понижение рельефа, были обозначены «пробная площадь 2». Более высокие значения по относительной влажности воздуха и более низкие температуры почвы и атмосферного воздуха наблюдались на пробной площади 2. Активности аскорбинатоксидазы и полифенолоксидазы не одинаково реагируют на различный уровень загрязнения среды обитания и локальные условия произрастания в пределах типа насаждений. Активность аскорбинатоксидазы была видоспецифичной. У *B. pendula* в насаждениях контроля на пробной площади 2 активность аскорбинатоксидазы достоверно выше, чем на пробной площади 1. У *A. platanoides* характер активности фермента менялся в течение вегетации в пределах пробных площадей. В насаждениях санитарно-защитных зон и магистральных посадках, наоборот, более высокие значения отмечены на пробной площади 1. В городских насаждениях активность полифенолоксидазы в листьях изучаемых видов древесных растений к августу имела достоверно более высокие значения по сравнению с контрольными насаждениями. Активность полифенолоксидазы у исследуемых деревьев имела общие черты.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 21 января 2024 года

Подписана к печати: 04 мая 2024 года

Введение

На сегодняшний день наблюдается возрастание степени антропогенного воздействия на живые системы. Крупные городские агломерации характеризуются комплексом неблагоприятных факторов среды обитания для живых организмов, включая древесные

растения. Неравномерное распределение негативных факторов в пространстве способствует формированию локальных условий места произрастания, которые представлены особенностями рельефа, температурным режимом атмосферного воздуха, температурой поверхности почвы, параметрами отно-

сительной влажности воздуха (Никерова и др., 2021; Samancioglu et al., 2016).

Растения в городской среде применяют разнообразные механизмы адаптации к негативным условиям внешней среды (Самусик и др., 2022; Kamath et al., 2015).

В научном сообществе сохраняется интерес к изучению особенностей адаптации древесных растений на молекулярном уровне к негативным стресс-факторам городской среды. Механизмы адаптации растений и формирование устойчивости древесных растений к разнообразным стрессам антропогенной среды изучались отечественными и зарубежными исследователями (Иванова и др., 2021; Робакидзе и др., 2021; Лубянова и др., 2021; Hyder et al., 2020).

Важным для жизнедеятельности клетки и всего растительного организма является медьсодержащий фермент класса оксидоредуктаз – полифенолоксидаза, которая выполняет функцию окисления фенольных соединений и участвует в дыхании. Полифенолоксидаза принимает участие в приспособительных реакциях к негативным факторам окружающей среды. Она относится к классу терминальных оксидаз растительной клетки, которая локализована в цитоплазме. Данный фермент принимает активное участие в дыхании растительных клеток за счет обратимого окисления полифенолов (Сауткина, 2022; Nunes et al., 2019).

Другим важным ферментом, участвующим в формировании адаптивных реакций к антропогенным стрессам, является аскорбинатоксидаза, которая принимает участие в ликвидации активных форм кислорода и защитных реакциях организма в борьбе с окислительным стрессом растительного организма. Аскорбинатоксидаза локализована в клеточной стенке и принадлежит суперсемейству мультимедных оксидаз (García et al., 2016).

В научных исследованиях не достаточно полно изучено влияние локальных условий произрастания на формирование механизма адаптации на молекулярном уровне у древесных растений в городской среде. В связи с этим в условиях г. Набережные Челны изучение экофизиологических особенностей защитных древесных насаждений и древесных пород, связанных с синтезом веществ с антиоксидантной активностью, является актуальным.

Целью исследования являлось изучение влияния локальных условий места произрастания на активность аскорбинатоксидазы

и полифенолоксидазы в листьях древесных растений, произрастающих в различных типах насаждений (на примере г. Набережные Челны).

Материалы

Исследования были проведены в период с 2015 по 2022 г. Объектами выступали аборигенные древесные растения клен остролистный (*Acer platanoides* L.) и береза повислая (*Betula pendula* Roth.). Объем выборки составлял 30 деревьев каждого вида с каждой пробной площади. Выбранные объекты произрастали в насаждениях разных экологических категорий: зона условного контроля – Челнинское лесничество, санитарно-защитные зоны – завод кузнечный ПАО «Камаз», магистральные насаждения проспекта Казанский (рис. 1).

Методы

На исследуемых территориях закладывались пробные площади размером не менее 0.25 га, в пределах которых произрастали выбранные древесные растения.

С целью определения особенностей динамики активности исследуемых ферментов с учетом уровня загрязнения окружающей среды и локальных условий места произрастания были определены два типа биотопов, которые отличались по микрорельефу и, как следствие, по абиотическим параметрам условий произрастания растений. Пробные площади на возвышенных, хорошо продуваемых участках, имеющих выровненную поверхность, были обозначены «биотоп 1». Пробные площади в пределах каждого типа насаждений на участках, имеющих понижение рельефа, были обозначены как «биотоп 2». Более высокие значения по относительной влажности воздуха и более низкие температуры почвы и атмосферного воздуха наблюдались в биотопе 2.

Для выделения локальных условий произрастания в каждой категории насаждений закладывались две пробные площади, которые отличались друг от друга по ряду параметров: степень увлажнения, температурный режим поверхности почвы, относительная влажность воздуха, особенности рельефа. Параметры условий отмечались в сухую и теплую погоду с целью фиксации максимальных отличий. Оценка гидротермического режима атмосферного воздуха проводилась на высоте 2 метров, с этой же высоты был осуществлен сбор листьев для последующего лабораторного анализа. Все наблюдения и сбор растительного матери-

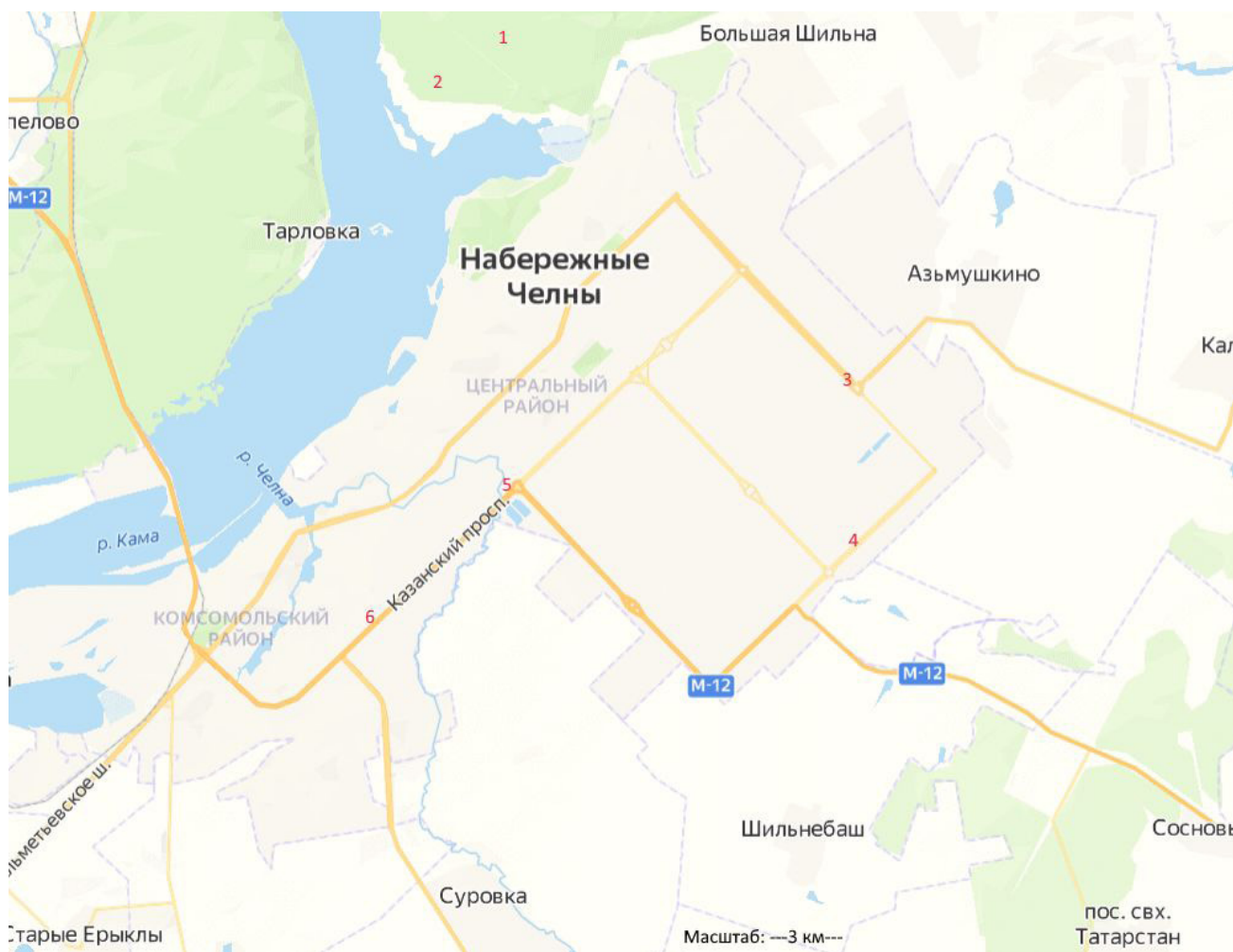


Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей: 1 – зона условного контроля Челнинское лесничество (биотоп 1); 2 – зона условного контроля Челнинское лесничество (биотоп 2); 3 – кузнечный завод (биотоп 1); 4 – кузнечный завод (биотоп 2); 5 – Казанский проспект (биотоп 1); 6 – Казанский проспект (биотоп 2)

Fig 1. The scetch map of the sample plots: 1 – conditional control zone of the Chelny forestry (biotope 1); 2 – conditional control zone of the Chelny forestry (biotope 2); 3 – blacksmith factory (biotope 1); 4 – blacksmith factory (biotope 2); 5 – Kazansky Prospekt (biotope 1); 6 – Kazansky Prospekt (biotope 2)

ала проводили в дневные часы, с 11 до 13 часов. Температуру поверхности почвы измеряли в 10 точках в непосредственной близости к растению в трехкратной повторности в течение дня (утром с 7 до 8 часов), в обед (с 12 до 14 часов) и вечером (с 17 до 18 часов), затем вычисляли среднюю арифметическую полученных трех значений (Методы..., 2014).

Суммарный показатель загрязнения почв Z рассчитывался с учетом коэффициентов концентрации загрязняющих веществ и числа загрязнителей n по формуле (СанПин 1.2.3685-21).

$$Z = (\sum C_i / C_{\text{фон}i}) - (n - 1).$$

В зависимости от величины Z устанавливают следующие ранги загрязнения почв: допустимый ($Z \leq 16$); умеренно опасный ($Z = 16-32$); опасный ($Z = 32-128$); чрезвычайно опасный ($Z \geq 128$).

Индекс загрязнения атмосферы рассчитывался по формуле:

$$\text{ИЗА}_i = (C_i / \text{ПДК}_i)^{k_i},$$

где C_i – средняя концентрация i вещества. ПДК $_i$ – среднесуточная предельно допустимая концентрация i вещества, k_i – показатель степени, учитывающий класс опасности вещества – для веществ 1-го класса опасности – 1.5; 2-го – 1.3; 3-го – 1.0; 4-го – 0.85 (РД 52.04.667-2005).

Сбор растительного материала осуществлялся в летние месяцы, с учетных особей собирали по 30 листьев средней формации на годичном вегетативном побеге. Побеги располагались в нижней части кроны южной экспозиции. Определение активности медьсодержащих ферментов в листьях проводили в динамике в июне, июле и августе спектрофотометрически.

Активность аскорбинатоксидазы определяли по методу, предложенному Д. К. Асатовым и С. Т. Рахимовой (1987), который основан на свойстве аскорбиновой кислоты поглощать свет с максимумом при длине волны 265 нм. Об активности фермента судили по уменьшению величины оптической плотности, учитывая, что степень окисления аскорбиновой кислоты пропорциональна количеству фермента. Активность полифенолоксидазы определяли спектрофотометрическим методом, основанным на измерении оптической плотности продуктов реакции, которые образуются при окислении пирокатехина за определенный промежуток времени (Ермаков и др., 1987).

Математическую обработку осуществляли с использованием статистического пакета Microsoft Windows «Statistica 10». Распределение данных определяли с помощью построения ящичных диаграмм. В описательной статистике осуществляли проверку подгрупп на нормальность. Далее были построены частотные гистограммы (тест K-S, Shapiro-Wilk). С целью анализа полученных данных использовали методы дисперсионного многофакторного анализа ANOVA (при последующей оценке различий методом TuKey HSD test и Scheffe test). В процессе сравнения и анализа полученных результатов использовали уровень значимости (при $p < 0.05$).

Результаты

В пределах выделенных пробных площадей учитывались следующие параметры: степень увлажнения, температурный режим поверхности почвы, относительная влажность воздуха, особенности рельефа. Параметры условий отмечались в сухую и теплую погоду с целью фиксации максимальных отличий.

В насаждениях зоны контроля преобладают дерново-подзолистые почвы, суммарный показатель загрязнения почвы составил 8. Завод кузнечный в городе Набережные Челны имеет не полностью сформированную санитарно-защитную зону, которая большей частью расположена на юго-востоке города. Загрязнение почвы составляет 24 единицы. На данной территории фиксируются стабильно высокие значения атмосферного воздуха, индекс загрязнения атмосферного воздуха составляет 10.3 единицы. Казанский проспект является самой оживленной магистралью города Набережные Челны с высоким уровнем загрязнения атмосферного

воздуха (ИЗА = 12.3). Суммарный показатель загрязнения почвы составляет 30–32. Среди приоритетных загрязнителей санитарно-защитных зон и магистральных посадок можно выделить следующие: формальдегид, фенол, оксиды азота и серы, бенз(а)пирен.

В ходе исследования была выявлена различная активность медьсодержащих ферментов на различный уровень загрязнения среды обитания и локальные условия места произрастания в пределах типа насаждений.

Дисперсионный многофакторный анализ результатов исследований выявил существенное влияние видовых особенностей (уровень значимости $p < 10^{-5}$), типа насаждения ($p < 10^{-5}$), локальных условий места произрастания ($p < 10^{-5}$), сроков вегетации ($p < 10^{-5}$), а также взаимодействия этих факторов ($p < 10^{-5}$) на активность аскорбинатоксидазы и полифенолоксидазы в листьях древесных растений (табл. 1).

Обсуждение

Результаты проведенных исследований показали, что у березы повислой в контрольных насаждениях растения в биотопе 2 имели достоверно более высокие показатели активности фермента в листьях по сравнению с растениями биотопа 1: в июне на 0.42 ед. акт., в июле – на 0.34, в августе – на 0.52, при $HCP_{05} = 0.02$.

В насаждениях санитарно-защитных зон промышленных предприятий у растений на пробной площади 2, наоборот, активность аскорбинатоксидазы в листьях была ниже, чем у растений биотопа 1.

В примагистральных посадках у березы повислой в биотопе 2 в июне и июле активность фермента в листьях была выше на 0.12 и 0.20 ед. акт. по сравнению с показателями биотопа 1, в августе ниже на 0.09 ед. акт. по сравнению с растениями биотопа 1.

У клена остролистного, произрастающего в насаждениях зоны условного контроля в биотопе 2, активность фермента в листьях в июне была ниже на 0.03 ед. акт., чем у растений в биотопе 1, а в августе выше на 0.10 ед. акт. В насаждениях санзон промышленных предприятий и примагистральных посадках у растений биотопа 2 по сравнению с биотопом 1 в начале наблюдений активность аскорбинатоксидазы в листьях была выше на 0.13 и 0.18 ед. акт. соответственно. К концу периода вегетации у растений биотопа 2 в насаждениях санитарно-защитных зон исследуемый показатель имел более низкие значения по сравнению с биотопом 1: в июле

Таблица 1. Результаты дисперсионного анализа по активности аскорбинатоксидазы в листьях древесных растений

Факторы	df Effect	MS Effect	df Error	MS Error	F	p-level
1*	4	35.91434	720	0.013327	2694.886	$P < 10^{-5}$
2	2	28.07945	720	0.013327	2106.9832	$P < 10^{-5}$
3	3	0.313938	720	0.013327	23.556828	$P < 10^{-5}$
4	2	15.39037	720	0.013327	1154.8389	$P < 10^{-5}$
12	8	8.644543	720	0.013327	648.65601	$P < 10^{-5}$
13	12	0.277375	720	0.013327	20.813242	$P < 10^{-5}$
14	8	7.983537	720	0.013327	599.05652	$P < 10^{-5}$
24	4	26.48736	720	0.013327	1987.5186	$P < 10^{-5}$
34	6	0.069637	720	0.013327	5.2252893	$P < 10^{-5}$
124	16	5.537092	720	0.013327	415.48389	$P < 10^{-5}$
134	24	0.11779	720	0.013327	8.8385468	$P < 10^{-5}$

Примечание. * 1 – вид растения; 2 – тип насаждения; 3 – локальные условия произрастания; 4 – срок вегетации.

Таблица 2. Результаты дисперсионного анализа по активности полифенолоксидазы в листьях древесных растений

Факторы	df Effect	MS Effect	df Error	MS Error	F	p-level
1	4	20.48512	180	0.079447	257.8463	$P < 10^{-5}$
2	2	37.52496	180	0.079447	472.3267	$P < 10^{-5}$
3	3	0.110002	180	0.079447	1.384593	0.004
4	2	227.2249	180	0.079447	2860.08	$P < 10^{-5}$
12	8	0.460347	180	0.079447	5.794383	$P < 10^{-5}$
13	12	0.155704	180	0.079447	1.959843	0.030
14	8	6.081296	180	0.079447	76.54528	$P < 10^{-5}$
24	4	7.762559	180	0.079447	97.70734	$P < 10^{-5}$
34	6	0.142807	180	0.079447	1.797517	0.002
124	16	0.58235	180	0.079447	7.330036	$P < 10^{-5}$
134	24	0.133702	180	0.079447	1.682911	0.030

– на 0.41, в августе – на 0.18. ед. акт. У растений биотопа 2 в примагистральных посадках, наоборот, показатели активности фермента были выше, чем в биотопе 1: в июле – на 0.49, в августе – на 0.15 ед. акт. В насаждениях санитарно-защитных зон различия наблюдались лишь в июле: активность аскорбинатоксидазы у растений в биотопе 2 была достоверно выше на 0.03 ед. акт., чем в биотопе 1.

В результате сравнения достоверных результатов было отмечено, что общей закономерности в реакции и изменении активности аскорбинатоксидазы в листьях изучаемых древесных растений на комплексное влияние уровня загрязнения и локальных условий произрастания выявить не удалось. Береза повислая и клен остролистный про-

являли видовую специфику в активности аскорбинатоксидазы в листьях.

В результате проведенного сравнительного анализа активности полифенолоксидазы были отмечены различия у растений, произрастающих в условиях пробных площадей. Во всех типах насаждений у всех особей, произрастающих в биотопе 2, в течение всего периода наблюдений была зафиксирована достоверно ($HC_{05} = 0.04$ ед. акт.) более высокая активность полифенолоксидазы в листьях по сравнению с биотопом 1: в контрольных насаждениях в июне – на 0.22, июле – на 0.10, а в августе – на 0.16 ед. акт.; в насаждениях санитарно-защитных зон в июне – на 0.14, в июле – на 0.11, в августе – на 0.11 ед. акт.; в примагистральных по-

Таблица 3. Активность медьсодержащих ферментов в листьях древесных растений г. Набережные Челны, для проб из $n = 30$

Вид растения	Тип насаждений	Месяц	Биотоп	Активность аскорбинатоксидазы	Активность полифенолоксидазы	
<i>B. pendula</i>	Зона условного контроля	Июнь	1	3.13 ± 0.51	1.31 ± 0.09	
			2	3.55 ± 0.14	1.36 ± 0.13	
		Июль	1	3.48 ± 0.36	3.48 ± 0.38	
			2	3.82 ± 0.34	3.76 ± 0.41	
		Август	1	4.21 ± 0.26	1.76 ± 0.11	
			2	4.73 ± 0.17	1.96 ± 0.18	
	Санитарно-защитные насаждения	Июнь	1	3.38 ± 0.22	1.22 ± 0.07	
			2	3.08 ± 0.17	1.31 ± 0.09	
		Июль	1	3.15 ± 0.33	2.47 ± 0.14	
			2	2.86 ± 0.32	2.57 ± 0.17	
		Август	1	2.60 ± 0.27	3.85 ± 0.28	
			2	2.61 ± 0.19	4.03 ± 0.37	
	Магистральные посадки	Июнь	1	3.00 ± 0.31	1.26 ± 0.09	
			2	3.12 ± 0.23	1.39 ± 0.14	
		Июль	1	2.53 ± 0.17	2.54 ± 0.24	
			2	2.73 ± 0.21	2.53 ± 0.27	
		Август	1	2.01 ± 0.12	3.96 ± 0.31	
			2	1.92 ± 0.09	4.07 ± 0.42	
	<i>A. platanoides</i>	Зона условного контроля	Июнь	1	3.45 ± 0.26	0.90 ± 0.13
				2	3.42 ± 0.35	0.98 ± 0.17
			Июль	1	3.97 ± 0.29	2.96 ± 0.26
				2	3.98 ± 0.41	3.08 ± 0.36
			Август	1	4.56 ± 0.39	1.76 ± 0.09
				2	4.66 ± 0.42	1.87 ± 0.16
Санитарно-защитные насаждения		Июнь	1	3.76 ± 0.27	1.03 ± 0.09	
			2	3.89 ± 0.36	1.36 ± 0.11	
		Июль	1	3.29 ± 0.31	3.01 ± 0.32	
			2	2.88 ± 0.11	3.34 ± 0.36	
		Август	1	2.48 ± 0.27	3.41 ± 0.38	
			2	2.30 ± 0.19	3.66 ± 0.33	
Магистральные посадки		Июнь	1	3.77 ± 0.36	1.02 ± 0.12	
			2	3.95 ± 0.39	1.32 ± 0.21	
		Июль	1	2.93 ± 0.26	3.30 ± 0.28	
			2	3.42 ± 0.31	3.67 ± 0.42	
		Август	1	2.51 ± 0.18	4.79 ± 0.47	
			2	2.66 ± 0.25	5.07 ± 0.31	
НСР ₀₅				0.02	0.04	

садах в июне – на 0.12, в июле – на 0.10, в августе – на 0.16 ед. акт. Эти данные свидетельствуют о том, что на активность антиоксидантной системы оказывает влияние не только уровень загрязнения окружающей среды, но и особенности локальных условий произрастания растений.

Аскорбинатоксидаза участвует в каталитическом окислении аскорбиновой кислоты до монодегидроаскорбата, который

быстро превращается в дегидроаскорбиновую кислоту. Обратимость данных реакций обеспечивает возможность растениям формировать специфическую реакцию в условиях стресса и поддерживать окислительно-восстановительное состояние апопласта (Garchery et al., 2008), которое меняется при воздействии стрессовых факторов окружающей среды, в т. ч. и антропогенного, который представлен комплексом загрязня-

ющих веществ (Garchery et al., 2013). В наших исследованиях береза повислая и клен остролистный, произрастающие в условиях средней (санитарно-защитные насаждения) и высокой (магистральные насаждения) степени антропогенной нагрузки, снижали активность аскорбинатоксидазы к концу периода активной вегетации. При этом у растений в биотопе 1 активность фермента была выше по сравнению с растениями в биотопе 2 только в насаждениях со средней степенью антропогенной нагрузки, а в условиях сильной антропогенной нагрузки тенденция была противоположной. Данный факт подтверждает влияние локальных условий произрастания на активность аскорбинатоксидазы у аборигенных видов растений и формирование специфической адаптационной стратегии в условиях антропогенного стресса.

У березы повислой и клена остролистного независимо от типа насаждения и периода наблюдений особи в биотопе 2 имели достоверно более высокие показатели активности полифенолоксидазы в листьях по сравнению с биотопом 1.

На сегодняшний день активность полифенолоксидазы в листьях древесных растений слабо освещена в научной литературе. Встречаются сведения о ее роли в антиокси-

дантной системе защиты растений, а также в участии в процессах вторичного метаболизма, подчеркивается специфическая линия защиты с выполнением особых функций в окислительном процессе растения (Vatankhah et al., 2010; Guo et al., 2014). В работах отмечается тенденция к возрастанию активности полифенолоксидазы в листьях древесных растений, произрастающих в условиях антропогенной среды, к концу периода вегетации (Заплатин, 2008), что подтверждается и в наших исследованиях, при этом уделяется мало внимания роли локальных условий произрастания.

Заключение

Активность фермента полифенолоксидазы в листьях изучаемых видов древесных растений в августе имела достоверно более высокие значения в городских насаждениях в отличие от контрольных. По активности аскорбинатоксидазы реакция исследуемых видов специфична. Общей закономерности в реакции и изменении активности аскорбинатоксидазы в листьях изучаемых аборигенных видов древесных растений на комплексное влияние уровня загрязнения и локальных условий произрастания выявить не удалось, а по показателю активности полифенолоксидазы реакция у березы повислой и клена остролистного схожая.

Библиография

- Ермаков А. И., Арасимович В. В., Ярош Н. П. и др. Определение активности полифенолоксидазы и аскорбинатоксидазы // Методы биохимического исследования растений. Л., 1987. С. 48–51.
- Заплатин Б. П. Биотестирование атмосферных загрязнений по содержанию хлорофилла и активности полифенолоксидазы // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В. Г. Белинского. 2008. № 14. С. 82–87.
- Иванов О. А., Домаш В. И., Канделинская О. Л. Биохимические механизмы адаптации древесных растений к техногенному загрязнению (на примере Солигорского промышленного района) // Ботаника. Исследования. 2021. № 50. С. 306–321.
- Лубянова А. Р., Безрукова М. В., Шакирова Ф. М. Взаимодействие сигнальных путей при формировании защитных реакций растений в ответ на стрессовые факторы окружающей среды // Физиология растений. 2021. Т. 68, № 6. С. 563–578. DOI: 10.31857/S0015330321060129
- Методы полевых экологических исследований : Учеб. пособие / О. Н. Артаев (и др.); Под ред. А. Б. Ручина (и др.). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. 412 с.
- Никерова К. М., Галибина Н. А., Чирва О. В., Климова (Успенская) А. В. Активные формы кислорода и компоненты антиоксидантной системы – участники метаболизма растений. Взаимосвязь с фенольным и углеводным обменом // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2021. № 3. С. 5–20. DOI: 10.17076/eb1312
- Робакидзе Е. А., Торлопова Н. В., Бобкова К. С., Наймушина С. И. Мониторинг состояния древесных растений в сосняках черничных при загрязнении выбросами Сыктывкарского лесопромышленного комплекса (Республика Коми) // Растительные ресурсы. 2021. Т. 57, № 3. С. 260–274. DOI: 10.31857/S0033994621030067

- РД 52.04.667-2005 Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию. . М., 2016. 37 с.
- СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: постановление главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2. . М., 2021. 635 с.
- Сауткина М. Ю. Анализ биохимического разнообразия вегетативной сферы дуба черешчатого лесостепной зоны // Самарский научный вестник. 2022. Т. 11, № 1. С. 114–118. DOI: 10.55355/snv2022111114
- Самусик Е. А., Марчик Т. П., Головатый С. Е. Интенсивность окислительных процессов и активность антиоксидантной системы в листьях древесных растений, произрастающих в условиях техногенного загрязнения // Социально-экологические технологии. 2022. Т. 12, № 4. С. 418–438. DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-4-418-438
- Garcia D. E., Glasser W. G., Pizzi A., Paczkowski S. P., Laborie M. P. Modification of condensed tannins: from polyphenol chemistry to materials engineering // New Journal of Chemistry. 2016. Vol. 1. P. 234–242.
- Garchery C., Gest N., Do P. T. et al. Altered stomatal dynamics in ascorbate oxidase over-expressing tobacco plants suggest a role for dehydroascorbate signalling // Journal of Experimental Botany. 2008. Vol. 59. P. 729–737.
- Garchery C., Gest N., Do P. T. et al. Diminution in ascorbate oxidase activity affects carbon allocation and improves yield in tomato under water deficit // Plant Cell Environ. 2013. Vol. 36 (1). P. 159–175. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2012.02564.x
- Guo H., Sun Y., Li Y., Liu X., Zhang W., Ge F. Elevated CO₂ decreases the response of the ethylene signaling pathway in *Medicago truncatula* and increases the abundance of the pea aphid // New Phytologist. 2014. Vol. 201, № 1. P. 279–291. DOI: 10.1111/nph.12484
- Kamath S. D., Arunkumar D., Avinash N. G. et al. Determination of total phenolic content and total antioxidant activity in locally consumed food stuffs in Moodbidri, Karnataka, India // Adv. Appl. Sci. Res. 2015. Vol. 6, № 6. P. 99–102.
- Nunes M. H., Both S., Bongalov B., et al. Changes in leaf functional traits of rainforest canopy trees associated with an El Niño event in Borneo // Environ. Res. Lett. 2019. № 14. P. 2–14.
- Samancioglu A., Sat I. G., Yildirim E. et al. Total phenolic and vitamin C content and antiradical activity evaluation of traditionally consumed wild edible vegetables from Turkey // Indian J. of Traditional Knowledge. 2016. Vol. 15, № 2. P. 208–213.
- Hyder P. W., Fredrickson E. L., Estell R. E. et al. Distribution and concentration of total phenolics, condensed tannins, and nordihydroguaiaretic acid (NDGA) in creosotebush (*Larrea tridentata*) // Biochemical Systematics and Ecology. 2020. № 30. P. 905–912.
- Vatankhah E., Niknam V., Ebrahimzadeh H. Activity of antioxidant enzyme during in vitro organogenesis in *Crocus sativus* // Biol. Plantarum. 2010. Vol. 54, № 3. P. 509–514. DOI: 10.1007/s10535-010-0089-9

INFLUENCE OF GROWING CONDITIONS ON THE ACTIVITY OF ASCORBATE OXIDASE AND POLYPHENOL OXIDASE IN LEAVES OF WOODY PLANTS

KUZMINA

Aigul Mukhametnagimovna

Izhevsk State Agricultural Academy, 11 Studentskaya str., Izhevsk, Udmurt Republic, 426069, AMSharifullina@yandex.ru

Keywords:

ascorbate oxidase
polyphenol oxidase
Acer platanoides L.
Betula pendula Roth.
local growing conditions

Summary: The paper presents research on the identification of species features in native species of woody plants growing in plantations with different intensities of anthropogenic stress. It is shown that the local growth conditions affect the activity of the ascorbate oxidase and polyphenol oxidase enzymes. The objects of the study were the native species *Acer platanoides* L. and *Betula pendula* Roth. When determining the features of the dynamics of enzyme activity, the level of environmental pollution and local conditions of the growing site were taken into account. For this purpose, sample plots 1 and 2 were determined. These sample plots differed in microrelief and, as a consequence, abiotic parameters of plant growth conditions. Sample plots in elevated, blow areas with a leveled surface were indicated as sample plot 1. Sample plots within each type of planting in areas with lower relief were indicated as sample plot 2. Higher values of relative humidity and lower temperatures of soil and atmospheric air were observed on sample plots 2. The activity of ascorbate oxidase and polyphenol oxidase do not react the same way to different levels of environmental pollution and local growth conditions within the type of plantations. Ascorbate oxidase activity was species specific. In *B. pendula*, the activity of ascorbate oxidase in control plantations on sample plot 2 was significantly higher than on sample plot 1. In *A. platanoides*, the nature of the enzyme activity changed during the growing season within the sample plots. In the plantations of sanitary protection zones and linehaul plantings, on the contrary, higher values were noted on sample plot 1. In urban plantation, the activity of polyphenol oxidase in the leaves of the studied species of woody plants by August had significantly higher values compared with control plantation. The activity of polyphenol oxidase in the studied trees had common features.

Received on: 21 January 2024

Published on: 04 June 2024

References

- Documents on the state of atmospheric pollution in cities to inform government agencies, the public and the population. General requirements for the development, construction, presentation and content. M., 2016. 37 p.
- Ermakov A. I. Arasimovich V. V. Yarosh N. P. Determination of polyphenol oxidase and ascorbate oxidase activity, *Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy*. L., 1987. P. 48–51.
- Garchery C., Gest N., Do P. T et al. Diminution in ascorbate oxidase activity affects carbon allocation and improves yield in tomato under water deficit, *Plant Cell Environ*. 2013. Vol. 36 (1). P. 159–175. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2012.02564.x
- Garchery C., Gest N., Do P. T. et al. Altered stomatal dynamics in ascorbate oxidase over-expressing tobacco plants suggest a role for dehydroascorbate signalling, *Journal of Experimental Botany*. 2008. Vol. 59. P. 729–737.
- Garcia D. E., Glasser W. G., Pizzi A., Paczkowski S. P., Laborie M. P. Modification of condensed tannins: from polyphenol chemistry to materials engineering, *New Journal of Chemistry*. 2016. Vol. 1. P. 234–242.
- Guo H., Sun Y., Li Y., Liu X., Zhang W., Ge F. Elevated CO₂ decreases the response of the ethylene signaling pathway in *Medicago truncatula* and increases the abundance of the pea aphid, *New Phytologist*. 2014. Vol. 201, No. 1. P. 279–291. DOI: 10.1111/nph.12484
- Hyder P. W., Fredrickson E. L., Estell R. E. et al. Distribution and concentration of total phenolics, condensed tannins, and nordihydroguaiaretic acid (NDGA) in creosotebush (*Larrea tridentata*), *Biochemical Systematics and Ecology*. 2020. No. 30. R. 905–912.
- Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental

- factors for humans: Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 2 dated 01/28/2021. M., 2021. 635 p.
- Ivanov O. A. Domash V. I. Kandelinskaya O. L. Biochemical mechanisms of adaptation of woody plants to technogenic pollution (using the example of the Soligorsk industrial region), *Botanika. Issledovaniya*. 2021. No. 50. P. 306–321.
- Kamath S. D., Arunkumar D., Avinash N. G. et al. Determination of total phenolic content and total antioxidant activity in locally consumed food stuffs in Moodbidri, Karnataka, India, *Adv. Appl. Sci. Res.* 2015. Vol. 6, No. 6. P. 99–102.
- Lubyanova A. R. Bezrukova M. V. Shakirova F. M. Interaction of signaling pathways in the formation of plant defense reactions in response to environmental stress factors, *Fiziologiya rasteniy*. 2021. T. 68, No. 6. P. 563–578. DOI: 10.31857/S0015330321060129
- Methods of field ecological research: Ucheb. posobie, O. N. Artaev (i dr.); Pod red. A. B. Ruchina (i dr.). Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2014. 412 p.
- Nikerova K. M. Galibina N. A. Chirva O. V. Reactive oxygen species and components of the antioxidant system are participants in plant metabolism. Relationship with phenolic and carbohydrate metabolism, *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk*. 2021. No. 3. P. 5–20. DOI: 10.17076/eb1312
- Nunes M. H., Both S., Bongalov B., et al. Changes in leaf functional traits of rainforest canopy trees associated with an El Niño event in Borneo, *Environ. Res. Lett.* 2019. No. 14. R. 2–14.
- Robakidze E. A. Torlopova N. V. Bobkova K. S. Naymushina S. I. Monitoring the condition of woody plants in blueberry pine forests when polluted by emissions from the Syktyvkar timber industry complex (Komi Republic), *Rastitel'nye resursy*. 2021. T. 57, No. 3. P. 260–274. DOI: 10.31857/S0033994621030067
- Samancioglu A., Sat I. G., Yildirim E. et al. Total phenolic and vitamin C content and antiradical activity evaluation of traditionally consumed wild edible vegetables from Turkey, *Indian J. of Traditional Knowledge*. 2016. Vol. 15, No. 2. P. 208–213.
- Samusik E. A. Marchik T. P. Golovatyy S. E. The intensity of oxidative processes and the activity of the antioxidant system in the leaves of woody plants growing under conditions of technogenic pollution, *Social'no-ekologicheskie tehnologii*. 2022. T. 12, No. 4. P. 418–438. DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-4-418-438
- Sautkina M. Yu. Analysis of the biochemical diversity of the vegetative sphere of pedunculate oak in the forest-steppe zone, *Samarskiy nauchnyy vestnik*. 2022. T. 11, No. 1. P. 114–118. DOI: 10.55355/snv2022111114
- Vatankhah E., Niknam V., Ebrahimzadeh H. Activity of antioxidant enzyme during in vitro organogenesis in *Crocus sativus*, *Biol. Plantarum*. 2010. Vol. 54, No. 3. P. 509–514. DOI: 10.1007/s10535-010-0089-9
- Zaplatin B. P. Biotesting of atmospheric pollution by chlorophyll content and polyphenol oxidase activity, *Izvestiya Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V. G. Belinskogo*. 2008. No. 14. P. 82–87.



УДК 574.583; 574.522

ПИГМЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИТОПЛАНКТОНА БЕЛОХОЛУНИЦКОГО И ОМУТНИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ

КУТЯВИНА
Татьяна Игоревна

кандидат биологических наук, Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
kutyavinati@gmail.com

Ключевые слова:
водохранилище
фитопланктон
цианобактерии
пигменты
хлорофилл
каротиноиды
трофический статус

Аннотация: С целью оценки экологического и трофического состояния двух крупнейших водохранилищ Кировской области (Белохолуницкого и Омутнинского), испытывающих разную антропогенную нагрузку, проведено изучение видового состава фитопланктона и определение его пигментных характеристик. Отмечено, что фитопланктон исследуемых водоемов представлен преимущественно зелеными и диатомовыми водорослями, в период цветения доминирующее положение занимают цианобактерии. По величине индекса сапробности Пантле и Букка в модификации Сладчека оба водохранилища соответствуют бета-мезосапробной зоне, класс качества воды III – умерено загрязненные воды. В ходе исследования, проведенного в летний период 2023 г., впервые для данных водоемов определено содержание в воде хлорофиллов (a, b, c), феофитина и каротиноидов. В Белохолуницком водохранилище общее содержание хлорофиллов составляло 6.4–26.2 мкг/л, каротиноидов – 2.5–10.8 мкг/л; в Омутнинском водохранилище – 16.4–18.8 и 4.9–5.2 мкг/л соответственно. Доля основного пигмента фитопланктона – хлорофилла a от суммы содержания хлорофиллов (a, b, c) в Белохолуницком водохранилище составляла 70–76 %, в Омутнинском – 56–60 %. По средней величине концентрации хлорофилла a (9.8–10.5 мкг/л) исследуемые водохранилища занимают пограничное положение между мезотрофными и умеренно эвтрофными водоемами. Для содержания феофитина во всех случаях получены отрицательные значения, что указывает на летнюю доминирующую роль активных форм фотосинтетических пигментов в продукционных процессах. Отношение содержания каротиноидов к содержанию хлорофилла a, составлявшее в среднем для всех исследуемых участков 0.50, свидетельствует о благоприятных условиях для развития фитопланктона и соответствует водам «хлорофильного типа», характерным для эвтрофных водоемов. Рассчитанные величины пигментных индексов I430/664 (индекс Маргалефа) и I480/664, составляющие 2.5–2.8 и 1.3–1.6 отн. ед. соответственно, свидетельствуют о высоком разнообразии планктонного альгоценоза, преобладании в нем жизнеспособных активных клеток и о достаточной обеспеченности водорослей минеральным азотным питанием. Существенных различий в составе фитопланктона и его пигментных характеристиках между изучаемыми водоемами не обнаружено.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Е. Ю. Митрофанова

Получена: 05 марта 2024 года

Подписана к печати: 03 июня 2024 года

Введение

Одноклеточные водоросли и цианобактерии широко используются в биомониторинге в качестве индикаторов состояния водных объектов. Фотосинтетические пигменты фитопланктона являются одними из важнейших критериев при оценке качества вод, т. к. по их составу, количеству и соотношению можно определить физиологическое состояние водорослей и экологическое состояние водоемов. Хлорофилл *a* (Chl *a*) – основной пигмент зеленых растений и универсальный показатель, отражающий их обилие и фотосинтетическую активность (Дымова, Головкин, 2018). Кроме основного пигмента фотосинтеза научный интерес представляют и другие компоненты пигментного аппарата водорослей: дополнительные хлорофиллы *b* и *c*, феопигменты (продукты распада хлорофилла), а также желтые пигменты

– каротиноиды. Каждый из перечисленных пигментов выполняет определенную роль в процессе фотосинтеза и несет важную информацию о состоянии водорослевого сообщества как элемента экосистемы (Минева, Абрамова, 2009).

Цель данной работы – оценка экологического состояния и трофического статуса Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ Кировской области, отличающихся по степени антропогенной нагрузки и пигментным характеристикам фитопланктона.

Материалы

Белохолуницкое и Омутнинское водохранилища находятся на северо-востоке Русской равнины в центрально-восточной части Европейской России. Основные морфометрические и гидрологические характеристики объектов исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Морфометрические и гидрологические показатели Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ Кировской области

Показатель, единица измерения	Водохранилище	
	Белохолуницкое	Омутнинское
Площадь зеркала, км ²	17.4	9.5
Полный статический объем, млн м ³	51.0	32.5
Длина, км	11.6	10.0
Ширина, км: средняя / максимальная	1.5 / 3.0	1.1 / 2.3
Глубина, м: средняя / максимальная	2.9 / 11.0	3.4 / 11.0
Среднегодовой сток, млн м ³	480.0	143.9
Модуль стока, л/сек. км ²	9.5	10.0
Коэффициент внешнего водообмена	9.4	4.4

Согласно классификации по положению в географической зоне (Дьяконов, Аношко, 1995), оба изучаемых водоема являются лесными, по приуроченности к макрорельефу – равнинными, по площади водного зеркала (Авакян и др., 1987) относятся к категории небольших, по объему (классификация по ГОСТ 17.1.1.02-77) – малых, по величине внешнего водообмена (Догановский, Мякишева, 2015) являются среднепроточными, или аккумуляционно-транзитными. Таким образом, Белохолуницкое и Омутнинское водохранилища сходны по морфометрическим и гидрологическим показателям.

Изучаемые водохранилища созданы в XVIII в. путем зарегулирования малых рек Белая Холуница и Омутная для обеспечения водными ресурсами чугунолитейного производства. В настоящее время водоемы используются для культурно-бытовых и рекреационных целей, а также для водоснабже-

ния промышленных производств. Изучение водохранилищ Кировской области проводится сотрудниками Вятского государственного университета с 2011 г. с целью определения степени их эвтрофирования и разработки мер по улучшению их экологического состояния. Согласно классификации вод по трофо-сапробным показателям (растворенный кислород, содержание биогенных элементов и органических веществ) в соответствии с ГОСТ 17.1.2.04-77, изучаемые водохранилища являются бета-мезосапробными, по трофической шкале классификации водоемов соответствуют эвтрофному классу (Кутявина и др., 2019). Вода в Белохолуницком водохранилище соответствует второму классу качества – слабозагрязненная вода, в Омутнинском – третьему классу качества, загрязненная вода. Комбинаторный индекс загрязнения воды Белохолуницкого водохранилища составляет 12.82, Омутнинско-

го водохранилища – 26.25. Для водосбора Омутнинского водохранилища характерна более высокая заселенность по сравнению с Белохолуницким водохранилищем и соответственно более высокая антропогенная нагрузка.

Изучение пигментных характеристик Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ проводится нами впервые с целью

определения физиологического состояния водорослей и сравнения экологического состояния водоемов.

Пробы воды для изучения фитопланктона отбирали путем зачерпывания воды с поверхности (глубина 0–30 см) дважды: в июле и августе 2023 г., на двенадцати участках водохранилищ (рис. 1). Характеристика участков пробоотбора представлена в табл. 2.

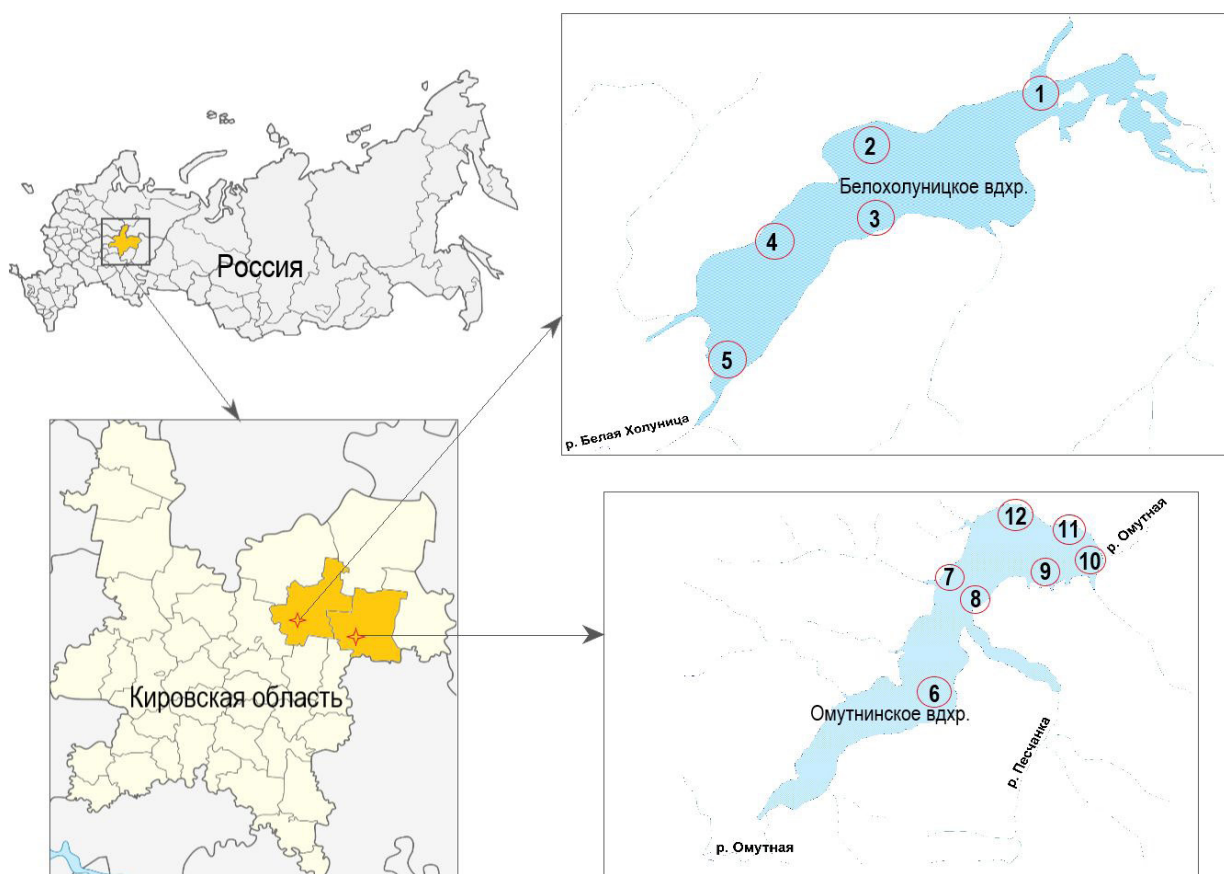


Рис. 1. Участки отбора проб воды на Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах Кировской области

Fig. 1. Water sampling sites at Belokholunitskoye and Omutninskoye reservoirs in the Kirov Region

Методы

Температура воды в период исследования составляла 23–27 °С, прозрачность – 0.7–1.3 м, рН 6.1–7.9, содержание растворенного в воде кислорода – 7.6–11.9 мг/дм³. Пробы воды для изучения видового состава фитопланктона объемом 0.5 дм³ непосредственно после отбора фиксировали 4%-ным раствором формалина, транспортировали в лабораторию и осаждали в течение недели. Определение видов фитопланктона проводили с помощью микроскопа лабораторного «Микмед-6», вариант 7 (АО «Ломо», Россия) при увеличении 400х и классических от-

ественных и зарубежных определителей (Водоросли..., 1989; Голлербах и др., 1953; Дедусенко-Щеголева, Голлербах, 1962; Дедусенко-Щеголева и др., 1959; Забелина и др., 1951; Царенко, 1990; Флора..., 2009; Komarek, 1998, 2005). Названия видов даны согласно системе, принятой в базе данных Algaebase (Guiry, Guiry, 2023). Оценку качества вод производили по индексу сапробности Пантле и Букка в модификации Сладечка (Шитиков и др., 2003).

Фильтрацию проб воды для концентрирования фитопланктона и последующего определения пигментов проводили непосредственно на водоемах с использованием

Таблица 2. Виды антропогенной нагрузки на участках отбора проб воды в Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах Кировской области

Часть водохранилища	Номера участков отбора проб	Характер антропогенной нагрузки
Белохолуницкое водохранилище		
Верховье	1	рыболовство
Средняя	2, 3, 4	рекреационная, рыболовство
Приплотинная	5	жилая застройка на берегах
Омутнинское водохранилище		
Верховье	труднодоступные участки, пробы не отбирали	рыболовство
Средняя	6, 7, 8	рекреационная, рыболовство, садоводческие участки, лечебно-оздоровительные учреждения на берегах
Приплотинная	9, 10, 11, 12	жилая застройка, промышленные предприятия на берегах

мембранных фильтров МФАС-ОС-2 с диаметром пор 0.45 мкм («Владипор», Россия) и вакуумного насоса. Фильтрацию проводили до тех пор, пока на фильтре не появлялся видимый зеленый осадок. При этом фиксировали объем воды, пропущенный через фильтр. С каждого участка пробоотбора было получено по три мембранных фильтра с фитопланктоном в июле и по три – в августе, всего 72 пробы. Фильтры с фитопланктоном подсушивали на воздухе, а затем хранили в замороженном виде до проведения анализа.

Содержание пигментов фитопланктона в воде определяли стандартным спектрофотометрическим методом в 90 % ацетонном экстракте до и после подкисления проб 10%-ным раствором соляной кислоты (ГОСТ 17.1.4.02-90) на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ (ООО «ЭКРОСХИМ», Россия). Расчет концентраций хлорофиллов (Chl) *a*, *b* и *c* ($c_1 + c_2$) проводили по формулам (Jeffrey, Humphrey, 1975), феофитина *a* и каротиноидов (*K*) – по ГОСТ 17.1.4.02-90.

Также в ходе работы рассчитывали пигментные индексы: 1) индекс Маргалефа ($I_{430/664}$), рассчитываемый как отношение оптической плотности (*D*) ацетонного экстракта при длине волны $\lambda = 430$ нм к оптической плотности экстракта при $\lambda = 664$ нм (D_{430}/D_{664}) (Margalef, 1961); 2) пигментный индекс $I_{480/664}$, рассчитываемый как D_{480}/D_{664} ; 3) отношение содержания каротиноидов к содержанию хлорофилла *a* (*K/Chl a*).

Все перечисленные индексы отражают соотношение желтых пигментов (каротиноидов) и зеленых (хлорофиллов) и являются показателями отношения гетеротрофного метаболизма к автотрофному в сообществе

водоема. Значение индекса Маргалефа от 1 до 2 обычно отмечают в молодых культурах или во время весеннего цветения водоемов, когда дыхание невелико, а значение от 3 до 5 – в стареющих культурах или планктонных сообществах в конце лета, когда дыхание относительно усиленное (Одум, 1975). Отношение *K/Chl a* выше 1 указывает на то, что создаются условия, неблагоприятные для развития водорослей в водоеме (Ермолаев, 1989; Минеева, 2004; Цыбекмитова, Ташлыкова, 2021).

Результаты

Как и в большинстве водоемов умеренных широт, в летнее время в Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах преобладали представители отделов Chlorophyta и Bacillariophyta, на локальных участках акватории в период цветения воды – Cyanobacteria (рис. 2). Все обнаруженные виды – типичные представители фитопланктона пресных водоемов с замедленным водообменом.

Из зеленых водорослей наиболее часто в исследуемых водоемах встречались виды pp. *Scenedesmus*, *Pediastrum*, *Oocystis*, а также *Chlorella vulgaris* Beijerinck, *Staurastrum* sp.; из диатомовых – виды pp. *Nitzschia*, *Navicula*, *Melosira*, *Fragilaria*, *Pinnularia*. Цианобактерии были представлены видами *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Dolichospermum* sp., *Pseudanabaena galeata* Böcher и др. Стоит отметить, что видовое разнообразие и численность цианобактерий в Белохолуницком водохранилище были выше, чем в Омутнинском. В августе на всех участках Белохолуницкого водохранилища домини-

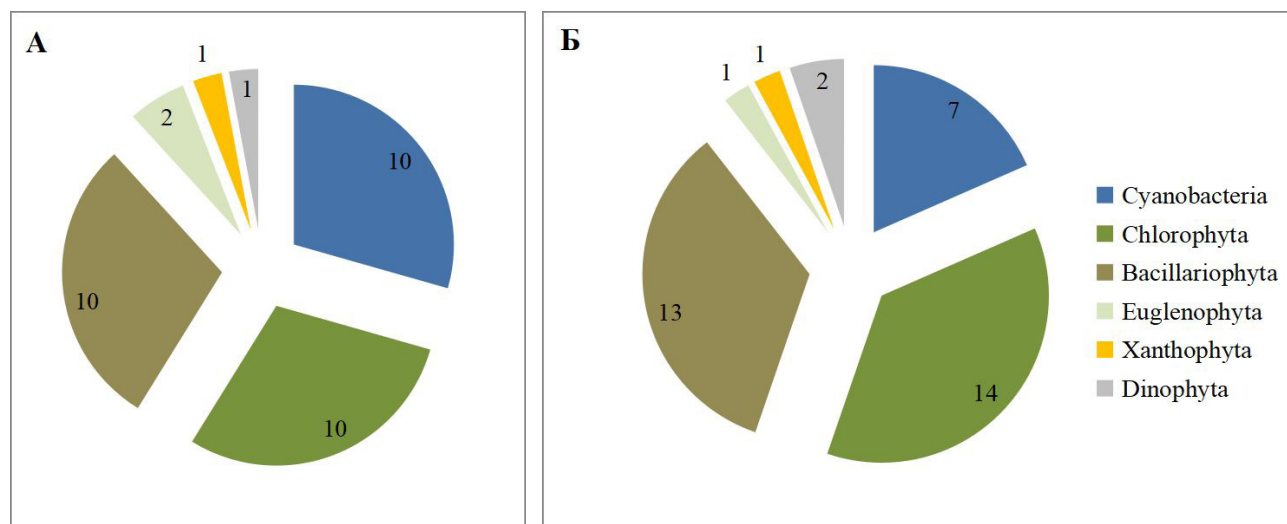


Рис. 2. Состав летнего фитопланктона Белохолуницкого (А) и Омутнинского водохранилищ (Б) в 2023 г. Цифрами обозначено количество видов в разных отделах

Fig. 2. Composition of summer phytoplankton in the Belokholunitskoye (A) and Omutninskoye reservoirs (B) in 2023. The figures indicate the number of species in different departments

нировал *Aphanizomenon flos-aquae*, вызывающая цветение воды. *Aphanizomenon flos-aquae* и *Microcystis aeruginosa* ранее неоднократно отмечены в числе доминантов цветения водохранилищ Кировской области (Штина, 1997; Кутявина и др., 2019) и других водоемов, например Ижевского водохранилища (Иванова, Шарипова, 2006), Камского (Беляева, 2014), Куйбышевского (Абрамова и др., 2019) и др. Цианотоксины, продуцируемые некоторыми видами цианобактерий и попадающие в воду при массовом их развитии, представляют опасность для человека, т. к. могут вызывать различные аллергические реакции и заболевания, такие как рак печени, боковой амиотрофический склероз, болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона (Румянцев, Крюков, 2013; Bradley et al., 2013; Белых и др., 2020; Sini et al., 2021).

По наличию в фитопланктоне видов-индикаторов сапробности была проведена оценка органического загрязнения изучаемых водоемов. Значения индекса сапробности по Пантле и Букку в модификации Сладчека в Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах составляли 2.3–2.4, что соответствовало бета-мезосапробной зоне, класс качества вод (согласно ГОСТ 17.1.3.07-82) – III, умеренно загрязненные воды. Результаты оценки качества вод по показателям фитопланктона подтвердили ранее полученные результаты оценки качества вод в изучаемых водохранилищах по трофо-сапробным показателям.

Содержание определяемых фотосинтетических пигментов и их процентное соотно-

шение в воде исследуемых водохранилищ представлены в табл. 3.

Согласно полученным результатам (см. табл. 3), содержание основного фотосинтетического пигмента (Chl *a*) на участках отбора проб фитопланктона в Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах изменялось от 4.5 до 33.5 мкг/л, в большинстве случаев составляло 9.8–10.5 мкг/л. В соответствии со шкалой трофического состояния водоемов по средней величине концентрации Chl *a*, предложенной в работе (Минеева, Макарова, 2018), Белохолуницкое и Омутнинское водохранилища занимают пограничное положение между мезотрофными и умеренно эвтрофными водоемами.

В табл. 4 представлены результаты расчета основных пигментных индексов, наиболее часто используемых отечественными и зарубежными исследователями при изучении фитопланктона водоемов.

Согласно полученным данным (см. табл. 4), значения пигментных индексов и отношения концентрации каротиноидов к концентрации Chl *a* для Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ были довольно близки между собой и соответствовали величинам, характерным для водоемов умеренных широт в конце летнего сезона.

Обсуждение

Полученные нами данные о содержании Chl *a* в воде водохранилищ Кировской области (см. табл. 3) сопоставимы с данными исследователей по водохранилищам соседних регионов. Для сравнения: среднее содержа-

Таблица 3. Среднее содержание пигментов фитопланктона в воде Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ в июле – августе 2023 г.

Часть водохранилища	Chl <i>a</i> , мкг/л (% от Σ Chl)	Chl <i>b</i> , мкг/л (% от Σ Chl)	Chl <i>c</i> ($c_1 + c_2$), мкг/л (% от Σ Chl)	Σ Chl, мкг/л	Феопитин <i>a</i> , мкг/л	<i>K</i> , мкг/л
Белохолуницкое водохранилище						
Верховье	5.8 ± 0.6 (72 %)	0.94 ± 0.09 (12 %)	1.36 ± 0.14 (17 %)	8.1 ± 0.8	-0.71	2.67 ± 0.27
Средняя	21.6 ± 2.7 (76 %)	1.14 ± 0.11 (7 %)	3.46 ± 0.35 (17 %)	26.2 ± 0.26	-6.70	10.8 ± 1.1
Приплотинная	4.5 ± 0.4 (70 %)	0.65 ± 0.07 (10 %)	1.26 ± 0.13 (20 %)	6.4 ± 0.6	-1.06	2.50 ± 0.25
Омутнинское водохранилище						
Средняя	10.5 ± 1.1 (56 %)	1.10 ± 0.11 (6 %)	7.1 ± 0.7 (38 %)	18.8 ± 1.9	-1.80	4.9 ± 0.5
Приплотинная	9.9 ± 1.0 (60 %)	1.01 ± 0.10 (6 %)	5.5 ± 0.6 (34 %)	16.4 ± 1.6	-0.94	5.2 ± 0.5

Таблица 4. Пигментные индексы фитопланктона Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ в июле – августе 2023 г.

Часть водохранилища	Пигментный индекс Маргалефа $I_{430/664}$	Пигментный индекс $I_{480/664}$	Отношение концентраций $K/Chl\ a$
Белохолуницкое водохранилище			
Верховье	2.70	1.28	0.46
Средняя	2.55	1.48	0.53
Приплотинная	2.81	1.29	0.46
Омутнинское водохранилище			
Средняя	2.54	1.41	0.50
Приплотинная	2.79	1.56	0.56

ние Chl *a* в воде ближайших к району исследования Камских водохранилищ (Камского, Воткинского, Нижнекамского и камской ветви Куйбышевского) варьирует в диапазоне от 4.2 до 82.5 мкг/л (Беляева и др., 2018), а в воде Горьковского, Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ в среднем составляет 10.9 ± 0.7; 26.7 ± 3.9 и 9.2 ± 1.0 мкг/л соответственно (Минеева и др., 2022). Относительное количество Chl *a* от суммы Chl *a*, *b*, *c* было выше в Белохолуницком водохранилище (70–76 %), чем в Омутнинском (56–60 %), но в целом оставалось довольно низким по сравнению с водохранилищами Волжского каскада, за исключением Чебоксарского водохранилища. Согласно работе (Минеева, Абрамова, 2009), относительное количество Chl *a* в воде Чебоксарского водохранилища составляет примерно 70 %, что обусловлено преобладанием в планктоне водоема диатомовых водорослей в условиях повышенной проточности.

Содержание Chl *b*, компонента зеленых и эвгленовых водорослей, в воде обоих исследуемых водоемов было довольно низким (6–12 % от суммарного содержания

хлорофиллов) и значительно уступало содержанию Chl *c*, компонентов диатомовых, золотистых, динофитовых и криптофитовых водорослей (17–38 %) (см. табл. 3). Отмечено превышение значений отношения Chl *c* к Chl *a* (c/a) над величинами соотношения Chl *b* к Chl *a* (b/a) в 2–7 раз, что, согласно работам (Беляева, 2014; Минеева, 2019), может свидетельствовать о ведущем положении в фитопланктоне диатомовых водорослей.

Суммарное содержание Chl *a*, *b*, *c* достигало максимальных значений на средних участках водоемов (см. табл. 3). Для этих участков акваторий характерны высокая доля хорошо прогреваемых мелководий и поступление питательных элементов с водосбора с неорганизованным ливневым стоком. В совокупности эти факторы оказывают стимулирующее влияние на развитие фитопланктона и, соответственно, на содержание в воде фотосинтетических пигментов фитопланктона.

Согласно результатам спектрофотометрии, для содержания феопитина *a* (неактивной формы Chl *a*) на всех исследуемых

участках водохранилищ в июле – августе 2023 г. получены отрицательные значения (см. табл. 3). Как отмечено в работе (Цыбекмитова, Ташлыкова, 2021), отрицательные величины содержания феофитина a указывают на летнюю доминирующую роль активных форм фотосинтетических пигментов в продукционных процессах.

Содержание дополнительных пигментов (каротиноидов) не превышало содержания основного пигмента (Chl a) в воде исследуемых водохранилищ (см. табл. 3). Это указывает на нормальное соотношение пигментов и свидетельствует о физиологическом благополучии фитопланктона водоемов (Беляева, 2014; Минеева, 2020).

Помимо абсолютного и относительного содержания фотосинтетических пигментов в водных объектах важное биоиндикационное значение имеют пигментные индексы, отражающие физиологическое состояние фитопланктона и развитие продукционных / деструкционных процессов в водоеме. Так, средняя величина индекса Маргалефа для исследуемых водохранилищ составила 2.7, что более характерно для фитопланктона в конце летнего периода, когда фотосинтетическая активность водорослей снижается, а в водных экосистемах в целом наблюдается преобладание процессов гетеротрофного метаболизма над автотрофным.

Еще один часто используемый индекс – $I_{480/664}$ показывает соотношение каротиноидов и хлорофилла, а также отражает условия обитания и обеспеченность фитопланктона биогенным питанием (Котовщиков, Кириллова, 2011). В исследуемых водохранилищах величина этого индекса достигала значений 1.28–1.56 отн. ед. (см. табл. 4), что было на 30–40 % выше, чем в Камских водохранилищах (Беляева и др., 2018). По величине $I_{480/664}$, отмеченной для исследуемых водохранилищ, можно судить о преобладании в фитопланктоне жизнеспособных активных клеток, а также о достаточной обеспеченности водорослей минеральным азотным питанием.

Отношение $K/Chl\ a$ в воде Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ, составлявшее в июле – августе 2023 г. в среднем 0.50 (см. табл. 4), подтверждает, что условия для развития водорослей в обоих водоемах были благоприятные. Согласно работе (Беляева, 2014), такое невысокое отношение $K/Chl\ a$ соответствует водам «хлорофильного типа» и характерно для эвтрофных водоемов.

Заключение

Таким образом, изучен фитопланктон и его пигментные характеристики в Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах Кировской области, отличающихся по степени антропогенной нагрузки и физико-химическим показателям воды. Летний фитопланктон в двух водохранилищах преимущественно состоит из представителей отделов Chlorophyta и Bacillariophyta, что является типичным для водоемов умеренных широт. В периоды цветения воды доминирующее положение на локальных участках акватории водохранилищ занимают цианобактерии, в т.ч. *Aphanizomenon flos-aquae* и *Microcystis aeruginosa*, являющиеся потенциально токсичными видами.

Впервые для Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ проведено определение пигментных характеристик фитопланктона. Среднее содержание фотосинтетических пигментов в воде исследуемых водоемов сопоставимо со значениями, характерными для водохранилищ соседних регионов (Нижегородской, Костромской областей, Республики Татарстан, Пермского края). Так, содержание хлорофилла a на разных участках акватории водохранилищ составляло от 4.5 до 33.5 мкг/л, что соответствовало 56–76 % от общего содержания хлорофиллов, содержание дополнительных пигментов хлорофиллов b и c составляло 0.65–1.14 мкг/л (6–12 %) и 1.36–7.10 мкг/л (17–38 %) соответственно. Содержание каротиноидов было ниже содержания хлорофилла a , что свидетельствовало о нормальном физиологическом состоянии фитопланктона в изучаемый период. Величины пигментных индексов $I_{430/664}$ и $I_{480/664}$ позволили сделать вывод о высоком разнообразии фитопланктона, преобладании в нем жизнеспособных активных клеток и о достаточной обеспеченности водорослей минеральным азотным питанием. Согласно оценке органического загрязнения водоемов по величине индекса сапробности Пантле и Букка в модификации Сладечека, изучаемые водохранилища соответствуют бета-мезосапробной зоне, III классу качества вод, умеренной степени загрязнения. По результатам анализа пигментных характеристик фитопланктона Белохолуницкое и Омутнинское водохранилища занимают переходное положение от мезотрофного к слабо эвтрофному трофическому типу. По состоянию на 2023 г. существенных различий в видовом составе и пигментных

характеристиках фитопланктона между изучаемыми водохранилищами не выявлено. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для сравнительной оценки изменений, происходящих в экосистемах изучаемых водохранилищ под влиянием природных и антропогенных факторов окружающей среды.

Библиография

- Абрамова К. И., Токинова Р. П., Шагидуллин Р. Р. Динамика сезонного развития альгоценоза в «Казанском» заливе Куйбышевского водохранилища // Вода: химия и экология. 2019. № 7–9. С. 62–66.
- Авакян А. Б., Салтанкин В. П., Шарапов В. А. Водохранилища. М.: Мысль, 1987. 331 с.
- Белых О. И., Тихонова И. В., Кузьмин А. В., Сороковикова Е. Г., Потапов С. А., Галкин А. В., Федорова Г. А. Токсин-продуцирующие цианобактерии в озере Байкал и водоемах Байкальского региона (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 21–27. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-1-021-027
- Беляева П. Г. Трофический статус Камского водохранилища по фитопланктону в летний период // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 5. С. 244–248.
- Беляева П. Г., Минеева Н. М., Сигарева Л. Е., Тимофеева Н. А., Макарова О. С. Содержание растительных пигментов в воде и донных отложениях водохранилищ р. Камы // Труды ИБВВ РАН. 2018. № 81 (84). С. 97–104. DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0007
- Водоросли: Справочник / С. П. Вассер, Н. В. Кондратьев, Н. П. Масюк и др. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.
- Голлербах М. М., Косинская Е. К., Полянский В. И. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 2: Синезеленые водоросли. М.: Наука, 1953. 650 с.
- ГОСТ 17.1.4.02-90 Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. 15 с.
- ГОСТ 17.1.1.02-77 Охрана природы. Гидросфера. Классификация водных объектов. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. 13 с.
- ГОСТ 17.1.2.04-77 Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. 12 с.
- ГОСТ 17.1.3.07-82 Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. 10 с.
- Дедусенко-Щеголева Н. Т., Голлербах М. М. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 5: Желтозеленые водоросли. М.; Л.: Наука, 1962. 272 с.
- Дедусенко-Щеголева Н. Т., Матвиенко А. М., Шкорбатов Л. А. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 8: Зеленые водоросли. Класс Вольвоксовые. М.; Л.: Наука, 1959. 223 с.
- Догановский А. М., Мякишева Н. В. Водный баланс и внешний водообмен озер России и сопредельных территорий // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 41. С. 63–75.
- Дымова О. В., Головки Т. К. Фотосинтетические пигменты: функционирование, экология, биологическая активность // Известия Уфимского научного центра РАН. 2018. № 3 (4). С. 5–16. DOI: 10.31040/2222-8349-2018-4-3-5-16
- Дьяконов К. Н., Аношко В. С. Мелиоративная география. М.: Изд-во МГУ, 1995. 254 с.
- Ермолаев В. И. Фитопланктон водоемов бассейна озера Сартлан. Новосибирск: Наука, 1989. 96 с.
- Забелина М. М., Киселев И. А., Прошкина-Лавренко А. И., Шешукова В. С. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 4: Диатомовые водоросли. М.: Наука, 1951. 620 с.
- Иванова Н. А., Шарипова Л. А. Состояние фитопланктона Ижевского пруда в районе водозабора МУП города Ижевска «Ижводоканал» в 2002–2005 годах // Вестник Удмуртского университета. 2006. № 10. С. 17–24.
- Котовщиков А. В., Кириллова Т. В. Пространственная неоднородность и динамика пигментных характеристик фитопланктона гипергалинного озера Большое Яровое // Мир науки, культуры, образования. 2011. № 6 (31). С. 422–428.
- Кутявина Т. И., Ашихмина Т. Я., Кондакова Л. В. Применение комплекса наземных методов исследования для диагностики загрязнения и процессов эвтрофирования водохранилищ Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 44–52. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-044-052
- Минеева Н. М. Пигментный состав фитопланктона и его многолетняя динамика в водохранилищах Верхней Волги // Вопросы современной альгологии. 2020. № 2 (23). С. 74–78. DOI: 10.33624/2311-0147-2020-2(23)-74-78
- Минеева Н. М. Растительные пигменты в воде Волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004. 156 с.
- Минеева Н. М. Содержание фотосинтетических пигментов в водохранилищах Верхней Волги (2005–2016 гг.) // Биология внутренних вод. 2019. № 2. С. 33–41. DOI: 10.1134/S0320965219020104

- Минеева Н. М., Абрамова Н. Н. Пигменты фитопланктона как показатели экологического состояния Чебоксарского водохранилища // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 5. С. 588–596.
- Минеева Н. М., Макарова О. С. Содержание хлорофилла как показатель современного (2015–2016 гг.) трофического состояния водохранилищ Волги // Биология внутренних вод. 2018. № 3. С. 107–110. DOI: 10.1134/S0320965218030129
- Минеева Н. М., Поддубный С. А., Степанова И. Э., Цветков А. И. Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона водохранилищ Средней Волги // Биология внутренних вод. 2022. № 6. С. 640–651. DOI: 10.31857/S0320965222060158
- Одум Ю. Основы экологии / Под ред. Н. П. Наумова. М.: Мир, 1975. 741 с.
- Румянцев В. А., Крюков Л. Н. «Цветение» воды – угроза экологической безопасности // Известия Русского географического общества. 2013. Т. 145, № 2. С. 1–9.
- Царенко П. М. Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР / АН УССР. Институт ботаники им. Н. Г. Холодного; Отв. ред. Г. М. Паламарь-Мордвинцева. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
- Цыбекмитова Г. Ц., Ташлыкова Н. А. Оценка экологического состояния Харанорского водохранилища по фитопланктону и его пигментным характеристикам // Принципы экологии. 2021. № 1. С. 90–102. DOI: 10.15393/j1.art.2021.10842
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
- Штина Э. А. Флора водорослей бассейна реки Вятки. Киров: Кировская областная типография, 1997. 96 с.
- Флора водоростей водоем України. Том I. Синьозелені водорості. Вип. 1. Порядок хроококальні / О. И. Коваленко. Київ: Инст. бот. ім. М. Г. Холодного НАН України, 2009. 397 с.
- Bradley W. G., Borenstein A. R., Nelson L. M., Codd G. A., Rosen B. H., Stommel E. W., Cox P. A. Is exposure to cyanobacteria an environmental risk factor for amyotrophic lateral sclerosis and other neurodegenerative diseases? // Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener. 2013. Vol. 14, No 5–6. P. 325–333. DOI: 10.3109/21678421.2012.750364
- Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication. Galway: National University of Ireland, 2023. URL: <https://www.algaebase.org> (дата обращения: 02.05.2024).
- Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochem. Physiol. Pflanzen (BPP). 1975. Vol. 167. P. 191–194. DOI: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3
- Komarek J. Cyanoprokaryota. Teil 1: Chroococcales / J. Komarek, K. Anagnostidis // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19/1. Jena; Stuttgart; Lübeck; Ulm., 1998. 548 p.
- Komarek J. Cyanoprokaryota. Teil 2: Oscillatoriales / J. Komarek, K. Anagnostidis // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19/2. München, 2005. 759 p.
- Margalef R. Correlations entre certains caractères synthétiques des populations de phytoplankton // Hydrobiologia. 1961. No 18. P. 155–164. DOI: 10.1007/BF00208088
- Sini P., Dang T. B. C., Fais M., Galioto M., Padedda B. M., Lugliè A., Iaccarino C., Crosio C. Cyanobacteria, cyanotoxins, and neurodegenerative diseases: Dangerous liaisons // Int. J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22. Article No 8726. DOI: 10.3390/ijms22168726

Благодарности

Автор выражает благодарность д. б. н., профессору кафедры экологии и природопользования Вятского государственного университета Л. В. Кондаковой за определение видового состава фитопланктона.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-77-01034).

PIGMENT CHARACTERISTICS OF PHYTOPLANKTON IN THE BELOKHOLUNITSKOYE AND O MUTNINSKOYE RESERVOIRS

KUTYAVINA Tatyana Igorevna *PhD, Vyatka State University, 610000, Russia, Kirov, Moskovskaya st., 36, kutyavinati@gmail.com*

Keywords:
reservoir
phytoplankton
cyanobacteria
pigments
chlorophyll
carotenoids
trophic status

Summary: In order to assess the ecological and trophic state of the two largest reservoirs in the Kirov region (Belokholunitskoye and Omutninskoye) experiencing different anthropogenic loads, the study of the species composition of phytoplankton and the determination of its pigment characteristics was carried out. It is noted that the phytoplankton of the studied reservoirs is mainly represented by green algae and diatoms, but cyanobacteria occupy a dominant position during the flowering period. According to the value of Pantle and Bucc saprobity index in the Sladeczek modification, both reservoirs correspond to the beta-mesosaprobic zone, water quality class III – moderately polluted waters. During the study conducted in the summer of 2023, for the first time the content of chlorophylls (a, b, c), pheophytin and carotenoids was determined for the studied reservoirs. In the Belokholunitskoye reservoir, the total content of chlorophylls was 6.4–26.2 µg/l, carotenoids – 2.5–10.8 µg/l; in the Omutninskoye reservoir 16.4–18.8 and 4.9–5.2 µg/l, respectively. The proportion of the main phytoplankton pigment – chlorophyll a – from the total content of chlorophylls (a, b, c) in the Belokholunitskoye reservoir was 70–76 %, in the Omutninskoye reservoir – 56–60 %. According to the average concentration of chlorophyll a (9.8–10.5 µg/l), the studied reservoirs occupy a borderline position between mesotrophic and moderately eutrophic reservoirs. For the pheophytin content, negative values were obtained in all cases; this indicates the summer dominant role of active forms of photosynthetic pigments in production processes. The ratio of carotenoids to the content of chlorophyll a averages 0.50 for all studied areas; this demonstrates favorable conditions for the development of phytoplankton and corresponds to “chlorophyll-type” waters characteristic of eutrophic reservoirs. The calculated values of the pigment indices I430/664 (Margalef index) and I480/664 are 2.5–2.8 and 1.3–1.6 rel. units, respectively, show a high diversity of planktonic algocenosis, the predominance of viable active cells in it and sufficient provision of algae with mineral nitrogen nutrition. Accordingly, they indicate a high diversity of planktonic algocenosis, the predominance of viable active cells in it, and a sufficient supply of algae with mineral nitrogen nutrition. No significant differences in the composition of phytoplankton and its pigment characteristics were found between the studied water bodies.

Reviewer: E. U. Mitrofanova

Received on: 05 March 2024

Published on: 03 June 2024

References

- Abramova K. I. Tokinova R. P. Shagidullin R. R. Dynamics of seasonal development of algocenosis in the «Kazan» Bay of the Kuibyshev reservoir, Voda: himiya i ekologiya. 2019. No. 7–9. P. 62–66.
- Algae flora of water bodies of Ukraine. Tom I. Sin'ozeleni vodorosti. Vip. 1. Poryadok hrookokal'ni, O. I. Kovalenko. Kiiiv: Inst. bot. im. M. G. Holodnogo NAN Ukraïni, 2009. 397 p.
- Avakyan A. B. Saltankin V. P. Sharapov V. A. Reservoirs. M.: Mysl', 1987. 331 p.
- Belyaeva P. G. Mineeva N. M. Sigareva L. E. Timofeeva N. A. Makarova O. S. The content of plant pigments in the water and bottom sediments of the reservoirs of the Kama River, Trudy IBVV RAN. 2018. No. 81 (84). P. 97–104. DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0007
- Belyaeva P. G. Trophic status of the Kama reservoir for phytoplankton in summer, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2014. T. 16, No. 5. P. 244–248.
- Belyh O. I. Tihonova I. V. Kuz'min A. V. Sorokovikova E. G. Potapov S. A. Galkin A. V. Fedorova G. A. Toxin-producing cyanobacteria in Lake Baikal and reservoirs of the Baikal region (review), Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2020. No. 1. P. 21–27. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-1-021-027
- Bradley W. G., Borenstein A. R., Nelson L. M., Codd G. A., Rosen B. H., Stommel E. W., Cox P. A. Is exposure to cyanobacteria an environmental risk factor for amyotrophic lateral sclerosis and other

- neurodegenerative diseases?, Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener. 2013. Vol. 14, No 5–6. P. 325–333. DOI: 10.3109/21678421.2012.750364
- Carenko P. M. A brief determinant of chlorococcal algae of the Ukrainian SSR, AN USSR. Institut botaniki im. N. G. Holodnogo; Otv. red. G. M. Palamar'-Mordvinceva. Kiev: Naukova dumka, 1990. 208 p.
- Cybekmitova G. C. Tashlykova N. A. Assessment of the ecological state of the Kharanor reservoir by phytoplankton and its pigment characteristics, Principy ekologii. 2021. No. 1. P. 90–102. DOI: 10.15393/j1.art.2021.10842
- D'yakonov K. N. Anoshko V. S. Reclamation geography. M.: Izd-vo MGU, 1995. 254 p.
- Doganovskiy A. M. Myakisheva N. V. Water balance and external water exchange of lakes in Russia and adjacent territories, Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. 2015. No. 41. P. 63–75.
- Dymova O. V. Golovko T. K. Photosynthetic pigments: functioning, ecology, biological activity Photosynthetic pigments: functioning, ecology, biological activity, Izvestiya Ufimskogo nauchnogo centra RAN. 2018. No. 3 (4). P. 5–16. DOI: 10.31040/2222-8349-2018-4-3-5-16
- Ermolaev V. I. Phytoplankton of water bodies of the Sartlan Lake basin. Novosibirsk: Nauka, 1989. 96 p.
- Gollerbah M. M. Kosinskaya E. K. Polyanskiy V. I. SR. Definitel of freshwater algae of the USSR. Vyp. 2: Blue-green algae. M.: Nauka, 1953. 650 p.
- Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication. Galway: National University of Ireland, 2023. URL: <https://www.algaebase.org> (data obrascheniya: 02.05.2024).
- Ivanova N. A. Sharipova L. A. The state of phytoplankton of Izhevsk pond in the area of the Municipal Unitary Enterprise of Izhevsk, Vestnik Udmurtskogo universiteta. 2006. No. 10. P. 17–24.
- Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton, Biochem. Physiol. Pflanzen (BPP). 1975. Vol. 167. P. 191–194. DOI: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3
- Komarek J. Cyanoprokaryota. Teil 1: Chroococcales, J. Komarek, K. Anagnostidis, Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19/1. Jena; Stuttgart; Lübeck; Ulm., 1998. 548 p.
- Komarek J. Cyanoprokaryota. Teil 2: Oscillatoriales, J. Komarek, K. Anagnostidis, Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19/2. München, 2005. 759 p.
- Kotovschikov A. V. Kirillova T. V. Spatial heterogeneity and dynamics of pigment characteristics of phytoplankton of the Bolshoe Yarovoye hypergaline lake, Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya. 2011. No. 6 (31). P. 422–428.
- Kutyavina T. I. Ashihmina T. Ya. Kondakova L. V. Application of a complex of ground-based research methods for the diagnosis of pollution and eutrophication processes in reservoirs of the Kirov region, Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2019. No. 2. P. 44–52. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-044-052
- Margalef R. Correlations entre certains caractères synthétiques des populations de phytoplankton, Hydrobiologia. 1961. No 18. P. 155–164. DOI: 10.1007/BF00208088
- Mineeva N. M. Abramova N. N. Phytoplankton pigments as indicators of the ecological state of the Cheboksary reservoir, Vodnye resursy. 2009. T. 36, No. 5. P. 588–596.
- Mineeva N. M. Makarova O. S. Chlorophyll content as an indicator of the current (2015–2016) trophic state of the Volga reservoirs, Biologiya vnutrennih vod. 2018. No. 3. P. 107–110. DOI: 10.1134/S0320965218030129
- Mineeva N. M. Poddubnyy S. A. Stepanova I. E. Cvetkov A. I. Abiotic factors and their role in the development of phytoplankton in reservoirs of the Middle Volga, Biologiya vnutrennih vod. 2022. No. 6. P. 640–651. DOI: 10.31857/S0320965222060158
- Mineeva N. M. Pigment composition of phytoplankton and its long-term dynamics in reservoirs of the Upper Volga, Voprosy sovremennoy al'gologii. 2020. No. 2 (23). P. 74–78. DOI: 10.33624/2311-0147-2020-2(23)-74-78
- Mineeva N. M. Plant pigments in the water of the Volga reservoirs. M.: Nauka, 2004. 156 p.
- Mineeva N. M. The content of photosynthetic pigments in reservoirs of the Upper Volga (2005–2016), Biologiya vnutrennih vod. 2019. No. 2. P. 33–41. DOI: 10.1134/S0320965219020104
- Nature conservation. The hydrosphere. Classification of water bodies. M.: IPK Izd-vo standartov, 1998. 13 p.
- Nature conservation. The hydrosphere. Indicators of the condition and rules of taxation of fishery water bodies. M.: IPK Izd-vo standartov, 2000. 12 p.
- Nature conservation. The hydrosphere. Rules for water quality control of reservoirs and watercourses. M.: IPK Izd-vo standartov, 2001. 10 p.
- Odum Yu. Fundamentals of ecology, Pod red. N. P. Naumova. M.: Mir, 1975. 741 p.
- Rumyanov V. A. Kryukov L. N. «Blooming» of water is a threat to environmental safety, Izvestiya Russkogo geograficheskogo obschestva. 2013. T. 145, No. 2. P. 1–9.
- Schegoleva N. T. Gollerbah M. M. SR. Definitel of freshwater algae of the USSR. Vyp. 5: Blue-green algae. M.; L.: Nauka, 1962. 272 p.

- Schegoleva N. T. Matvienko A. M. Shkorbatov L. A. SR. Definitel of freshwater algae of the USSR. Vyp. 8: Green algae. Class Volvox. Chlorophyta: Volvocineae. M.; L.: Nauka, 1959. 223 p.
- Seaweed: Guide, P. P. Vasser, N. V. Kondrat'ev, N. P. Masyuk i dr. Kiev: Naukova dumka, 1989. 608 p.
- Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Zinchenko T. D. Quantitative hydroecology: methods of system identification. Tol'yatti: IEVB RAN, 2003. 463 p.
- Shtina E. A. Algae flora of the Vyatka River basin. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 1997. 96 p.
- Sini P., Dang T. B. C., Fais M., Galioto M., Padedda B. M., Lugliè A., Iaccarino C., Crosio C. Cyanobacteria, cyanotoxins, and neurodegenerative diseases: Dangerous liaisons, *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22. Article No 8726. DOI: 10.3390/ijms22168726
- Water. The method of spectrophotometric determination of chlorophyll a. M.: IPK Izd-vo standartov, 2001. 15 p.
- Zabelina M. M. Kiselev I. A. Lavrenko A. I. Sheshukova V. S. SR. Definitel of freshwater algae of the USSR. Vyp. 4: Diatoms. M.: Nauka, 1951. 620 p.



УДК 574.1

ЭКОЛОГО-ФЛОРИСТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФИТОПЛАНКТОНА В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ НА КАСКАДЕ ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

ЛАЗАРЕВА
Галина Александровна

кандидат биологических наук, Государственный университет «Дубна», 141980, Россия, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19, lazarevg@mail.ru

ПОТЮТКО
Олег Михайлович

кандидат биологических наук, ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля», 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, oleg.potyutko@gmail.com

Ключевые слова:

гидробиологический мониторинг
качественные характеристики
фитопланктона
каскад Волжских водохранилищ

Аннотация: В работе обобщены результаты многолетних наблюдений за состоянием фитопланктона в контактной зоне на каскаде Волжских водохранилищ в период 2014–2018 гг., проведенных сетью гидробиологических лабораторий Росгидромет. Исследован каскад сменяющих друг друга водных объектов различных типов, лежащих в различных географических зонах и характеризующихся различными гидрологическими факторами и интенсивностью антропогенной нагрузки. Проведен сравнительный анализ качественных и количественных характеристик фитопланктона контактной зоны вдоль русла реки Волги и ее водохранилищ, выявлены основные структурные характеристики фитопланктонного сообщества. Встречено 358 видов и вариаций фитопланктона, среди которых традиционно по числу видов преобладали диатомовые – 139 и зеленые водоросли – 133 вида; значительным видовым разнообразием обладали цианобактерии – 36 и эвгленовые – 24 вида; остальные отделы были представлены единичными видами: динофитовые – 5, золотистые – 13, криптофитовые – 7. Из желто-зеленых водорослей был встречен один вид.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 13 мая 2023 года

Подписана к печати: 02 мая 2024 года

Введение

Волга – один из важнейших водных объектов Европы и одна из 7 самых крупных рек мира. Длина Волги до создания каскада водохранилищ составляла 3690 км, площадь водосбора достигает 1.36 млн км². Среднегодовой сток – 9900 м³/с, что характеризует ее как наиболее многоводную реку России. Всего на территории водосбора располагается более 150000 притоков, из них более 200 крупных значимых притоков. Непосредственно в Волгу и ее водохранилища

впадает 2600 рек. Воды Волги широко используются для хозяйственных нужд: от источника питьевой воды и рыбного промысла до производства электроэнергии на ГЭС. В результате широко развернувшегося гидростроительства бассейн превращен в каскад водохранилищ (Фортунатов, 1978).

Волга и ее притоки играют огромное значение в хозяйственной и рекреационной жизни человека, населяющего их берега. Антропогенная нагрузка, оказываемая на биоценозы исследуемых акваторий, имеет

продолжительную историю, насчитывающую многие тысячелетия, начиная с момента формирования на их берегах первых поселений и заканчивая сегодняшним днем. Уровень антропогенной нагрузки на водотоки постоянно возрастал, от вылова рыбных ресурсов и бытовых стоков до современного зарегулирования водотока и превращения его в каскад сообщающихся между собой водоемов искусственного происхождения. Очевидно, что исследованию этих процессов посвящено сложно обозримое количество работ, учитывая то, что Волга и ее притоки являются самыми густонаселенными водными объектами России. В настоящее время из существующих комплексных исследований каскада Волжских водохранилищ наиболее полные сведения о состоянии фитопланктона представлены в работах Л. Г. Корневой (2015). В обобщающей работе Г. М. Лаврентьевой (1977) проанализированы данные разных авторов за период 1956–1975 гг. Данные по фитопланктону Горьковского водохранилища приводятся в работах А. Г. Охупкина с соавторами (1997), Г. А. Лазаревой (2005). Результаты первичных исследований этого водохранилища отражены в работе А. Д. Приймаченко (1961), исследовавшего структурно-функциональные особенности фитопланктона в нижнеречной и озерной частях в 1956–1957 гг. Исследования фитопланктона Волги в районе затопления Чебоксарского водохранилища (1978–1980 гг.) проведены А. Г. Охупкиным (1994) и Г. А. Лазаревой (2005). Состав планктона нижнего течения р. Оки (вблизи Нижнего Новгорода) описан А. Г. Охупкиным с соавторами (2010). В работах В. Н. Паутовой (Паутова, Попченко, 2001; Паутова и др., 2009) изучены диатомовые водоросли планктона Куйбышевского водохранилища, в работе Н. Г. Тарасовой, Т. Н. Бурковой – фитопланктон водохранилища (2010). Результаты исследования фитопланктона Саратовского водохранилища представлены в работе И. И. Попченко (2001); Е. С. Кривина, Н. Г. Тарасова приводят данные наблюдений 2006–2007 гг. (2013). В работах Н. А. Зеленовской представлены результаты исследований Волгоградского водохранилища (2010, 2019). О. С. Решетняк с соавторами (2013) описывают характерные особенности многолетней сукцессии фитопланктона в низовьях Волги.

Антропогенную эвтрофикацию водных объектов можно подразделить на активную – непосредственный сброс в водную среду сточных вод и пассивную – возникающую

в результате зарегулирования водотоков, в связи с чем происходит замедление скорости течения водотока, изменяется скорость течения гидрологических и гидрохимических процессов: осаждение минеральных взвесей, большая прогреваемость водной толщи, изменение кислородного режима, щелочной реакции среды и прочих характеристик, активно влияющих на формирование условий среды обитания гидробионтов. Ощутимый вклад в загрязнение водотоков вносят и загрязнения, поступающие в водотоки по средствам диффузного стока с полей и поступающие в прибрежную (контактную зону) водного объекта. В ответ на эти изменения в гидробиологических сообществах происходит изменение качественного и количественного состава, трофических связей и продуктивности экосистем.

Контактная зона является многократной границей пересечения поверхностей раздела различных сред с большой изменчивостью физико-химических и гидрофизических параметров. Она находится под влиянием дождевого и диффузного стоков, а также испытывает антропогенное воздействие, начиная от неконтролируемого стока удобрений аграрного комплекса и заканчивая рекреационной нагрузкой, свойственной всем водным объектам в летний период.

С вводом в эксплуатацию ГЭС на р. Волге произошло стремительное изменение гидрологических, гидрохимических и гидробиологических параметров вод самой Волги, а также питающих ее притоков, вплоть до исчезновения малых рек выше плотин, кринальные водотоки и малые реки исчезли вовсе. Формирование акваторий водохранилищ привело к экологической перестройке в сообществах от риофильных к риолимнофильным и лимнофильным как выше гидроузлов, так и ниже. Эти процессы требуют углубленного изучения и многолетнего мониторинга на высоком таксономическом и экологическом уровнях для оценки нанесенного экологического ущерба и нахождения путей восстановления биологического потенциала экосистемы реки.

Основными источниками антропогенного загрязнения реки в настоящее время служат предприятия различных профилей, существенно увеличился сток бытовых отходов, поступающих от городов и поселков. С 1986 г. и по настоящее время на Волге в районе городов Чкаловск, Балахна, Нижний Новгород, Набережные Челны, Казань, Ульяновск, Тольятти, Самара, Новокуйбышевск, Сыз-

рань, Балаково, Астрахань, Камызяк, а также на притоках Ока, Теша, Кудьма, Вятка, Зай, Казанка, Сок, Большой Кинель, Кондурча, Самара, Кривуша, Чапаевка, Чагра, Падовка, рукавах Ахтуба, Бузан, Кривая Болда, Камызяк для предупреждения возникновения неблагоприятных экологических последствий проводится государственный экологический мониторинг в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 6 июня 2013 г. № 477 «Об осуществлении государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды». Однако специфика таких наблюдений заключается в неизменности методов отбора и обработки материала, она не учитывает современного систематического статуса видов (Буйволов и др., 2016).

Приведенный выше обзор свидетельствует о том, что флористическая оценка описываемого участка р. Волги изучена достаточно подробно, однако нет полной картины формирования сообществ фитопланктона в прибрежных акваториях, которые служат первичным биофильтром загрязнения, поступающего с диффузным стоком, и сильнее всего подвержены антропогенной нагрузке, являясь, по сути, контактной зоной водного объекта. Они подвержены наибольшему антропогенному воздействию. В существующих исследованиях сведения об оценке качества вод крайне противоречивы. Они фактически не затрагивают прибрежных акваторий. К сожалению, ни одна из перечисленных выше работ не рассматривает прибрежные сообщества фитопланктона, а контактная зона, подверженная интенсивному антропогенному воздействию, не изучена вовсе. Это определило цель данной работы – дать эколого-флористическую характеристику фитопланктона контактных зон каскада Волжских водохранилищ, определить и уточнить современный состав флоры фитопланктона контактных зон.

Материалы

Материалом нашей работы послужили данные, полученные при проведении мониторинга фитопланктона контактных зон 5 водохранилищ Волжского бассейна: Горьковского, Чебоксарского, Куйбышевского, Саратовского, Волгоградского, а также 16 притоков, питающих эти водохранилища: Кудьма, Теша, Ока, Сок, Кондурча, Самара, Большой Кинель, Падовка, Чапаевка, Кривуша, Съезжая, Чагра, Вятка, Казанка, Степной Зай, Бугульминский Зай, 5 рукавов дельты

Волги: Камызяк, Кривая Болда, Бузан, Ахтуба и Кигач. Кроме того, регулярные наблюдения производятся на озере Средний Кабан (Попов, Потютко, 2021).

Методы

Пробы фитопланктона отбирали батометром Руттнера в прибрежной зоне водных объектов в верхнем горизонте 0.0–0.5 м. Общий объем пробы – 1 л. Отобранные пробы консервировали фиксатором Кузьмина (Кузьмин, 1975). Для подсчета качественных и количественных показателей фитопланктона пробы сгущались стандартным методом седиментации (Руководство..., 1992). Водоросли просчитывали под микроскопом Carl Zeiss AxioLab в камере Нажотта объемом 0.005 мл в проходящем свете (увеличение в 400–640 раз). Качественный состав определен на 92 % до уровня вида и лишь в 8 % до уровня рода.

Идентификацию качественного состава альгофлоры проводили по «Определителю пресноводных водорослей СССР» (Забелина, Мейер, 1953; Голлербах и др., 1953; Дедусенко-Щеголева, Голлербах, 1962; Паламарь-Мордвинцева, 1982; Мошкова, Голлербах, 1986; Водоросли..., 2006; Диатомовые водоросли..., 2002), а также Tikkanen, 1986. Для определения современного статуса видов были использованы международные базы данных AlgaeBase (<https://www.algaebase.org>) и GBIF (<https://www.gbif.org>).

В настоящей работе счетные единицы и методика расчета их объемов были выбраны в соответствии с рекомендациями ХЕЛКОМ (HELCOM, 1988). Вычисления биомассы фитопланктона проводились с определением объема клеток различных видов водорослей методом геометрического подобия (форма клеток приравнивается к близкому геометрическому телу, по формулам, известным из стереометрии, вычислялся их биобъем), при этом плотность (удельный вес) водорослей условно принималась равной единице. К доминирующим относили виды и группы видов водорослей, составлявшие более 10 % от общей биомассы. Для оценки пространственного распределения рассчитывали частоту встречаемости F (%), вычисляемой как отношение количества станций, на которых был встречен вид, к общему числу станций. Данные по экологии и распространению видов взяты из монографии «Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги» (Корнева, 2015).

Результаты

В контактных зонах исследуемых акваторий (по данным наблюдений за 2014–2018 гг.) в составе фитопланктона встречено 358 видов, подвидов и вариаций, среди которых традиционно наибольшее видовое разнообразие принадлежало диатомовым (Bacillariophyceae) – 139 видов (38.8 % от общего числа видов, определенных за указанный период) и зеленым (Chlorophyceae) – 133 вида (37.2 %). Меньшим видовым разнообразием отличаются цианобактерии (Cyanophyceae) – 36 видов (10.1 %) и эвгленовые (Euglenophyceae) – 24 (6.7 %). Единичные виды встречены среди динофитовых (Dinophyceae) – 5 (1.4 %), криптофитовых (Cryptophyceae) – 7 (1.9 %) и золотистых (Chrysophyceae) – 13 (3.6 %) водорослей. За весь период исследований был встречен единственный вид желто-зеленых (Xanthophyceae).

Наибольшее число видов отмечено в Куйбышевском (139) и Чебоксарском (126) водохранилищах. В Саратовском, Волгоградском и Горьковском водохранилищах встречено минимальное число видов – 117, 113 и 108 соответственно. Таким образом, на флористическое богатство планктона водохранилищ влияют не только площади мелководий, но и наличие крупных притоков. Среди водотоков наибольший качественный состав отмечен для рек Ока (128 видов) и Самара (109 таксонов).

В целом в исследованной акватории основу фитопланктона формируют диатомовые и зеленые водоросли, их доля в качественном составе составила 39 и 37 % от общего числа встреченных видов. При этом в Горьковском и Чебоксарском водохранилищах, а также в исследованных реках Верхней Волги зеленые водоросли преобладают и составляют от 40 до 61 % от общего числа встреченных видов, диатомовые водоросли составляли лишь 23–39 %. В Куйбышевском, Саратовском и Волгоградском водохранилищах, а также водотоках Нижней Волги и большинстве рек по числу видов доминируют диатомовые (41–59 % от общего списка видов водоема), доля зеленых водорослей составляет от 16 до 36 %. Таким образом, число зеленых водорослей постепенно снижается от Верхней и Средней к Нижней Волге, а число видов диатомовых возрастает. Вклад цианобактерий в видовом разнообразии Верхней и Средней Волги составляет около 5 %, максимальное их разнообразие характерно для

Нижней Волги – в среднем 10 %. Остальные классы водорослей представлены менее чем 10 % от общего качественного состава фитопланктона акваторий.

Число общих видов водорослей, обнаруженных в контактной зоне всех исследованных водных объектов, ограничено лишь двумя видами: диатомовые *Stephanodiscus hantzschii* Grunow, *Nitzschia acicularis* (Kützinger) W. Smith.

По Одуму (1975), вид считается обязательным для данной территории, если его содержат более 50 % выборок, второстепенным – от 25 до 50 %, случайным, если он найден менее чем в 25 % выборок. Поскольку каждая проба фитопланктона представляет собой случайную выборку из генеральной совокупности, авторы избрали этот подход для предварительной классификации. Исследованная зона является контактной, для нее характерно развитие макрофитов (Потютко, 2016) с различной степенью зарастания, что приводит к замедлению поверхностных течений и высокой прогреваемости вод, в которых произведены исследования, в то же время диффузные и дождевые стоки вызывают эффект «разбавления», что, в свою очередь, совместно с активным ветровым переносом и градиентными течениями приводит к мозаичности распределения фитопланктона в прибрежной зоне. Поэтому для наиболее детального анализа флоры мы подразделяем обязательные виды на доминирующие – более 50 % частоты встречаемости, преобладающие – в диапазоне от 25 до 50 %, характерные – 20–25 %, сопутствующие – 10–20 %, а к случайным относим те, что встречаются менее чем в 10 % проб.

По частоте встречаемости в материале, собранном в контактных зонах гидрографического района, доминировали 4 вида водорослей от 50 до 86 %, из которых в 86 % проб встречен лишь 1 вид (*Stephanodiscus hantzschii* Grunow), остальные представители доминантного комплекса встречались в каждой второй пробе (50–68 %). Среди доминирующих видов – представители диатомовых – 4 вида (*Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen, *Stephanodiscus hantzschii* Grunow, *Skeletonema subsalsum* (A. Cleve) Bethge, *Nitzschia acicularis* (Kützinger) W. Smith), 2 вида зеленых (*Monoraphidium contortum* (Thuret) Komárková-Legnerová, *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Brébisson), по 1 виду криптофитовых (*Komma caudata* (L. Geitler) D. R. A. Hill) и цианобактерий (*Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault).

К преобладающим нами отнесено 15 видов, их частоты варьировали от 27 до 47 %. Из них 8 видов – диатомовые (*Aulacoseira islandica* (O. Müller) Simonsen, *A. subarctica* (O. Müller) E. Y. Haworth, *Stephanocyclus meneghinianus* (Kützing) Kulikovskiy, Genkal & Kociolek 2022, *Melosira varians* C. Agardh, *Stephanodiscus binderanus* (Kützing) Krieger, *S. Minutulus* (Kützing) Cleve & Möller, *Synedra acus* Kützing, *Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère 2001), 3 вида зеленых (*Actinastrum hantzschii* Lagerheim, *Coelastrum microporum* Nägeli, *Mucidosphaerium pulchellum* (H. C. Wood) C. Bock, Proschold & Krienitz 2011), 2 вида цианобактерий (*Planktolyngbya limnetica* (Lemmermann) Komárková-Legnerová & Cronberg 1992, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing) и по 1 виду криптофитовых (*Cryptomonas ovate* Ehrenberg) и золотистых (*Chrysococcus biporus* Skuja).

К характерным видам, с частотами от 20 до 25 %, отнесены 11 видов, 5 из которых принадлежат к отделу диатомовых (*Asterionella formosa* Hassall, *Aulacoseira distans* (Ehrenberg) Simonsen, *Cocconeis placentula* Ehrenberg, *Navicula exigua* (W. Gregory) Grunow, *Nitzschia holsatica* Hustedt), 4 вида зеленых (*Monoraphidium griffithii* (Berkeley) Komarkova-Legnerova, *Pediastrum*

duplex Meyen, *Desmodesmus opoliensis* (P. G. Richter) E. Hegewald, *Tetrastrum staurogeniiforme* (Schröder) Lemmermann), 2 вида криптофитовых (*Cryptomonas marssonii* Skuja, *C. ovata* Ehrenberg).

К группе сопутствующих видов, с частотами встречаемости 10–20 %, следует отнести 20 видов диатомовых водорослей, 24 вида зеленых, 4 вида цианобактерий и 1 вид эвгленовых.

В Горьковском водохранилище по частоте встречаемости доминировали 15 видов водорослей (табл. 1), среди которых в каждой пробе встречалось 4 вида – по 2 вида диатомовых (*Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen, *A. subarctica* (O. Müller) E. Y. Haworth), 2 вида цианобактерий (*Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing). К преобладающим отнесено 9 видов, из них 5 видов диатомовых, 3 вида зеленых и 1 вид цианобактерий. К характерным видам отнесено 9 видов, из них 2 вида диатомовых, 5 видов зеленых и по 1 виду криптофитовых и эвгленовых. К группе сопутствующих видов следует отнести 49 видов, из них 20 диатомовых водорослей, 24 вида зеленых, 4 вида цианобактерий и 1 вид

Таблица 1. Частоты встречаемости видов водорослей в контактной зоне Горьковского водохранилища

Виды	P, %
<i>Asterionella Formosa</i> Hassall, <i>Aulacoseira granulate</i> (Ehrenberg) Simonsen, <i>A. islandica</i> (O. Müller) Simonsen, <i>A. subarctica</i> (O. Müller) E. Y. Haworth, <i>Stephanocyclus meneghinianus</i> (Kützing) Kulikovskiy, Genkal & Kociolek 2022, <i>Skeletonema subsalsum</i> (A. Cleve) Bethge, <i>Stephanodiscus binderanus</i> (Kützing) Krieger, <i>S. hantzschii</i> Grunow, <i>S. minutulus</i> (Kützing) Cleve & Möller, <i>Thalassiosira inserta</i> I. V. Makarova, <i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komárková-Legnerová, <i>Chrysococcus biporus</i> Skuja, <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> Ralfs ex Bornet & Flahault, <i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing, <i>Komma caudata</i> (L. Geitler) D. R. A. Hill	50–100
<i>Actinocyclus normanii</i> (W. Gregory ex Greville) Hustedt, <i>Aulacoseira distans</i> (Ehrenberg) Simonsen, <i>Diatoma elongata</i> (Lyngbye) C. Agardh, <i>Melosira varians</i> C. Agardh, <i>Coelastrum microporum</i> Nägeli, <i>Scenedesmus intermedius</i> var. <i>bicaudatus</i> Hortobágyi, <i>S. quadricauda</i> (Turpin) Brébisson, <i>Dolichospermum perturbatum</i> (H. Hill) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, nom. Inval.	27–46
<i>Staurosira construens</i> Ehrenberg, <i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) Compère, <i>Mucidosphaerium pulchellum</i> (H. C. Wood) C. Bock, Proschold & Krienitz, <i>Eudorina elegans</i> Ehrenberg, <i>Monoraphidium griffithii</i> (Berkeley) Komárková-Legnerová, <i>Pandorina morum</i> (O. F. Müller) Bory, <i>Desmodesmus intermedius</i> (Chodat) E. Hegewald, <i>Cryptomonas marssonii</i> Skuja, <i>Trachelomonas volvocina</i> (Ehrenberg) Ehrenberg	20–24

В Чебоксарском водохранилище доминировало 20 видов водорослей (табл. 2), из которых в 100 % проб встречались 2 вида – 1 вид диатомовых (*Stephanodiscus minutulus* (Kützing) Cleve & Möller), 1 вид криптофитовых (*Komma caudate* (L. Geitler) D. R. A. Hill). Всего среди доминирующих видов диатомовых – 11, зеленых – 6, цианобактерий – 2, криптофитовых – 1 вид. К преобладающим

относятся 27 видов, из них 6 видов диатомовых, 18 видов зеленых водорослей и 1 вид цианобактерий. К характерным видам отнесено 9 видов, из них 3 вида диатомовых, 5 видов зеленых и 1 вид динофитовых. К группе сопутствующих видов следует отнести 29 видов, из них 9 видов диатомовых водорослей, 17 видов зеленых, 2 вида криптофитовых.

Таблица 2. Частоты встречаемости видов водорослей в контактной зоне Чебоксарского водохранилища

Виды	P, %
<i>Aulacoseira distans</i> (Ehrenberg) Simonsen, <i>A. granulate</i> (Ehrenberg) Simonsen, <i>A. islandica</i> (O. Müller) Simonsen, <i>A. subarctica</i> (O. Müller) E. Y. Haworth, <i>Stephanocyclus meneghinianus</i> (Kützing) Kulikovskiy, Genkal & Kociolek 2022, <i>Nitzschia acicularis</i> (Kützing) W. Smith, <i>Skeletonema subsalsum</i> (A. Cleve) Bethge, <i>Stephanodiscus binderanus</i> (Kützing) Krieger, <i>S. hantzschii</i> Grunow, <i>S. minutulus</i> (Kützing) Cleve & Möller, <i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) Compère, <i>Actinastrum hantzschii</i> Lagerheim, <i>Coelastrum microporum</i> Nägeli, <i>C. Pseudomicroporum</i> Korshikov, <i>Mucidosphaerium pulchellum</i> (H. C. Wood) C. Bock, Proschold & Krienitz, <i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komárková-Legnerová, <i>Tetrastrum staurogeniaeforme</i> (Schröder) Lemmermann, <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> Ralfs ex Bornet & Flahault, <i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing, <i>Komma caudate</i> (L. Geitler) D. R. A. Hill	50–100
<i>Asterionella formosa</i> Hassall, <i>Diatoma elongatum</i> (Lyngbye) C. Agardh, <i>Melosira varians</i> C. Agardh, <i>Surirella ovata</i> Kützing, <i>Synedra acus</i> Kützing, <i>Thalassiosira inserta</i> I. V. Makarova, <i>Actinastrum hantzschii</i> Lagerheim, <i>A. hantzschii</i> var. <i>subtile</i> Woloszyńska, <i>Coelastrum pseudomicroporum</i> Korshikov, <i>Crucigenia tetrapedia</i> (Kirchner) Kuntze, <i>Dictyosphaerium subsidium</i> Van Goor, <i>Didymocystis lineate</i> Korshikov, <i>Monoraphidium griffithii</i> (Berkeley) Komárková-Legnerová, <i>Oocystis borgei</i> J. W. Snow, <i>Pediastrum boryanum</i> var. <i>longicorne</i> (Reinsch) P. M. Tsarenko, <i>Pediastrum duplex</i> Meyen, <i>Desmodesmus denticulatus</i> (Lagerheim) S. S. An, T. Friedl & E. Hegewald, <i>D. magnus</i> (Meyen) P. M. Tsarenko, <i>D. abundans</i> (Kirchner) E.H.Hegewald, <i>Scenedesmus acutus</i> Meyen, <i>S. acuminatus</i> (Lagerheim) Chodat, <i>S. intermedius</i> var. <i>acutispinus</i> (Y. V. Roll) E. Hegwald & An, <i>S. opoliensis</i> , <i>Cryptomonas marssonii</i> Skuja, <i>Dolichospermum perturbatum</i> (H. Hill) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, nom. inval.	25–48
<i>Hippodonta capitata</i> (Ehrenberg) Lange-Bertalot, Metzeltin & Witkowski, <i>Nitzschia paleacea</i> (Grunow) Grunow, <i>Stephanodiscus invisitatus</i> M. H. Hohn & Helleman, <i>Pseudodidymocystis fina</i> (Komárek) E.Hegewald & Deason, <i>D. inconspiqua</i> Korshikov, <i>Pandorina morum</i> (O. F. Müller) Bory, <i>Scenedesmus spinosus</i> Chodat, <i>Siderocelis ornate</i> (Fott) Fott	20–24

В Куйбышевском водохранилище доминировали 2 вида диатомовых водорослей (табл. 3) (*Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen – 85 %, *Stephanodiscus hantzschii* Grunow – 75 %). К преобладающим относятся 20 видов, из них 12 видов диатомовых, по 3 вида зеленых и криптофитовых водорослей, 2 вида цианобактерий. К характерным видам отнесено 4 вида, из них 2 вида диатомовых, по 1 виду зеленых водорослей и цианобактерий. К группе сопутствующих видов относятся 29 видов, из них 13 диатомовых водорослей, 9 видов зеленых, 2 вида криптофитовых, 4 вида цианобактерий и 1 вид эвгленовых.

В Саратовском водохранилище доминировали 6 вида водорослей (табл. 4) из которых в 100 % проб встретился 1 вид диатомовых (*Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen). Всего в доминирующих видах – 4 вида диатомовых, 1 вид динофитовых. К преобладающим относятся 19 видов, из них 10 видов диатомовых, 2 вида зеленых водорослей, 3 вида криптофитовых водорослей и 4 вида цианобактерий. К характерным видам отнесено 5 видов, из них 3 вида диатомовых и 2 вида зеленых. К группе сопутствующих видов относятся 32 вида, из них 20 видов диатомовых водорослей, 7 видов зеленых, 4 вида цианобактерий и 1 вид динофитовых водорослей.

Таблица 3. Частоты встречаемости видов водорослей в контактной зоне Куйбышевском водохранилища

Виды	P, %
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen, <i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grunow	50–100
<i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müller) Simonsen, <i>Aulacoseira subarctica</i> (O. Müller) E. Y. Haworth, <i>Closteriopsis longissima</i> (Lemmermann) Lemmermann, <i>Diatoma elongate</i> (Lyngbye) C. Agardh, <i>Nitzschia acicularis</i> (Kützing) W. Smith, <i>N. holsatica</i> Hustedt, <i>N. pusilla</i> Grunow, <i>Skeletonema subsalsum</i> (A. Cleve) Bethge, <i>Stephanodiscus binderanus</i> (Kützing) Krieger, <i>Cyclostephanos dubius</i> (Hustedt) Round, <i>Synedra acus</i> Kützing, <i>Fragilaria radians</i> (Kützing) D. M. Williams & Round, <i>Chlamydomonas globosa</i> J. W. Snow, <i>Closteriopsis longissima</i> (Lemmermann) Lemmermann, <i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komárková-Legnerová, <i>Komma caudate</i> (L. Geitler) D. R. A. Hill, <i>Cryptomonas marssonii</i> Skuja, <i>C. ovate</i> Ehrenberg, <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> Ralfs ex Bornet & Flahault, <i>Planktolynghya limnetica</i> (Lemmermann) Komárková-Legnerová & Cronberg	25–48
<i>Asterionella formosa</i> Hassall, <i>Melosira varians</i> C. Agardh, <i>Monoraphidium irregulare</i> (G. M. Smith) Komárková-Legnerová, <i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing	20–24

Таблица 4. Частоты встречаемости видов водорослей в контактной зоне Саратовского водохранилища

Виды	P, %
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen, <i>Nitzschia pusilla</i> Grunow, <i>Cyclostephanos dubius</i> (Hustedt) Round, <i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grunow, <i>Komma caudate</i> (L. Geitler) D. R. A. Hill	51–100
<i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müller) Simonsen, <i>A. subarctica</i> (O. Müller) E. Y. Haworth, <i>Diatoma vulgaris</i> Bory, <i>Melosira varians</i> C. Agardh, <i>Navicula reinhardtii</i> (Grunow) Grunow, <i>Nitzschia acicularis</i> (Kützing) W. Smith, <i>N. holsatica</i> Hustedt, <i>Skeletonema subsalsum</i> (A. Cleve) Bethge, <i>Synedra acus</i> Kützing, <i>S. acus</i> var. <i>radians</i> (Kützing) Hustedt, <i>Closteriopsis longissima</i> (Lemmermann) Lemmermann, <i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komárková-Legnerová, <i>Cryptomonas caudate</i> J. Schiller, <i>C. marssonii</i> Skuja, <i>C. ovata</i> Ehrenberg, <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> Ralfs ex Bornet & Flahault, <i>Lynghya limnetica</i> Lemmermann, <i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing, <i>Pseudanabaena mucicola</i> (Naumann & Huber-Pestalozzi) Schwabe	25–48
<i>Cymbella affinis</i> Kützing, <i>Nitzschia palea</i> (Kützing) W. Smith, <i>Nitzschia vermicularis</i> (Kützing) Hantzsch, <i>Chlamydomonas globosa</i> J. W. Snow, <i>Tetraselmis arnoldii</i> (Proshkina-Lavrenko) R. E. Norris, Hori & Chihara	20–24

В Волгоградском водохранилище доминировал 1 вид диатомовых водорослей (табл. 5). К преобладающим относятся 9 видов, из них 7 видов диатомовых, 2 вида криптофитовых водорослей. К характерным видам отнесено 5 видов, из них 4 вида диа-

томовых и 1 вид криптофитовых водорослей. К группе сопутствующих видов относятся 28 видов, из них 21 вид диатомовых водорослей, 2 вида зеленых, 3 вида цианобактерий и 2 вида криптофитовых водорослей.

Таблица 5. Частоты встречаемости видов водорослей в контактной зоне Волгоградского водохранилища

Виды	P, %
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen	50
<i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müller) Simonsen, <i>Cocconeis placentula</i> var. <i>euglypta</i> (Ehrenberg) Cleve, <i>Diatoma vulgaris</i> Bory, <i>Melosira varians</i> C. Agardh, <i>Navicula reinhardtii</i> (Grunow) Grunow, <i>Nitzschia pusilla</i> Grunow, <i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grunow, <i>Komma caudata</i> (L. Geitler) D. R. A. Hill, <i>Cryptomonas ovata</i> Ehrenberg	25–44
<i>Cymbella affinis</i> Kützing, <i>Nitzschia acicularis</i> (Kützing) W. Smith, <i>N. holsatica</i> Hustedt, <i>N. pusilla</i> Grunow, <i>Cryptomonas marssonii</i> Skuja	20–24

На Нижней Волге в рукавах дельты доминировали 14 видов, из которых в 92–100 % проб встречались 4 вида (3 диатомовых, 1 цианобактерии). Всего к доминирующим видам (табл. 6) относятся 9 видов диатомовых водорослей, 4 вида зеленых, 1 вид цианобактерий. К преобладающим относятся 14 видов, из них 10 видов диатомовых, по 2

вида зеленых водорослей и цианобактерий. К характерным видам отнесено 8 видов, из них 5 видов диатомовых, 1 вид зеленых водорослей и 2 вида цианобактерий. К группе сопутствующих видов относятся 28 видов, из них 6 видов диатомовых водорослей, 1 вид зеленых, 3 вида цианобактерий и 1 вид динофитовых водорослей.

Таблица 6. Частоты встречаемости видов водорослей в контактной зоне Нижней Волги

Виды	P, %
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen, <i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen, <i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg, <i>Navicula exigua</i> (W. Gregory) Grunow, <i>N. gastrum</i> (Ehrenberg) Kützing, <i>Nitzschia acicularis</i> (Kützing) W. Smith, <i>N. paleacea</i> (Grunow) Grunow, <i>Skeletonema subsalsum</i> (A. Cleve) Bethge, <i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grunow, <i>Actinastrum hantzschii</i> Lagerheim, <i>Binuclearia lauterbornii</i> (Schmidle) Proshkina-Lavrenko, <i>Pediastrum duplex</i> Meyen, <i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turpin) Brébisson, <i>Planktolyngbya limnetica</i> (Lemmermann) Komárková-Legnerová & Cronberg	51
<i>Amphora ovalis</i> (Kützing) Kützing, <i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen, <i>Gomphonella calcarea</i> (Cleve) R. Jahn & N. Abarca, <i>Navicula cryptocephala</i> Kützing, <i>N. rhynchocephala</i> Kützing, <i>Prestauroneis protracta</i> (Grunow) Kulikovskiy & Glushchenko, <i>Sellaphora pupula</i> (Kützing) Mereschkovsky, <i>Nitzschia palea</i> (Kützing) W. Smith, <i>Synedra acus</i> Kützing, <i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) Compere, <i>Desmodesmus intermedius</i> (Chodat) E. Hegewald, <i>Monoraphidium griffithii</i> (Berkeley) Komárková-Legnerová, <i>Microcystis pulvereae</i> (H. C. Wood) Forti, <i>Tetradesmus lagerheimii</i> M. J. Wynne & Guiry	25–44
<i>Aulacoseira distans</i> (Ehrenberg) Simonsen, <i>Cymbella affinis</i> Kützing, <i>Melosira varians</i> C. Agardh, <i>Navicula radiosa</i> Kützing, <i>N. reinhardtii</i> (Grunow) Grunow, <i>Mucidosphaerium pulchellum</i> (H. C. Wood) C. Bock, Proschold & Krienitz, <i>Chroococcus minor</i> (Kützing) Nägeli, <i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing	20–24

Эколого-географический анализ прибрежных зон исследованных водохранилищ показал, что в биогеографическом отношении альгофлора представлена космополитными видами 327 видов (91.3 %), к бореаль-

ным относятся лишь 5 видов (1.4 %), североальпийским и субтропическим – по 1 виду (0.3 %), к малоизученным – 23 вида (6.7 %) (табл. 7).

Таблица 7. Биогеографическая характеристика фитопланктона контактной зоны на каскаде Волжских водохранилищ (распространение видов)

Водохранилище	Кол-во видов	Космополитный	Бореальный	Североальпийский	Субтропический	Малоизученный в биогеографическом отношении
Горьковское	109	102	2	1	–	4
Чебоксарское	127	116	2	1	1	7
Куйбышевское	142	129	3	–	–	10
Саратовское	120	110	3	–	–	7
Волгоградское	113	104	2	–	–	7
В целом по каскаду вдхр. и притокам	358	327	5	1	1	24

Северо-альпийский вид (*Aulacoseira subarctica* (O. Müller) E. Y. Haworth) встречен в Горьковском и Чебоксарском водохранилищах, субтропический (*Coelastrum indicum* W. V. Turner) – в Чебоксарском (см. табл. 7).

Среди бореальных видов – представители диатомовых (3 вида) и золотистых водорослей (1 вид). На Верхней Волге (Горьковское, Чебоксарское водохранилища и некоторые их притоки) встречено только 2 вида: *Thalassiosira incerta* I. V. Makarova, *Kephyrion rubri-claustri* Conrad; на Средней и Нижней Волге – 3 вида: *Cymbella falsa diluviana*

(Krasske) Lange-Bertalot & Metzeltin, *Navicula menisculus* Schumann, *Nitzschia sublinearis* Hustedt.

По принадлежности к жизненным формам подавляющее большинство всего видового состава – истинно-планктонные формы – 39.1 % (140 видов), планктонно-перифитонных – 16.8 % (60 видов), литоральных видов – 10.3 %, бентосных видов – 9.5 %, видов обрастаний – 5.9 %, большое количество планктонно-перифитонных видов – 16.8 % (табл. 8).

Таблица 8. Жизненные формы фитопланктона контактной зоны на каскаде Волжских водохранилищ

Водохранилище	Горьковское	Чебоксарское	Куйбышевское	Саратовское	Волгоградское	В целом по каскаду вдхр. и притокам
Планктонно-перифитонно-бентосный	4	4	7	7	6	15
Планктонно-перифитонно-эврибионтный	1	1	2	1	2	3
Планктонно-литоральный	–	–	–	–	–	2
Планктонно-бентосно-эврибионтный	1	1	1	1	1	1
Бентосно-планктонный	3	3	9	7	10	22
Перифитонно-бентосный	–	–	2	3	2	5
Перифитонно-планктонный	1	1	7	7	7	17
Планктонно-перифитонный	41	47	24	14	11	60
о – перифитонный (обрастания)	–	2	5	6	7	21
л – литоральный	2	4	13	9	10	37
п – планктонный	55	61	60	50	39	140
б – бентосный	1	3	11	14	17	34
э – эврибионтный	–	–	1	1	1	1

Встречены также перифитонно-бентосные виды – 5 (1.4 %) и другие жизненные формы. Отмечен лишь один эврибионтный вид (*Pseudanabaena mucicola* (Naumann & Huber-Pestalozzi) Schwabe) в Куйбышевском, Саратовском и Волгоградском водохранилищах, а также р. Чапаевке (левый приток р. Волги, устье реки ниже г. Самары). Также единично представлен планктонно-перифитонно-эврибионтный вид (*Diatoma elongata* (Lyngbye) C. Agardh), встреченный во всех исследованных водохранилищах и большинстве изученных рек Верхней, Средней и Нижней Волги.

По отношению к солености 74.9 % (268 видов) – индифферентные виды, олигогалобы – 9.2 % (33 вида), галлофилы – 7.0 % (25 видов), мезогалобы – 3.1 % (11 видов), галлофобы – 1.1 % (4 вида). По изменению соотношения индикаторных групп прослеживалось влияние зональности водных объектов: по мере нарастания минерализации воды в направлении от Верхней к Нижней Волге увеличивалось число галофилов (от 5 до 11) и мезогалобов (от 0 до 6), а галофобов – снижалось (от 2 до 1) (табл. 9).

Таблица 9. Галобность видов фитопланктона контактной зоны на каскаде Волжских водохранилищ

Водохранилище	Галофоб	Галофил	Индифферент	Мезогалоб	Олигогалоб	Нет данных
Горьковское	2	5	89	–	10	3
Чебоксарское	2	7	103	–	11	4
Куйбышевское	1	11	108	3	13	6
Саратовское	1	11	92	4	8	4
Волгоградское	1	11	83	6	7	5
В целом по каскаду вдхр. и притокам	4	25	268	11	33	17

Галофобы представлены 3 видами диатомовых водорослей (*Aulacoseira distans* (Ehrenberg) Simonsen, *A. subarctica* (O. Müller) E. Y. Haworth, *Caloneis amphisbaena* (Bory Cleve) и 1 видом эвгленовых (*Trachelomonas planctonica* f. *Ornata* (Skvortzov) Popova). Таксоны *Aulacoseira distans* и *A. subarctica* встречены в Горьковском и Чебоксарском водохранилищах и их притоках. В водохранилищах Средней и Нижней Волги, а также в их притоках отмечен галофобный вид *Caloneis amphisbaena*. Таксон *Trachelomonas planctonica* встречен лишь на р. Падовке (устье реки – в правобережной пойме р. Самары).

Галофилы представлены 22 видами, лишь 2 из них, относящихся к диатомовым водорослям, встречены в Горьковском и Чебоксарском водохранилищах и некоторых их притоках (*Cocconeis pediculus* Ehrenberg, *Placoneis clementis* (Grunow) E. J. Cox). Также только 2 вида встречены в протоках и рукавах Нижней Волги (диатомовые – *Prestauroneis protracta* (Grunow) Kulikovskiy & Glushchenko

и цианобактерии – *Monoraphidium griffithii* (Berkeley) Komárková-Legnerova).

Виды-мезогалобы встречены в Куйбышевском, Саратовском и Волгоградском водохранилищах и некоторых притоках. Все 11 видов – представители диатомовых водорослей, наиболее часто встречаемые – *Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin, *Nitzschia reversa* W. Smith, *Tabularia tabulate* (C. Agardh) Snoeijs.

Олигогалобы представлены 33 видами, лишь 2 из них встречаются в водоемах и водотоках Верхней Волги и рукавах и протоках Нижней Волги – это представители зеленых водорослей (*Mucidosphaerium pulchellum* (H. C. Wood) C. Bock, Proschold & Krienitz) и цианобактерий (*Merismopedia tenuissima* Lemmermann).

По отношению к рН воды выявлено 277 таксонов-индикаторов, преобладают индифференты – 44.7 % (160 видов), алкалифилов и алкалибионтов – 31.6 % (113 видов), ацидофилов и ацидобионтов – 1.1 % (4 вида) (табл. 10).

Таблица 10. Количество видов фитопланктона контактной зоны на каскаде Волжских водохранилищ по отношению к рН

Водохранилище	Алкалифил + алкалибионт	Ацидофил + ацидобионт	Индифферент	Нет данных
Горьковское	22	2	60	25
Чебоксарское	27	2	70	28
Куйбышевское	54	–	54	34
Саратовское	50	–	38	32
Волгоградское	53	–	36	24
В целом по каскаду вдхр. и притокам	113	4	160	81

Индифференты в основном представлены видами зеленых (99 видов) и диатомовых (24 вида) водорослей, алкалифилы – диатомовыми (99 видов).

В Горьковском и Чебоксарском водохранилищах преобладали индифференты, в Саратовском и Волгоградском – алкалифилы. В Куйбышевском водохранилище индифференты и алкалифилы представлены в одинаковом количестве.

Ацидофилы представлены 2 видами диатомовых (*Aulacoseira distans* (Ehrenberg) Simonsen, *Aulacoseira subarctica* (O. Müller) E. Y. Haworth) и по одному виду цианобактерий (*Chroococcus turgidus* (Kützing) Nägeli) и эвгленовых водорослей (*Trachelomonas*

planctonica f. *Ornate* (Skvortzov) Popova).

По численности в большинстве исследованных водных объектов (водохранилищах и реках) доминировали диатомовые водоросли, за исключением рек Вятка, Казанка, Кудьма, Ока. В этих реках доминировали зеленые водоросли по численности, как и в озере Средний Кабан. В Чебоксарском водохранилище и реке Кривуша содоминировали диатомовые и зеленые водоросли.

Соотношение доминирующих отделов водорослей по численности в контактной зоне исследованных водохранилищ и доля преобладающих видов в общей численности представлены на рис. 1.

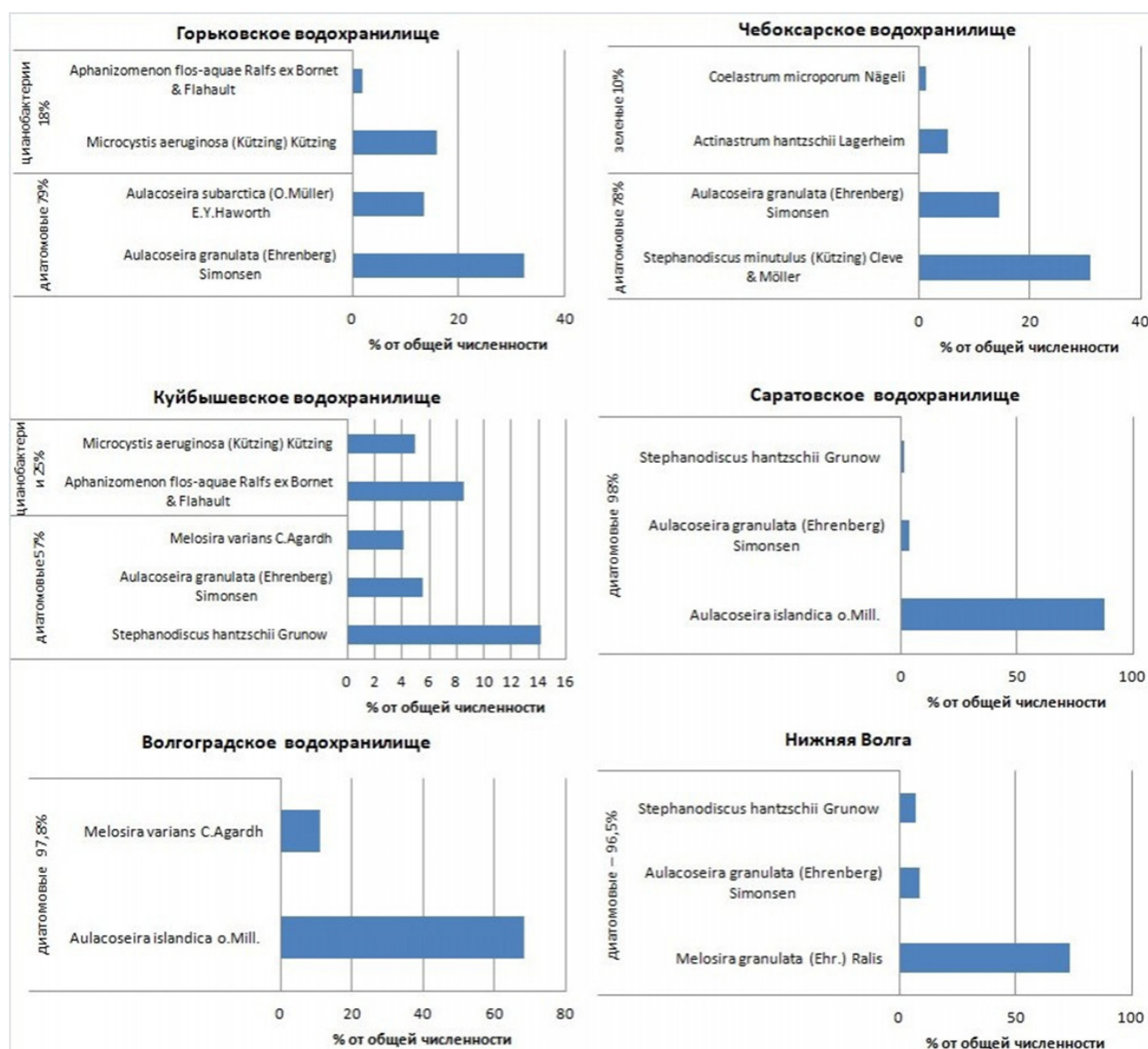


Рис. 1. Соотношение доминирующих отделов водорослей в исследованных водохранилищах и доля преобладающих видов по численности

Fig. 1. The ratio of the dominant algae divisions in the studied reservoirs and the proportion of the predominant species in number

Диапазоны изменения численности преобладающих отделов водорослей на каскаде Волжских водохранилищ за период исследования представлены в табл. 11.

Таблица 11. Численности преобладающих отделов водорослей

Водохранилище	Диатомовые водоросли, кл*10 ⁶ /л	Цианобактерии, кл*10 ⁶ /л	Зеленые водоросли, кл*10 ⁶ /л
Горьковское	0.001–22.76	0.001–386.40	
Чебоксарское	0.001–9.07	0.001–143.56	0.001–28.88
Куйбышевское	5.0–3600.0	10.0–73000.0	5.0–1760.0
Саратовское	5.0–7800.0	30.0–15200.0	
Волгоградское	5.0–30000.0	40.0–6400.0	
Нижней Волги	1.0–9380000.0	1.0–12280000.0	2.0–848000.0
Реках Верхней Волги (Санихта, Узола, Пыра)	0.001–6.56		0.02–0.640
Реках Средней Волги (Ока, Теша, Кудьма, Казанка)	0.001–13520.00	0.001–28400.00	0.001–6000.0
В реках Нижней Волги	1–8220000	1–11040000	1–736000.0

Сравнение исследованных водных объектов по средней численности фитопланктона показало, что в целом по исследованным водным объектам доминирующими по численности являются такие виды, как:

из диатомовых водорослей – *Stephanodiscus hantzschii*, *Diatoma* sp., *Aulacoseira granulata*,

из зеленых – *Monoraphidium contortum*, *Chlamydomonas* sp., *Scenedesmus quadricauda*,

из золотистых – *Chrysococcus biporus*,

из криптофитовых – *Cryptomonas* sp., *Cryptomonas ovata* Ehr.,

из эвгленовых – *Trachelomonas volvocina* Ehr.,

из цианобактерий – *Aphanizomenon flos-aquae*, *Lyngbya limnetica*, *Microcystis aeruginosa*.

По доле в биомассе в контактной зоне большинства исследованных водных объектов доминировали диатомовые водоросли, за исключением р. Кривуши, где их вклад в общую биомассу составлял лишь 10 %, а вклад цианобактерий – 82 %. В р. Чапаевке по общей биомассе преобладали зеленые водоросли (38 %) и цианобактерии (31 %), вклад диатомовых составлял лишь 23 %. В реке Степной Зай также преобладали зеленые водоросли (49 %), доля диатомовых составляла 40 %.

Соотношение доминирующих отделов водорослей по биомассе в исследованных водохранилищах и доля преобладающих

видов в общей биомассе фитопланктона представлены на рис. 2.

Диапазоны изменения биомассы преобладающих отделов водорослей на каскаде Волжских водохранилищ за период исследования представлены в табл. 12. Максимальные средние по водоему значения биомассы наблюдались в летне-осенний период.

Выделение доминирующих группировок видов, формирующих отдельные биоценозы, в исследованном материале проводили с использованием коэффициента общности видового состава Съеренсена – Чекановского (Ksc), применяя программный модуль «GRAPHS» (Новаковский, 2004).

На дендрограмме (рис. 3) определяются несколько крупных кластеров, соответствующих различным частям бассейна р. Волги: водохранилища Верхней Волги и Оки выделяются в отдельный кластер на уровне сходства 82–87 %, водохранилища средней Волги – на уровне 73 %, притоки Чебоксарского водохранилища – 53–73 %, притоки Куйбышевского водохранилища – 46 %, притоки Саратовского водохранилища – 52–70 %, рукава Нижней Волги – 73–85 %. Наиболее близки по сходству видового состава рукава дельты Волги, коэффициент Съеренсена – Чекановского составляет 82–85 %, при этом для рукавов Кигач и Камызяк значение коэффициента – 85 %, как и для рукавов Кривая Болда и Бузан. В целом для Нижней Волги (от речной части у г. Волгограда и рукавов дельты) значение коэффициента – 73 %.

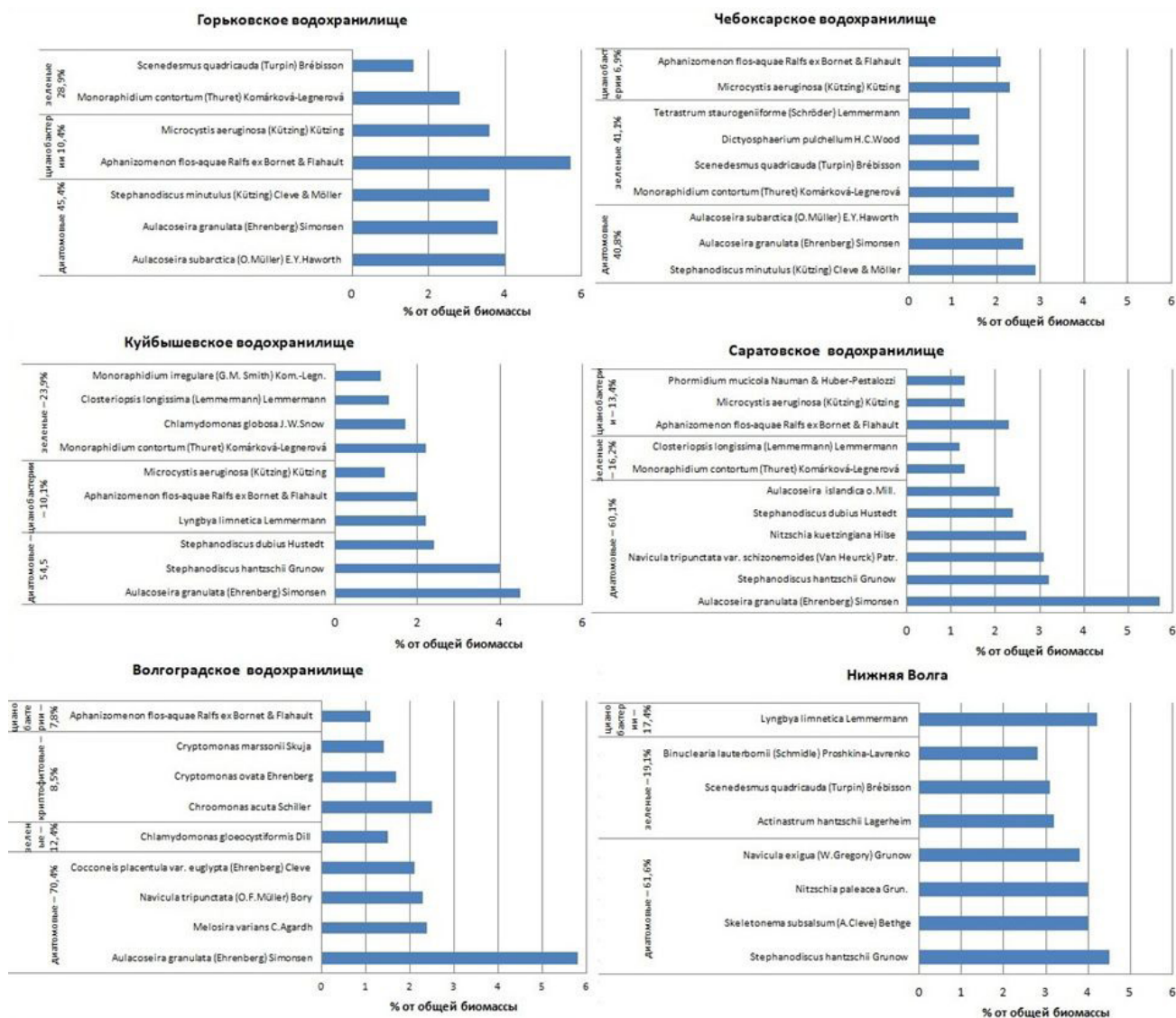


Рис. 2. Соотношение доминирующих отделов водорослей в исследованных водохранилищах и доля преобладающих видов по биомассе

Fig. 2. The ratio of the dominant algae divisions in the studied reservoirs and the proportion of the predominant species by biomass

Таблице 12. Биомасса преобладающих отделов водорослей

Водохранилище	Диатомовые водоросли, г/м ³	Цианобактерии, г/м ³	Зеленые водоросли, г/м ³
Горьковское	0.0004–8.04	0.00013–4.13	0.00001–0.335
Чебоксарское	0.00006–11.32	0.00002–3.92	0.00003–6.59
Куйбышевское	0.01–2.46	0.01–4.79	0.01–3.11
Саратовское	0.0003–51.2	0.0003–0.95	0.00008–0.43
Волгоградское	0.00019–235.5	0.00047–0.677	0.000314–0.719
Нижней Волги	0.000038–14.34	0.000019–0.197	0.0001–0.0413
Реках Верхней Волги (Санихта, Узола, Пыра)	0.197–5656.69	0.00004–15380.21	0.134–79.42
Реках Средней Волги (Ока, Теша, Кудьма, Казанка)	0.00008–936.54		0.00001–108.58
В реках Нижней Волги	0.00002–23.4	0.00001–14.47	0.0001–6.45

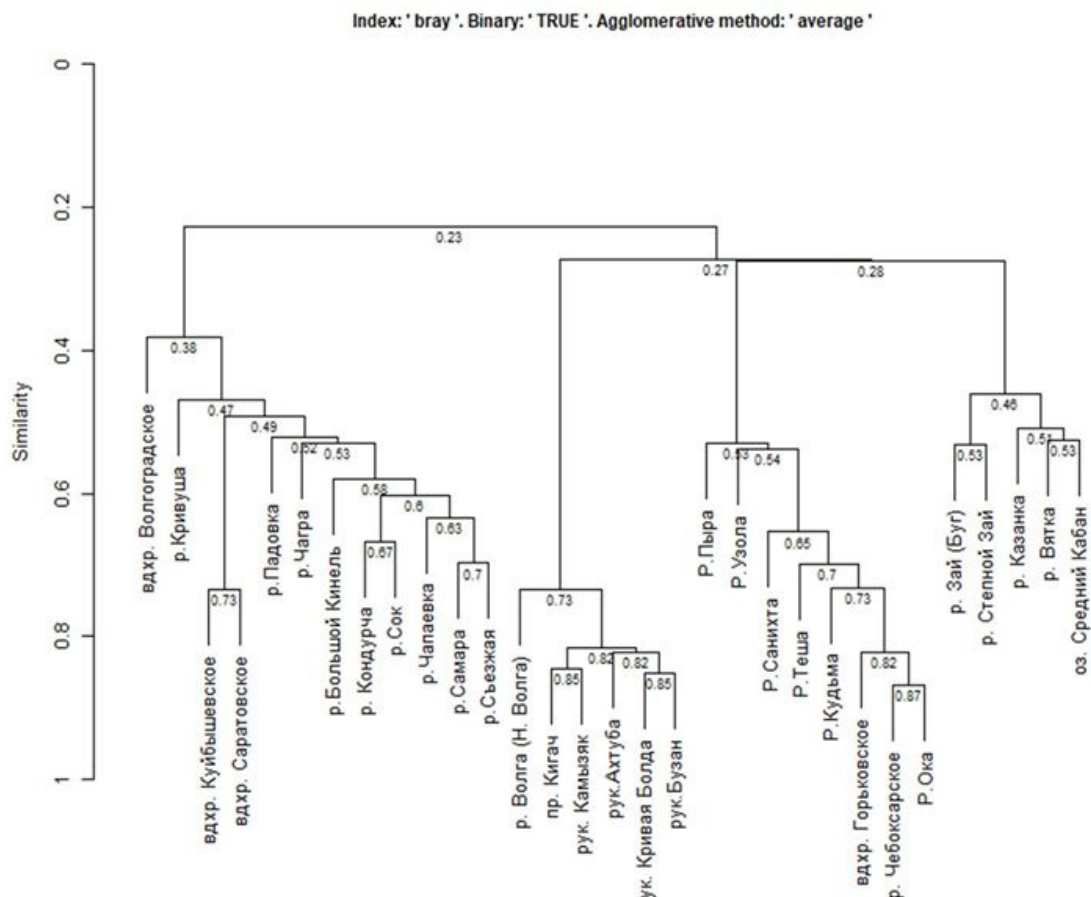


Рис. 3. Дендрограмма видового сходства исследованных водных объектов (по данным за период 2014–2018 гг.). По оси абсцисс – водные объекты, по оси ординат – коэффициент Сьёренсена – Чекановского

Fig. 3. Dendrogram of the species similarity of the studied water bodies (according to data for the period 2014–2018). On the abscissa axis – water objects, on the ordinate axis – the Sorensen – Chekanovsky coefficient

Также можно отметить, что степень видового сходства планктона контактных зон водохранилищ без учета рек (рис. 4) между планктонными сообществами Верхней и Нижней Волги составляет лишь 28 %.

Традиционно считается, что сообщества фитопланктона водотоков носят континуальный характер, что предполагает относительно равномерную представленность видового состава на всем протяжении водотока. Для контактной зоны эта закономерность также прослеживается. Наибольшее видовое сходство наблюдается между Горьковским и Чебоксарским водохранилищами, этот показатель составляет 84 %, между Куйбышевским и Саратовским (73 %), между ними и Волгоградским водохранилищем – 46 %. Между водохранилищами Средней Волги и Нижней Волгой показатель видового сходства минимальный – 31 %.

Заключение

Определен и уточнен современный состав флоры фитопланктона контактных зон

– сообществ, которые служат первичным биофильтром загрязнения и сильнее всего подвержены антропогенной нагрузке.

Эколого-флористическая оценка фитопланктона прибрежных сообществ контактной зоны каскада Волжских водохранилищ показала, что в составе фитопланктона (по данным наблюдений за 2014–2018 гг.) встречается 358 видов, подвидов и вариаций, наибольшее видовое разнообразие принадлежало следующим классам: Bacillariophyceae – 147 видов, Chlorophyceae – 94 вида, Cyanophyceae – 38 видов. Наименьшее разнообразие отмечено для Euglenophyceae – 23 вида, Chrysophyceae – 6 видов, Cryptophyceae – 5 видов, Dinophyceae – 9 видов, Xanthophyceae – 1 вид. Наибольшее число видов зарегистрировано в Волгоградском – 189 видов, Куйбышевском – 180 и Чебоксарском водохранилищах – 177, из водотоков – в реках Ока – 177 видов и Большой Кинель – 121, Горьковское – 140, Саратовское водохранилище – 147 таксонов. Сравнивая количество обнаруженных нами видов на каскаде водохра-

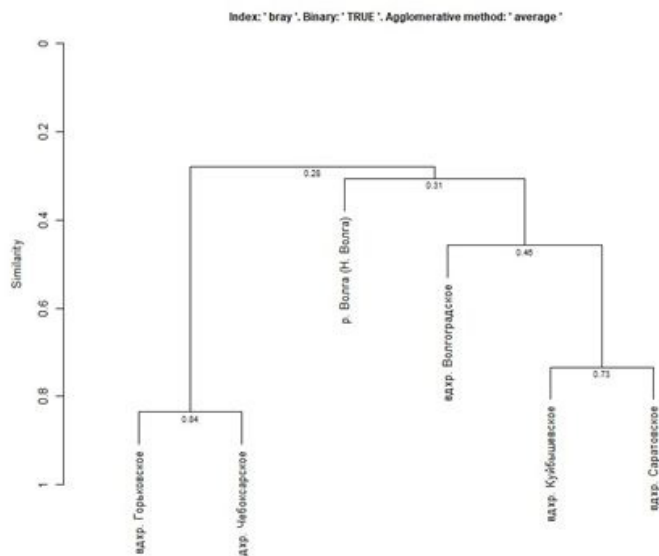


Рис. 4. Дендрограмма видового сходства исследованных водохранилищ (по данным за период 2014–2018 гг.). По оси абсцисс – водохранилища, по оси ординат – коэффициент Сьёренсена – Чекановского
Fig. 4. Dendrogram of the species similarity of the studied Reservoirs (according to data for the period 2014–2018). On the abscissa axis – reservoirs, on the ordinate axis – the Sorensen – Chekanovsky coefficient

нилиц с данными других исследователей, можно констатировать, что видовое разнообразие, обнаруженное нами, намного скуднее. Так, в работе Л. Г. Корневой (2015) в составе флоры водохранилищ за период 1953–2004 гг. выявлено всего 2475 видов, разновидностей и форм водорослей (Cyanophyta – 280, Chrysophyta – 198, Bacillariophyta – 698, Xanthophyta – 86, Cryptophyta – 37, Dinophyta – 49, Raphidophyta – 2, Euglenophyta – 250, Chlorophyta – 875). Однако такой результат ожидаем, учитывая, что исследования проведены для сообществ фитопланктона только прибрежных сообществ (контактной зоны), а не всей акватории. Исследованные сообщества испытывают большее антропогенное воздействие, что также не может не сказаться на видовом разнообразии.

Число общих видов водорослей, обнаруженных в контактных зонах водохранилищ, ограничено единичными представителя-

ми. Во всех исследованных водных объектах встречены лишь два вида диатомовых – *Stephanodiscus hantzschii* Grunow, *Nitzschia acicularis* (Kützing) W. Smith. По доле в биомассе и численности в большинстве исследованных водных объектов доминировали диатомовые водоросли.

В целом альгофлора представлена космополитными видами. Большинство видового состава – истинно-планктонные формы (62.5 %), литоральных видов – 11.3 %, бентосных видов – 12.5 %, видов обрастаний – 13.3 %.

По сходству видового состава наиболее близки: рукава дельты Волги (82–85 %); Чебоксарское водохранилище и р. Ока (87 %); Куйбышевское и Саратовское водохранилища (73 %), Чебоксарское и Горьковское водохранилища (84 %). Наименьшее видовое сходство отмечено между кластерами, представленными водными объектами Верхней и Нижней Волги (28 %).

Библиография

- Буйволов Ю. А., Быкова И. В., Лазарева Г. А., Потютко О. М., Уваров А. Г. Современное состояние и перспективы развития мониторинга качества вод по гидробиологическим показателям в России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2016. Т. 27, № 2. С. 42–58.
- Водоросли, вызывающие «цветение» водоемов Северо-Запада России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 370 с.
- Голлербах М. М., Косинская Е. К., Полянский В. И. Синезеленые водоросли. М.: Сов. наука, 1953. 652 с. (Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 2).
- Дедусенко-Щеголева И. Т., Голлербах М. М. Желто-зеленые водоросли. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 272 с. (Определитель пресноводных водорослей СССР, Вып. 5).
- Диатомовые водоросли России и сопредельных стран: Ископаемые и современные. Т. II. Вып. 3 / И.

- В. Макарова, Н. И. Стрельникова, Т. Ф. Козыренко и др.; Под ред. И. В. Макаровой. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2002. 112 с.
- Забелина М. М., Киселев И. А., Прошкина-Лавренко А. И., Шешукова В. С. Диатомовые водоросли. М.: Сов. наука, 1951. 620 с. (Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 4).
- Забелина М. М., Мейер К. И. Определитель низших растений. Т. 1. М.: Сов. наука, 1953. 396 с.
- Зеленевская Н. А. Динамика развития фитопланктона Волгоградского водохранилища в 2018 году // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф.: В 2 т. Т. 1. Тольятти, 2019. С. 214–217.
- Зеленевская Н. А. Фитопланктон Волгоградского водохранилища в 1990 году // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. 2010. № 10. С. 36–42.
- Корнева Л. Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги / Под ред. А. И. Копылова. Кострома: Костромской печатный дом, 2015. 284 с.
- Кривина Е. С., Тарасова Н. Г. Фитопланктон Саратовского водохранилища: таксономический состав и эколого-географическая характеристика // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2013. Т. 22, № 2. С. 47–62.
- Кузьмин Г. В. Фитопланктон. Видовой состав и обилие // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М., 1975. С. 73–87.
- Лаврентьева Г. М. Фитопланктон водохранилищ Волжского каскада. Л., 1977. 168 с. (Известия ГосНИОРХ. Т. 114).
- Лазарева Г. А. Экологическое состояние Горьковского и Чебоксарского водохранилищ по многолетним данным гидробиологического мониторинга: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2005. 284 с.
- Мошкова И. А., Голлербах М. М. Зеленые водоросли. Класс улотриксковые (1). Л.: Наука, 1986. 360 с. (Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 10).
- Новаковский А. Б. Возможности и принципы работы программного модуля «GRAPHS». Сыктывкар., 2004. 27 с. (Автоматизация научных исследований / Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, Коми науч. центр. Вып. 27).
- Охупкин А. Г., Горохова О. Г., Генкал С. И., Паутова В. Н. К альгофлоре нижнего течения реки Ока // Ботанический журнал. 2010. Т. 95, № 10. С. 1422–1436.
- Охупкин А. Г. Фитопланктон Чебоксарского водохранилища. Тольятти: Самарский науч. центр. РАН, 1994. 275 с.
- Охупкин А. Г., Микульчик И. А., Корнева Л. Г., Минеева Н. М. Фитопланктон Горьковского водохранилища. Тольятти: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 1997. 224 с.
- Паламарь-Мордвинцева Г. М. Зеленые водоросли. Класс Конъюгаты. Порядок Десмидиевые (2). Л.: Наука, 1982. 620 с. (Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 11 (2)).
- Паутова В. Н., Попченко И. И. Видовой состав и динамика биомассы фитопланктона (1957–1984 гг.) // Паутова В. Н., Номоконова В. И. Динамика фитопланктона нижней Волги – от реки к каскаду. Тольятти: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 2001. С. 186–209.
- Паутова В. Н., Генкал С. И., Номоконова В. И., Тарасова Н. Г. Сезонная и межгодовая динамика центральных диатомовых водорослей в Куйбышевском водохранилище // Биология внутренних вод. М.: Российская академия наук, 2009. № 3. С. 25–35.
- Попов С. С., Потютко О. М. Качественные и количественные показатели фитопланктона поверхностных вод северной Евразии 2014–2019 гг.: Свидетельство о регистрации базы данных 2021620384, 03.03.2021. Заявка № 2021620221 от 19.02.2021.
- Попченко И. И. Видовой состав и динамика фитопланктона Саратовского водохранилища. Тольятти: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 2001. 148 с.
- Потютко О. М. Особенности формирования сообществ прибойно-ледовых зон и их экология на примере Куршского залива: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2016. 24 с.
- Приймаченко А. Д. Фитопланктон Горьковского водохранилища в первые годы его существования (1956–1957) // Труды Института биологии водохранилищ. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 3–19.
- Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В. А. Абакумова. СПб., 1992. 317 с.
- РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. URL: <https://docs.cntd.ru/document/495872993?ysclid=lu86ksojk5529405385> (дата обращения: 10.05.2023).
- Решетняк О. С., Никаноров А. М., Брызгалов В. А., Косменко Л. С. Антропогенная трансформация водной экосистемы Нижней Волги // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 623–632.
- Тарасова Н. Г., Буркова Т. Н. Фитопланктон Куйбышевского водохранилища в августе 2009 г. // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, № 1. С. 174–178.
- Фортунов М. А. Физико-географическая характеристика бассейна // Волга и ее жизнь / Ред. Н. В. Буторин. Л.: Наука, 1978. С. 1–31.
- HELCOM Guidelines for the Baltic monitoring programme for the third stage. Part D. Biological determi-

nants // Baltic Sea Environment Proceedings. 1988. 27D. P. 161.
Tikkanen T. Kasviplanktonopas. Helsinki, 1986. 278 s.
Guiry M. D. & Guiry G. M. AlgaeBase. URL: <https://www.algaebase.org> (дата обращения: 10.05.2023).

ECOLOGICAL AND FLORISTIC CHARACTERISTICS OF PHYTOPLANKTON IN THE CONTACT ZONE ON THE CASCADE OF THE VOLGA RESERVOIRS

LAZAREVA Galina Aleksandrovna *Dubna State University, 141980 Russia, Moscow region, Dubna, Universitetskaya st., 19, lazarevg@mail.ru*

POTYUTKO Oleg Michailovich *PhD, Yu. A. Izrael Institute of global climat and ecology, 141980, Russia, Moscow region, Dubna, Joliot - Curie st., 20, oleg.potyutko@gmail.com*

Keywords:
hydrobiological monitoring
qualitative characteristics of
phytoplankton
cascade of Volga reservoirs

Summary: The paper summarizes the results of long-term observations of the state of phytoplankton in the contact zone on the cascade of the Volga reservoirs in the period 2014–2018. The research was conducted by the network of hydrobiological laboratories of Roshydromet. The studied water bodies represented a cascade of alternating water bodies of various types lying in different geographical zones and characterized by various hydrological factors and the intensity of anthropogenic load. A comparative analysis of the qualitative and quantitative characteristics of the phytoplankton of the contact zone along the Volga riverbed and its reservoirs was carried out, and the main structural characteristics of the phytoplankton community were identified. There were 358 species and variations of phytoplankton found. Among them there were 139 species of diatoms and 133 – of green algae traditionally prevailing in terms of the number of species. Cyanobacteria (36 species) and euglenic algae (24 species) possessed significant species diversity. The remaining departments were represented by single species, so dinophytes were represented by 5 species, chrysophyceae algae – by 13 species, cryptophytes – by 7 species, and there was one species of yellow-green algae discovered.

Received on: 13 May 2023

Published on: 02 May 2024

References

- Algae causing the «blooming» of reservoirs in the North-West of Russia. M.: Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2006. 370 p.
- Buyvolov Yu. A. Bykova I. V. Lazareva G. A. Potyutko O. M. Uvarov A. G. The current state and prospects for the development of water quality monitoring by hydrobiological indicators in Russia, *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. 2016. T. 27, No. 2. P. 42–58.
- Fortunatov M. A. Physical and geographical characteristics of the basin, Volga i ee zhizn', Red. N. V. Butorin. L.: Nauka, 1978. P. 1–31.
- Gollerbah M. M. Kosinskaya E. K. Polyanskiy V. I. Blue-green algae. M.: Sov. nauka, 1953. 652 p. (Opredelitel' presnovodnyh vodorosley SSSR. Vyp. 2).
- Guidelines for hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems, Pod red. V. A. Abakumova. SPb., 1992. 317 p.
- Guiry M. D. & Guiry G. M. AlgaeBase. URL: <https://www.algaebase.org> (data obrascheniya: 10.05.2023).
- HELCOM Guidelines for the Baltic monitoring programme for the third stage. Part D. Biological determinants, Baltic Sea Environment Proceedings. 1988. 27D. P. 161.
- II. The diatoms of Russia and adjacent countries: Fossil and recent. Vol. II. Issue 3, I. V. Makarova, N. I. Strel'nikova, T. F. Kozyrenko i dr.; Pod red. I. V. Makarovoy. SPb.: Izd-vo S, Peterb. un-ta, 2002. 112 p.
- Korneva L. G. Phytoplankton of reservoirs of the Volga basin, Pod red. A. I. Kopylova. Kostroma: Kostromskoy pechatnyy dom, 2015. 284 p.
- Krivina E. S. Tarasova N. G. Phytoplankton of the Saratov reservoir: taxonomic composition and ecological and geographical characteristics, Samarskaya Luka: problemy regional'noy i global'noy ekologii. 2013. T. 22, No. 2. P. 47–62.
- Kuz'min G. V. Phytoplankton. Species composition and abundance, Metodika izucheniya biogeocenzov

- vnutrennih vodoemov. M., 1975. P. 73–87.
- Lavrent'eva G. M. Phytoplankton of reservoirs of the Volga cascade. L., 1977. 168 p. (*Izvestiya GosNIORH*. T. 114).
- Lazareva G. A. Ecological state of Gorkovsky and Cheboksarsky reservoirs according to long-term hydrobiological monitoring data: Dip. ... kand. biol. nauk. M., 2005. 284 p.
- Mordvinceva G. M. Chlorophyta: Conjugatophyceae. Desmidiaceae (2). L.: Nauka, 1982. 620 p. (*Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR*. Vyp. 11 (2)).
- Moshkova I. A. Gollerbah M. M. Green algae. Ulotrix class (1). L.: Nauka, 1986. 360 p. (*Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR*. Vyp. 10).
- Novakovskiy A. B. Features and principles of operation of the GRAPH software module. Syktyvkar., 2004. 27 p. (*Avtomatizatsiya nauchnykh issledovaniy, Rop. akad. nauk, Ural. otd-nie, Komi nauch. centr*. Vyp. 27).
- Ohapkin A. G. Gorohova O. G. Genkal S. I. Pautova V. N. To the algoflora of the lower reaches of the Oka River, *Botanicheskiy zhurnal*. 2010. T. 95, No. 10. P. 1422–1436.
- Ohapkin A. G. Mikul'chik I. A. Korneva L. G. Mineeva N. M. Phytoplankton of the Gorkovsky reservoir. *Tol'yatti: Izd-vo Samarskogo nauch. centra RAN*, 1997. 224 p.
- Ohapkin A. G. Phytoplankton of Cheboksarsky reservoir. *Tol'yatti: Samarskiy nauch. centr. RAN*, 1994. 275 p.
- Organization and conduct of routine observations of the state and pollution of surface waters of the land. URL: <https://docs.cntd.ru/document/495872993?ysclid=lu86ksojk5529405385> (data obrascheniya: 10.05.2023).
- Pautova V. N. Genkal S. I. Nomokonova V. I. Tarasova N. G. Seasonal and interannual dynamics of centric diatoms in the Kuibyshev reservoir, *Biologiya vnutrennih vod*. M.: Rossiyskaya akademiya nauk, 2009. No. 3. P. 25–35.
- Pautova V. N. Popchenko I. I. Species composition and dynamics of phytoplankton biomass (1957–1984), Pautova V. N., Nomokonova V. I. *Dinamika fitoplanktona nizhney Volgi – ot reki k kaskadu. Tol'yatti: Izd-vo Samarskogo nauch. centra RAN*, 2001. P. 186–209.
- Popchenko I. I. Species composition and dynamics of phytoplankton of the Saratov reservoir. *Tol'yatti: Izd-vo Samarskogo nauch. centra RAN*, 2001. 148 p.
- Popov S. S. Potyutko O. M. Qualitative and quantitative indicators of phytoplankton of surface waters of Northern Eurasia 2014–2019: *Svidetel'stvo o registratsii bazy dannykh 2021620384*, 03.03.2021. *Zayavka No. 2021620221 ot 19.02.2021*.
- Potyutko O. M. Features of the formation of communities of surf-ice zones and their ecology on the example of the Curonian Lagoon: *Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. M.*, 2016. 24 p.
- Priymachenko A. D. Phytoplankton of the Gorky reservoir in the first years of its existence (1956–1957), *Trudy Instituta biologii vodohranilish. M.; L.: Izd-vo AN SSSR*, 1961. P. 3–19.
- Reshetnyak O. S. Nikanorov A. M. Bryzgalov V. A. Kosmenko L. S. Anthropogenic transformation of the aquatic ecosystem of the Lower Volga, *Vodnye resursy*. 2013. T. 40, No. 6. P. 623–632.
- Schegoleva I. T. Gollerbah M. M. Yellow-green algae. M.; L.: *Izd-vo AN SSSR*, 1962. 272 p. (*Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR*, Vyp. 5).
- Tarasova N. G. Burkova T. N. Phytoplankton of the Kuibyshev reservoir in August 2009, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2010. T. 12, No. 1. P. 174–178.
- Tikkanen T. *Kasviplanktonopas*. Helsinki, 1986. 278 s.
- Zabelina M. M. Kiselev I. A. Lavrenko A. I. Sheshukova V. S. Diatoms. M.: *Sov. nauka*, 1951. 620 p. (*Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR*. Vyp. 4).
- Zabelina M.M. Meyer K.I. The determinant of lower plants. Tom 1. M.: *Sovet. nauka*, 1953. 396 p.
- Zelenevskaya N. A. Dynamics of phytoplankton development of the Volgograd reservoir in 2018, *Tatischevskie chteniya: aktual'nye problemy nauki i praktiki: Materialy XVI Mezhdunar. nauch. prakt. konf.: V 2 t. T. 1. Tol'yatti*, 2019. P. 214–217.
- Zelenevskaya N. A. Phytoplankton of the Volgograd reservoir in 1990, *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatischeva*. 2010. No. 10. P. 36–42.



УДК 630*164.3;182.21;161.32

ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И УГЛЕРОДА В ПОДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЕ СРЕДНЕТАЕЖНЫХ ЛИСТВЕННЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ

ПРИСТОВА
Татьяна Александровна

кандидат биологических наук, Институт биологии Коми НЦ
УрО РАН, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистиче-
ская, д. 28, pristova@ib.komisc.ru

Ключевые слова:

послерубочные лиственные леса
корни
фитомасса
аккумуляция углерода

Аннотация: Проведены исследования подземной части фитомассы разновозрастных среднетаежных лиственно-хвойных фитоценозов послерубочного происхождения на территории Республики Коми. Получены данные по запасам органического вещества и углерода в древесных корнях диаметром менее 20 мм и подземных органах растений травяно-кустарничкового яруса на глубине до 40–55 см. Установлено, что в подземной фитомассе аккумулируется от 3.9 до 9.8 т/га органического вещества и от 1.5 до 4.6 тС/га. Установлено, что в средневозрастных лиственно-хвойных насаждениях масса древесных корней диаметром менее 20 мм в среднем в 2 раза выше, а растений травяно-кустарничкового яруса в 2 раза ниже, чем в березово-еловом молодняке. Представлена вертикальная структура распределения подземной фитомассы и запасов углерода. Выявлено, что 87–95 % от массы корней сосредоточено в верхнем 20–25-сантиметровом слое почвы. Показано распределение массы древесных корней по видам. Полученные результаты позволяют оценить участие тонких корней в пуле мобильного органического вещества и углеродном цикле в целом в среднетаежных лиственно-хвойных насаждениях послерубочного происхождения.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Н. С. Иванова

Получена: 04 апреля 2024 года

Подписана к печати: 26 июня 2024 года

Введение

В углеродном цикле лесных экосистем подземной фитомассе придается особое значение, т. к. углерод при отмирании и разложении корней переходит непосредственно в подстилку и нижележащие почвенные слои.

В настоящее время исследований по оценке вклада корней травяно-кустарничкового яруса (ТКЯ) и тонких корней деревьев, сосредоточенных непосредственно в лесной подстилке и верхнем слое почвы, немного. Многие авторы указывают на сложность в

оценке подземной фитомассы в лесных экосистемах (Kurtz et al., 1996; Ruess et al., 1996; Cairns et al., 1997; Грозовская и др., 2015). Расчеты аллометрических моделей для биомассы корней не всегда представляются возможными в связи с нехваткой исходных данных (Усольцев и др., 2022). Изучение древесных корней также усложняется разным подходом исследователей к количеству выделяемых фракций по диаметру, и тонких корней в частности (Усольцев, 2018; Карпечко, Синькевич, 2023).

В лесах умеренной зоны корни составляют примерно 25 % от надземной фитомас-

сы, по мере продвижения на север это соотношение меняется в связи с тем, что для северной растительности характерна более развитая, чем надземная фитомасса, корневая система. На европейском Севере определены запасы органического вещества в корнях ельников средней и северной тайги Архангельской (Руднева и др., 1966 и др.), Вологодской (Паршевников, 1962; Смирнов, 1962) областей, Республики Коми (Верхоланцева, Бобкова, 1972; Бобкова, 2001) и Карелии (Казимиров, Морозова, 1973). Подземная биомасса в лиственных лесах послерубочного происхождения в среднетаежной зоне на Европейском Севере изучена ранее (Смирнов, 1962; Паршевников, 1962; Казимиров и др., 1978; Вакуров, Полякова, 1982 и др.), в настоящее время она рассматривается реже (Пристова, 2010; Бобкова, Лиханова, 2012; Карпечко, Синькевич, 2023 и др.). В указанных исследованиях приведены данные либо в целом по подземной части фитомассы древесных растений и ТКЯ без разделения древесных корней по толщине, либо выделены тонкие (до 1 или 3 мм) и скелетные корни древесных растений.

Цель настоящей работы состояла в определении запасов органического вещества и углерода в древесных корнях диаметром до 20 мм и подземной фитомассе ТКЯ разновозрастных среднетаежных лиственных насаждений послерубочного происхождения.

Материалы

Исследования проводились на базе Ляльского лесозоологического стационара Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, в Княжпогостском районе Республики Коми в подзоне средней тайги. Объекты расположены на территории ГУ РК «Железнодорожное лесничество» – березово-еловый молодняк разнотравно-зеленомошный (62°19' с.ш. 50°55' в.д.) (состав древостоя 5Б5ЕедСедОс, возраст 12 лет), расположен в Кылтовском участковом лесничестве ГУ (кв. 51), лиственно-хвойное (5Ос4Б1С+Е, 45 лет) (62°15' с.ш. 50°65' в.д.) и сосново-лиственное (5С2Б2Ос1Е, 45 лет) (62°15' с.ш. 50°64' в.д.) разнотравно-черничные насаждения – на территории Ляльского заказника. Исследуемые насаждения произрастают на месте еловых и сосновых вырубок. Древостой фитоценозов сложный по составу, представлен березой повислой (*Betula pendula* Roth.) и березой пушистой (*B. pubescens* Ehrh.), елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), осинной обыкновенной (*Populus tremula* L.) и

сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), подрост – березой, елью и пихтой (*Abies sibirica* Ledeb.). Подлесок представлен ивой козьей (*Salix caprea* L.), ивой пятитычинковой (*S. pentandra* L.), ивой филиколистной (*S. philicifolia* L.), рябиной обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.), шиповником иглистым (*Rosa acicularis* Lindl.), жимолостью Палласа (*Lonicera pallasii* L.) и можжевельником обыкновенным (*Juniperus communis* L.). В ТКЯ исследуемых фитоценозов среди кустарничков наиболее распространены черника (*Vaccinium myrtillus* L.) и брусника (*V. vitis-idaea* L.), среди трав – щучка дернистая (*Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv.), иван-чай (*Chamerion angustifolium* (L.) Scop.), золотая розга (*Solidago virgaurea* L.), в моховом покрове – зеленые и политриховые мхи. Почва 45-летних насаждений – иллювиально-железистый подзол, средняя толщина подстилки 5 см, 12-летнего березово-елового молодняка – торфянисто-подзолистоглееватая, мощность подстилки 10 см. Более подробная характеристика исследуемых объектов представлена ранее (Пристова, 2010, 2019, 2022).

Методы

Подземная часть тонких древесных корней и растений ТКЯ определялась методом монолитов (Родин и др., 1968; Рожков и др., 2008). Отбор монолитов производился отдельно для подстилки (0–5 см, 0–10 см), отдельно для минеральных слоев почвы каждые 10 см на глубину до 50–55 см в 10-кратной повторности. В березово-еловом молодняке на глубине 40–50 см корни диаметром до 20 мм практически отсутствуют, поэтому данные по ним не приведены. Корни промывались через сито с размером ячеек 0.25 мм (Родин и др., 1968). Полученные образцы распределяли следующим образом: древесные корни по видам – на корни ели, березы, осины, ивы, подземные органы трав и кустарничков – без разделения на виды. Древесные корни разделяли на две основные фракции в зависимости от их диаметра: менее 1 мм и 1–20 мм. В образцах березово-елового молодняка дополнительно выделяли корни толщиной 1–2, 2–3, 3–5, 5–20 мм. Все полученные образцы высушивали при температуре 105 °С до абсолютно сухого веса (а.с.в.) и взвешивали (Орлов, 1967; Родин и др., 1968). Расчет содержания углерода в подземной фитомассе производился путем умножения веса корней каждого вида или группы видов на содержание в них угле-

рода, данные выражались в кг/га. Для расчетов использованы ранее опубликованные данные по концентрации углерода в корнях растений лиственных фитоценозов средней тайги Республики Коми (Пристова, 2010, 2022). Средняя концентрация углерода в корнях ели, березы, осины и ивы составляет 47.5; 46.2; 46.4; 47.9 % соответственно, в подземных органах кустарничков – 48.4, травах – 43.1 % (Пристова, 2022). Статистическая обработка данных по подземной фитомассе и запасам углерода включала вычисление средней арифметической, среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации (CV).

Результаты

Проведенное исследование затрагивает верхний и средний ярусы подземной части растений глубиной до 50–55 см. Как известно, подземные органы растений в лесных ценозах занимают 3 яруса: 1) верхний ярус (глубина 5–10 см) – обильно пронизан корнями, по массе преобладают физиологически активные корни деревьев и растений ТКЯ; 2) средний ярус (до 30–40 см), в котором преобладают корни кустарничков и деревьев, при этом корней ТКЯ мало; 3) нижний ярус (до 1–2 м), в котором доминируют корни деревьев (скелетная часть) (Корчагин, 1976).

Запасы органического вещества в древесных корнях диаметром менее 20 мм и подземных органах травяно-кустарничкового яруса, сосредоточенных в 40–55-сантиметровом слое почвы, включая подстилку, в исследуемых фитоценозах составили от 3.9 до 9.8 т/га (табл. 1, 2, 3). При этом в древесных корнях толщиной до 20 мм накапливается от 1.4 до 8.5 т/га органического вещества.

Для березово-елового молодняка, в связи с небольшим возрастом, размерами деревьев, составом древостоя (Пристова, 2010, 2019) и менее развитой корневой системой, по сравнению со средневозрастными лиственными насаждениями, фракции мелких и тонких корней от 1 до 5 мм представлены более подробно (см. табл. 1). Основная масса корней ограничена глубиной 30–40 см, т. к. на глубине 40–50 см корни практически отсутствуют. В молодняке, в зависимости от технологических элементов прошедшей рубки, насыщенность почвы корнями различается, поэтому показатели фитомассы

корней на месте пасечных участков и трелевочных волоков представлены отдельно (см. табл. 1). Общие запасы подземных органов растений в березово-еловом молодняке составляют 6.7 т/га на пасечном участке и 3.9 т/га на трелевочном, в т. ч. древесных корней 4.4 и 1.4 т/га соответственно (см. табл. 1). Масса корней березы и ели менее 3 мм в диаметре в 12-летнем березово-еловом молодняке составляет 1.6 т/га. Для 17-летних березово-еловых насаждений Вологодской области приводятся более высокие показатели для таких корней – 2.4–2.6 т/га (Паршевников, 1962). Корненасыщенность пасечных участков древесными корнями на 68 % выше, чем трелевочных, при этом для подземных органов ТКЯ она приблизительно одинакова. Вариабельность подземной фитомассы древесных растений с глубиной увеличивается. Так, коэффициент вариации (CV) показателя массы древесных корней на глубине до 30 см не превышает 16 %, на глубине более 30 см составляет около 30 %. На трелевочных участках масса корней, как правило, более вариабельна, чем на пасечных, особенно это выражено для корней ели. Запасы подземных органов растений травяно-кустарничкового яруса менее вариабельны, и с глубиной показатель CV увеличивается в среднем с 4 до 11 %.

Насыщенность почвы корнями (менее 20 мм) в средневозрастных смешанных лиственных насаждениях пространственно более однородна, чем в березово-еловом молодняке, и составляет 8.5 т/га в лиственно-хвойном (см. табл. 2) и 9.8 т/га в сосново-лиственном (см. табл. 3) насаждениях. Масса древесных корней в подстилке и минеральных слоях почвы сосново-лиственного насаждения на 1.2 т/га больше, чем в лиственно-хвойном. Это различие обусловлено тем, что доля участия сосны в составе древостоя сосново-лиственного насаждения выше, чем лиственно-хвойного. Вариабельность древесных корней с глубины 35 см увеличивается, в сосново-лиственном насаждении показатель CV для массы древесных корней возрастает с 6–12 до 43–50 %, в лиственно-хвойном – с 2–25 до 12–36 %. Для подземных органов растений ТКЯ наблюдается схожая тенденция – коэффициент вариации возрастает с 5–6 до 32–45 % и с 5–8 до 16–33 %.

Таблица 1. Распределение массы древесных корней (менее 20 мм) и подземных органов ТКЯ в березово-еловом молодняке, кг/га

Жизненная форма, толщина древесных корней	Глубина, участок, см*								Всего	
	0–10 (n = 10)		10–20 (n = 10)		20–30 (n = 10)		30–40 (n = 10)			
	пасечный	трелевочный	пасечный	трелевочный	пасечный	трелевочный	пасечный	трелевочный	пасечный	трелевочный
Древесные корни										
Береза	2050	300	780	110	40	-	20	10	2890	420
>1 мм	270 ± 18	40 ± 4	260 ± 11	40 ± 2	20 ± 3	-	10 ± 3	10 ± 3	560	90
1–2 мм	300 ± 29	30 ± 3	250 ± 18	50 ± 7	-	-	10 ± 3	-	560	80
2–3 мм	820 ± 73	90 ± 11	270 ± 21	20 ± 1	10 ± 1	-	-	-	1100	110
3–5 мм	290 ± 34	140 ± 9	-	-	10 ± 1	-	-	-	300	140
5–20 мм	370 ± 12	-	-	-	-	-	-	-	370	-
Ива	810	230	450	80	120	490	-	10 ± 3	1390	800
>1 мм	120 ± 9	20 ± 1	90 ± 7	30 ± 1	10 ± 1	80 ± 9	-	-	220	130
1–2 мм	250 ± 23	60 ± 3	150 ± 17	40 ± 5	30 ± 3	140 ± 17	-	10 ± 3	440	240
2–3 мм	330 ± 32	-	130 ± 7	10 ± 1	-	210 ± 19	-	-	460	220
3–5 мм	110 ± 12	-	80 ± 11	-	-	60 ± 4	-	-	190	60
5–20 мм	-	150 ± 12	-	-	80 ± 6	-	-	-	80	150
Ель	190	30	-	80	-	-	10 ± 3	-	200	110
>1 мм	40 ± 5	10 ± 2	-	40 ± 3	-	-	-	-	40	40
1–3 мм	70 ± 11	10 ± 3	-	20 ± 1	-	-	10 ± 2	-	80	30
3–5 мм	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5–20 мм	80 ± 12	10 ± 3	-	20 ± 2	-	-	-	-	80	30
Подземные органы растений ТКЯ (всего)	1180	570	350	1250	690	720	-	-	2220	2540
травы	1110 ± 46	540 ± 28	340 ± 15	1250 ± 97	690 ± 57	720 ± 65	-	-	2140	2510
кустарнички	70 ± 4	30 ± 4	10 ± 1	-	-	-	-	-	80	30

Примечание. - – данная фракция корней отсутствует, * – на глубине 40–50 см корни практически отсутствуют и в таблице не представлены. Береза представлена видами *Betula pendula*, *B. pubescens*, ива – *Salix caprea*, *S. pentandra*, *S. phillicifolia*, ель – *Picea obovata*, кустарнички – *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, травы – все травянистые виды растений, произрастающие в березово-еловом молодняке

В средневозрастных насаждениях масса подземных органов ТКЯ приблизительно одинакова и составляет 1.2–1.3 т/га, что почти в 2 раза ниже, чем в березово-еловом молодняке. Такое отличие обусловлено разницей в видовом составе напочвенного покрова, происхождением и возрастом насаждений. В травяно-кустарничковом ярусе средневозрастных насаждений, по сравнению с березово-еловым молодняком, доля участия кустарничков выше, чем трав. Как

показано ранее, березово-еловый молодняк находится на начальной стадии сукцессии и интенсивного роста, в связи с этим ТКЯ представлен травянистыми растениями, характерными для вырубков (Пристова, 2019, 2022).

В целом масса древесных корней (менее 20 мм) в средневозрастных насаждениях почти в 2 раза больше, чем в молодняке, и связано это в первую очередь с возрастом древостоя.

Таблица 2. Распределение массы древесных корней (менее 20 мм) и подземных органов ТКЯ в лиственно-хвойном насаждении, кг/га

Жизненная форма, толщина древесных корней	Глубина, см						Всего
	0–5 (n = 10)	5–15 (n = 10)	15–25 (n = 10)	25–35 (n = 10)	35–45 (n = 10)	45–55 (n = 10)	
Древесные корни							
Береза	1355	1521	594	26	90	122	3708
до 1 мм	339 ± 41	155 ± 11	58 ± 7	26 ± 4	16 ± 2	11 ± 2	605
1–20 мм	1016 ± 97	1366 ± 95	536 ± 31	-	74 ± 9	111 ± 19	3103
Осина	673	580	44	14	49	29	1389
до 1 мм	134 ± 11	52 ± 12	11 ± 1	-	13 ± 2	-	210
1–20 мм	539 ± 46	528 ± 39	33 ± 4	14 ± 3	36 ± 6	29 ± 4	1179
Сосна	77	579	278	-	-	-	934
до 1 мм	41 ± 18	42 ± 4	56 ± 7	-	-	-	139
1–20 мм	36 ± 5	537 ± 48	222 ± 17	-	-	-	795
Ель	882	333	24	3	-	3 ± 1	1245
до 1 мм	231 ± 18	48 ± 5	4 ± 1	-	-	-	283
1–20 мм	651 ± 41	285 ± 25	20 ± 3	3 ± 1	-	3 ± 1	962
Подземные органы ТКЯ (всего)							
травы	580	440	80	28	28	73	1229
кустарнички	250 ± 17	300 ± 19	20 ± 1	9 ± 1	9 ± 2	3 ± 1	591
	330 ± 19	140 ± 8	60 ± 5	19 ± 2	19 ± 2	70 ± 9	638

Примечание. - – данная фракция корней отсутствует. Береза представлена *Betula pendula*, *B. pubescens*, ель – *Picea obovata*, осина – *Populus tremula*, сосна – *Pinus sylvestris*, кустарнички – *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, травы – все травянистые виды растений, произрастающие в лиственно-хвойном фитоценозе

С глубиной в исследуемых насаждениях наблюдается уменьшение корненасыщенности почв (рис. 1, 2). В структуре подземной фитомассы древесных корней (менее 20 мм) исследуемых насаждений в верхнем 10–15 см слое почвы и органогенном горизонте сосредоточено наибольшее ее количество – от 68 до 82 %, при этом от 41 до 68 % от их массы накапливается в лесной подстилке. Особенностью березово-елового молодняка является более высокая корненасыщенность минерального слоя почвы на глубине 20–30 см на участке трелевочных волоков по сравнению с пасечными (см. рис. 1). На трелевочных участках в молодняке древесные корни на глубине 20–30 см представлены ивой, что обусловлено их зарастанием кустарниковыми видами ив (*S. pentandra*, *S. philicifolia*), реже березой и елью. Трелевочные участки отличаются переувлажнением и развитием сфагновых и зеленых мхов, что препятствует росту древесных пород и раз-

витию их корневых систем (Пристова, 2019).

Структура распределения подземной фитомассы древесных корней сосново-лиственного и лиственно-хвойного насаждений схожа между собой (см. рис. 2). Отличием сосново-лиственного насаждения является более высокая корненасыщенность подстилки и минеральных горизонтов почвы на глубине 25–35 см.

Масса физиологически активных корней толщиной до 1 мм, древесных пород (береза, ель, сосна, осина) в березово-еловом молодняке на пасечных участках составляет 0.6, на трелевочных – 0.1 т/га, в лиственно-хвойном – 1.2, в сосново-лиственном насаждении – 1.6 т/га. Более высокие результаты по этому показателю приводятся для 70-летних лиственно-еловых древостоев Карелии – 1.9 т/га (Карпечко, Синькевич, 2023).

Распределение фитомассы корней древесных растений в исследуемых насаждениях дифференцировано и представлено на

Таблица 3. Распределение массы древесных корней (менее 20 мм) и подземных органов ТКЯ в сосново-лиственном насаждении, кг/га

Жизненная форма, вид, толщина корней	Глубина, см						Всего
	0–5 (n = 10)	5–15 (n = 10)	15–25 (n = 10)	25–35 (n = 10)	35–45 (n = 10)	45–55 (n = 10)	
Береза	1628	954	253	435	146	83	3499
до 1 мм	269 ± 31	150 ± 9	75 ± 4	56 ± 13	19 ± 3	7 ± 3	576
1–20 мм	1359 ± 155	804 ± 65	178 ± 34	379 ± 39	127 ± 17	76 ± 17	2923
Осина	746	926	326	-	65	26	2089
до 1 мм	127 ± 14	105 ± 14	48 ± 3	-	11 ± 4	1 ± 0.2	292
1–20 мм	619 ± 71	821 ± 132	278 ± 14	-	54 ± 7	25 ± 6	1797
Сосна	625	719	287	-	-	-	1631
до 1 мм	291 ± 33	244 ± 23	48 ± 3	-	-	-	583
1–20 мм	334 ± 38	475 ± 122	239 ± 12	-	-	-	1048
Ель	629	294	20	101	-	4	1048
до 1 мм	121 ± 14	29 ± 4	3 ± 1	2 ± 1	-	1 ± 0.3	156
1–20 мм	508 ± 58	265 ± 13	17 ± 1	99 ± 15	-	3 ± 1	892
Ива	46	101	53	26	-	-	226
до 1 мм	12 ± 1	35 ± 5	23 ± 3	3 ± 1	-	-	73
1–20 мм	34 ± 2	66 ± 7	30 ± 2	23 ± 8	-	-	153
Подземные органы ТКЯ	657	309	192	20	27	62	1267
травы	243 ± 11	131 ± 7	33 ± 2	3 ± 0.1	11 ± 5	2 ± 1	423
кустарнички	414 ± 21	178 ± 9	159 ± 8	17 ± 3	16 ± 7	60 ± 21	844

Примечание. - – данная фракция корней отсутствует. Береза представлена *Betula pendula*, *B. pubescens*, ель – *Picea obovata*, осина – *Populus tremula*, сосна – *Pinus sylvestris*, ива – *Salix caprea*, *S. pentandra*, кустарнички – *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, травы – все травянистые виды растений, произрастающие в лиственно-хвойном фитоценозе.

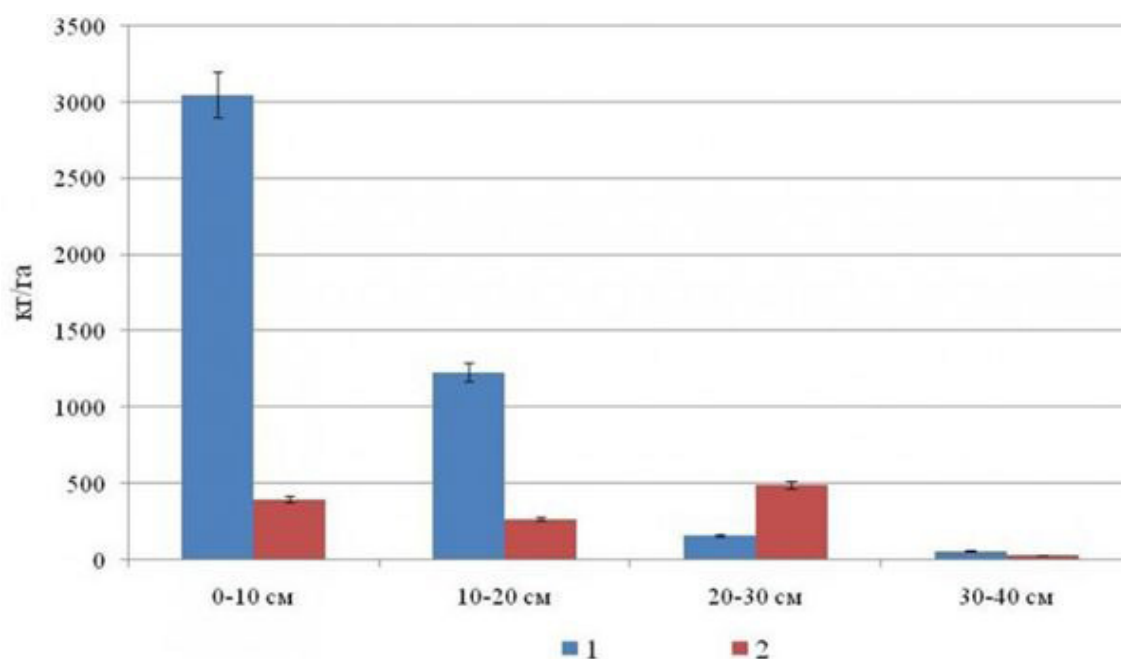


Рис. 1. Распределение массы древесных корней (менее 20 мм) на месте пасечных участков (1) и трелевочных волоков (2) в березово-еловом молодняке на разной глубине

Fig. 1. Distribution of the mass of tree roots (less than 20 mm) at the site of cutting sections (1) and skidding lines (2) in birch-spruce young growth at different depths

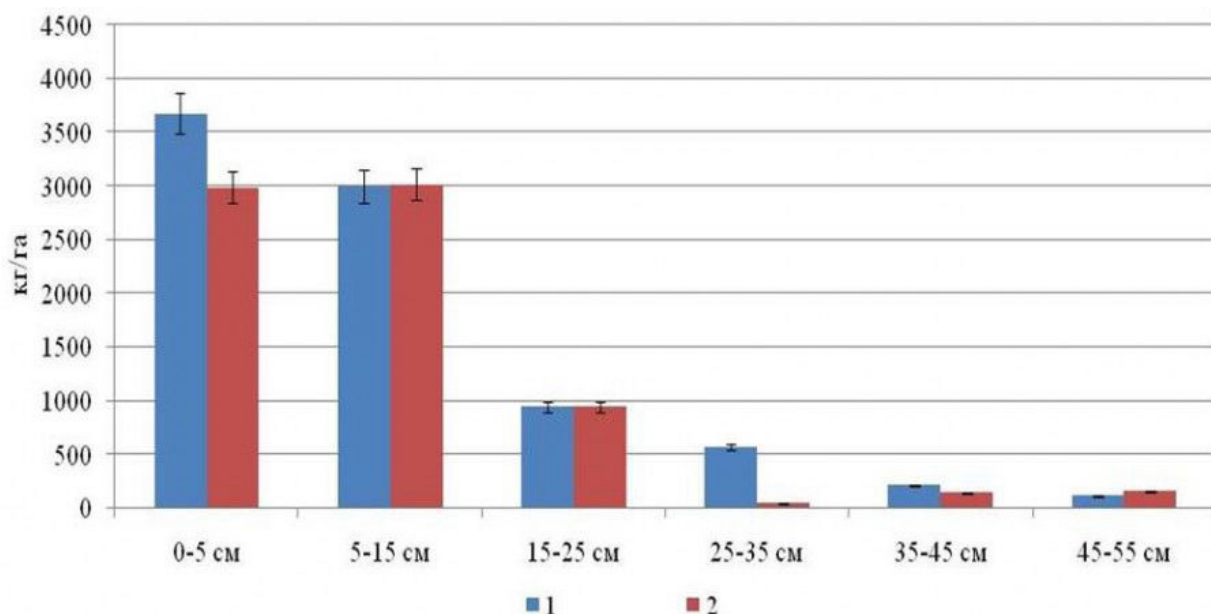


Рис. 2. Распределение массы древесных корней (менее 20 мм) в сосново-лиственном (1) и лиственно-хвойном (2) насаждениях на разной глубине, кг/га

Fig. 2. Distribution of the tree roots mass (less than 20 mm) in pine-deciduous (1) and deciduous-coniferous (2) stands at different depths, kg/ha

рис. 3. Максимальная подземная фитомасса во всех трех фитоценозах характерна для корней березы (42–65 %), на втором месте в средневозрастных насаждениях – корни осины (19–25 %), в березово-еловом молодняке – ивы (31 %).

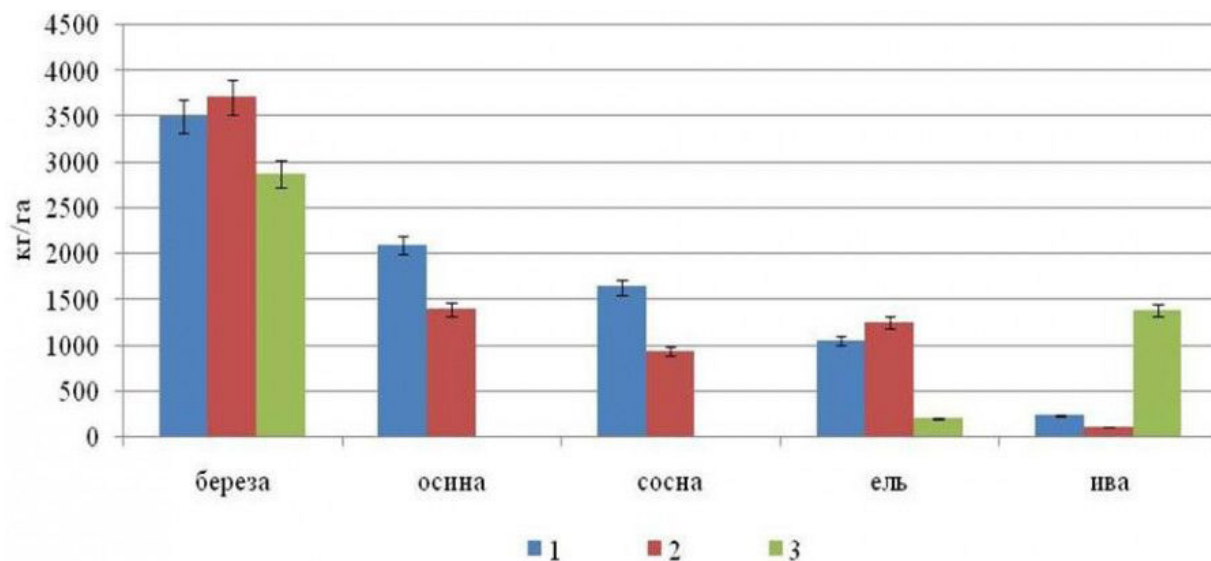


Рис. 3. Распределение массы древесных корней (менее 20 мм) в сосново-лиственном (1), лиственно-хвойном (2) насаждениях и березово-еловом молодняке (3), кг/га

Fig. 3. Distribution of tree roots mass (less than 20 mm) by species in pine-deciduous (1), deciduous-coniferous (2) stands and birch-spruce young forest (3), kg/ha

Запасы углерода в подземной фитомассе исследуемых фитоценозов составляют от 1.5 до 4.6 тС/га, при этом в древесных корнях накапливается от 0.4 до 4.0 тС/га (табл. 4). В средневозрастных насаждениях в подземной фитомассе депонируется в среднем поч-

ти в 2 раза больше углерода по сравнению с березово-еловым молодняком. Следует отметить, что на пасечных участках молодняка это различие составляет 1.3-1.5 раза, а на трелевочных – 2.7-3.1 раза.

Таблица 4. Запасы углерода в древесных корнях (менее 20 мм) и подземных органах трав и кустарничков лиственных фитоценозов

Жизненная форма, вид	Лиственнично-хвойное насаждение		Сосново-лиственное насаждение		Березово-еловый молодняк, участок			
	кгС/га	%	кгСга	%	пасечный		трелевочный	
	кгС/га	%	кгСга	%	кгС/га	%	кгС/га	%
Древесные корни (всего)	3410	86	3996	87	2077	68	393	26
сосна	461	12	804	18	-	-	-	-
береза	1713	43	1617	35	1326	44	-	-
ель	591	15	498	11	90	3	10	1
осина	645	16	969	21	-	-	-	-
ива	-	-	108	2	661	22	383	26
Подземные органы ТКЯ (всего)	564	14	591	13	961	32	1097	74
кустарнички	309	8	409	9	39	1	15	1
травы	255	6	182	4	922	30	1082	73
Итого	3974	100	4587	100	3038	100	1490	100

Большая часть углерода (68–87 %) аккумулируется в корнях деревьев (менее 20 мм), исключение составляют трелевочные участки березово-елового молодняк, где накопление углерода в древесных корнях составляет 26 % (см. табл. 4). В лесной подстилке, в древесных корнях деревьев (менее 20 мм) накапливается 36–56 %, в подземных органах растений ТКЯ – 44–64 % от общего запаса углерода, сосредоточенного в определяемой подземной фитомассе.

Обсуждение

Одним из основных результатов проведенного исследования является получение данных по запасам органического вещества и углерода в подземной части фитомассы лиственных фитоценозов. Согласно полученным данным, древесные корни (менее 20 мм) исследуемых фитоценозов аккумулируют от 1.4 до 8.5 т/га органического вещества и от 0.4 до 3.4 т/га углерода. Эти показатели находятся в одном диапазоне с данными других исследователей для лиственных и хвойных лесов таежной зоны, в том случае если сравнивать с нашими результатами, полученными для древесных корней диаметром до 20 мм. Так, в таежных лесах Аляски фитомасса живых тонких древесных корней составляет 3–8 т/га (Ruess et al., 1996), в ельнике зеленомошном Архангельской области – 4 т/га (Руднева и др., 1966), в ельниках Республики Коми в 30-сантиметровом слое почвы от 4 до 16 т/га (Верхоланцева, Бобкова, 1972). Однако, если рассматривать только тонкие древесные корни толщиной до 1 мм, то различие с хвойными лесами будет выше, т. к. в исследуемых лиственных фитоцено-

зах масса таких корней составляет 0.6–1.6 т/га, а в ельниках – 2–10 т/га (Верхоланцева, Бобкова, 1972). Масса корней березы и ели толщиной до 3 мм на пасечных участках в исследуемом березово-еловом насаждении составляет 2.3 т/га, что вполне сопоставимо с 17-летними березово-еловыми молодняками средней тайги Вологодской области, в которых этот показатель равняется 2.4–2.6 т/га (Паршевников, 1962), и лиственнично-еловым насаждением Карелии (3.8 т/га) (Карпечко, Синькевич, 2023). Биомасса березовых и еловых корней толщиной до 2 мм в изучаемом молодняке составляет около 1.2 т/га, что в 2 раза меньше, чем в хвойных насаждениях Финляндии (Helmisaary et al., 2007). Таким образом, возникает определенная сложность при сравнении полученных результатов с данными других исследователей. Сравнение данных возможно только для корней определенной толщины. Одной из проблем при изучении древесных корней является то, что в настоящее время нет четкого подхода к разделению корней на фракции по диаметру, что отмечается многими исследователями (Усольцев, 2018; Карпечко, Синькевич, 2023 и др.). Так, корни деревьев, по мнению одних авторов, по толщине разделяют на следующие фракции: 1) 0–3 мм – тонкие сосущие корни; 2) 3–10 мм – ростовые корни; 3) 10–20 мм – ростовые корни; 4) менее 20 мм – корни, выполняющие опорную функцию (Базилевич, Титлянова, 1978). По мнению других исследователей, древесные корни разделяются так: 1) до 1 мм – сосущие корни; 2) 1–3 мм – полускелетные (проводящие); 3) более 3 мм –

скелетные (проводящие) (Рахтеенко, 1952). Финские исследователи выделяют корни до 2 мм как тонкие, диаметром 2–5 мм как мелкие, а остальные – скелетные толстые корни (Helmisaary et al., 2007). Некоторые исследователи при изучении лиственных и лиственно-хвойных насаждений послерубочного происхождения относят к тонким корням фракции до 3 мм (Паршевников, 1962; Смирнов, 1962; Карпечко, Синькевич, 2023), дополнительно выделяя корни менее 1 мм (Карпечко, Синькевич, 2023). Таким образом, у исследователей подходы к количеству фракций при разделении древесных корней и выделении тонких корней разные. При проведении настоящих исследований применялись два варианта разделения древесных корней по толщине. В первом случае для всех трех насаждений были выделены корни толщиной до 1 мм и 1–20 мм. Во втором варианте для березово-елового молодняка из фракции диаметром 1–20 мм выделены корни толщиной 1–2, 2–3, 3–5, 5–20 мм. Такой подход к разделению корней в этом фитоценозе обусловлен рядом причин: особенностями вертикальной структуры подземной фитомассы, более ограниченной глубиной их проникновения по сравнению со средневозрастными насаждениями, небольшой массой корней толщиной 5–20 мм. Кроме того, выделение большего количества фракций корней толщиной до 5 мм позволило сопоставить полученные данные с результатами других исследователей.

Таким образом, количество выделенных фракций при распределении корней по толщине может быть связано как с особенностями изучаемого объекта, так и с поставленными задачами. При определении количества депонируемого углерода в подземной фитомассе древесных растений важное значение придается крупным скелетным корням, а при оценке пула МОВ в углеродном цикле – тонким древесным корням и подземным органам растений ТКЯ (Kurtz et al., 1996). Для исследований в области физиологии древесных растений изучение тонких физиологически активных корней диаметром до 1 мм более актуально, чем других фракций (Рахтеенко, 1952; Helmisaari et al., 2007; Карпечко, Синькевич, 2023).

В подземных органах растений ТКЯ исследуемых насаждений сосредоточено от 1.2 до 2.5 т/га органического вещества и от 0.6 до 1.1 т/га углерода. Подземные органы растений ТКЯ среднетаежных хвойных насаждений Республики Коми аккумулируют от

1.3 (Бобкова, 2001) до 2.4 т/га органического вещества (Запрудина, 2010), что довольно близко к нашим данным.

Полученные данные позволяют оценить не только запасы органического вещества и углерода в подземных органах растений, но и вертикальную структуру их распределения. В целом для всех исследуемых насаждений характерно преимущественное распределение корней деревьев (менее 20 мм) и подземных органов растений ТКЯ в верхнем 20–25-сантиметровом слое почвы – 87–95 % от общей массы корней. Похожие данные приводятся для хвойных лесов (Верхоланцева, Бобкова, 1972; Helmisaari, 2007). Средневозрастные лиственно-хвойные насаждения отличаются более глубоким распределением корней по сравнению с березово-еловым молодняком. Это в первую очередь обусловлено возрастом деревьев. Как известно, с возрастом у деревьев рост корней увеличивается (Рахтеенко, 1952). Также важным фактором является большая доля участия сосны в формировании древостоев средневозрастных насаждений. Как известно, в сосняках черничного типа корневая система сосны интенсивно использует весь освоенный корнями почвенный профиль (Тюкавина, Евдокимов, 2016). Показано, что вариабельность показателей подземной фитомассы увеличивается с глубиной, что обусловлено значительной разреженностью и снижением массы корней с 30–35 см глубины.

Результаты проведенных исследований также отражают распределение подземной фитомассы отдельных видов древесных растений. Согласно представленным данным, корни ели накапливают меньше органического вещества и углерода (5–17 %), чем корни лиственных пород (65–69 %). Участие ели в составе древостоя не превышает 10 %. Однако, как показано ранее, количество ели в подросте больше, чем в древостое: в березово-еловом молодняке – 12, в средневозрастных насаждениях – 1–2 тыс. экз./га (Пристова, 2010, 2019). По данным исследователей, изучавших корневые системы смешанных березово-еловых насаждений, корни ели могут угнетаться корнями березы, и лишь по мере естественного изреживания березы в древостое происходит разделение экологических ниш и снижение конкуренции между этими породами (Чибисов, 1971; Рахтеенко, 1981). Также многими авторами отмечается, что корни лиственных пород более активно осваивают почвенные горизонты и используют их ресурсы, а корни ели сосредото-

ны преимущественно в верхних слоях почвы (Рахтеенко, 1981; Mekontchou, 2020; Shanin, 2015). В то же время сосна в смешанных с березой насаждениях растет лучше и более устойчива, чем в чистых культурах (Рахтеенко, 1963).

Заключение

Проведена оценка запасов органического вещества и углерода в древесных корнях толщиной до 20 мм и подземных органах растений ТКЯ на глубине до 40–55 см в разновозрастных среднетаежных лиственно-хвойных фитоценозах послерубочного происхождения на территории Республики Коми. Установлено, что в подземной фитомассе аккумулируется от 3.9 до 9.8 т/га органического вещества и от 1.5 до 4.6 тС/га. Исследование структуры подземной фитомассы древесных корней (менее 20 мм) по-

казало, что в верхнем 10–15-сантиметровом минеральном слое почвы и органогенном горизонте сосредоточено наибольшее количество корней – от 68 до 82 %. Согласно полученным данным, возраст и состав древостоя оказывают влияние на запасы органического вещества и углерода. В средневозрастных лиственно-хвойных насаждениях эти показатели в среднем в 2 раза выше, чем в молодняке. Показано, что более высокая доля участия сосны в древостое сосново-лиственного насаждения по сравнению с лиственно-хвойным увеличивает запасы подземной фитомассы на 1.2 т/га. Проведенные исследования по депонированию углерода в подземной фитомассе позволяют оценить ее участие в пуле МОВ и углеродном цикле в целом в лиственно-хвойных насаждениях послерубочного происхождения.

Библиография

- Базилевич Н. И., Титлянова А. А., Смирнов В. В., Родин Л. Е., Нечаева Н. Т., Левин Ф. И. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. М.: Наука, 1978. 184 с.
- Бобкова К. С. Еловые леса // Биопродукционный процесс в лесных экосистемах Севера / Отв. ред. К. С. Бобкова, Э. П. Галенко. СПб.: Наука, 2001. С. 52–67.
- Бобкова К. С., Лиханова Н. В. Вынос углерода и элементов минерального питания при сплошнолесосечных рубках ельников средней тайги // Лесоведение. 2012. № 6. С. 44–54.
- Вакуров А. Д., Полякова А. Ф. Круговорот азота и минеральных элементов в 35-летнем осиннике // Круговорот химических веществ в лесу. М.: Наука, 1982. С. 44–54.
- Верхоланцева Л. А., Бобкова К. С. Влияние почвенных условий на корневые системы древесных пород в еловых насаждениях подзоны северной тайги. Сыктывкар: Коми филиал АН СССР, 1972. 56 с. (Серия препринтов «Научные доклады» / АН СССР. Коми филиал; Вып. 6).
- Грозовская И. С., Ханина Л. Г., Смирнов В. Э., Бобровский М. В., Романов М. С., Глухова Е. М. Биомасса напочвенного покрова в еловых лесах Костромской области // Лесоведение. 2015. № 1. С. 63–76.
- Запрудина М. В. Фитомасса травяно-кустарничкового и мохового ярусов темнохвойных высокоотравных лесов Печоро-Илычского заповедника // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12, № 1 (3). С. 876–879.
- Казимиров Н. И., Морозова Р. М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука, 1973. 175 с.
- Казимиров Н. И., Морозова Р. М., Куликова В. Н. Органическая масса и потоки веществ в березняках средней тайги. Л.: Наука, 1978. 216 с.
- Карпечко А. Ю., Синькевич С. М. Влияние реконструктивной рубки в лиственно-еловом древостое на корневую конкуренцию пород // Лесной журнал. 2023. № 3. С. 99–112.
- Корчагин А. А. Строение растительных сообществ // Полевая геоботаника. Л.: Наука, 1976. С. 5–320.
- Орлов А. Я. Метод определения массы корней деревьев в лесу и возможность учета годичного прироста органической массы в толще лесной почвы // Лесоведение. 1967. № 1. С. 64–70.
- Паршевников А. Л. Круговорот азота и зольных элементов в связи со сменой пород в лесах средней тайги // Типы леса и почвы северной части Вологодской области: Труды Института леса и древесины / Под ред. Г. П. Мотовилова. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 196–209.
- Пристова Т. А. Компоненты углеродного цикла в лиственно-хвойном насаждении средней тайги // Лесоведение. 2010. № 6. С. 12–19.
- Пристова Т. А. Динамика древесной растительности в лиственных насаждениях послерубочного происхождения (подзона средней тайги Республики Коми) // Принципы экологии. 2019. Т. 8, № 3. С. 63–73.
- Пристова Т. А. Содержание углерода в растениях среднетаежных лиственных фитоценозов Республики Коми // Принципы экологии. 2022. № 3. С. 43–49.
- Рахтеенко И. Н. Корневое питание ели и березы при взаимодействии их корневых систем // Известия АН БССР. Сер.: биол. науки. 1981. № 3 (5–8). С. 123.

- Рахтеенко И. Н. Корневые системы древесных и кустарниковых пород . М.; Л: Гослесбумиздат, 1952. 106 с.
- Родин Л. Е., Ремезов Н. П., Базилевич Н. И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах . Л.: Наука, 1968. 145 с.
- Рожков В. А., Кузнецова И. В., Рахматуллоев Х. Р. Методы изучения корневых систем в поле и лаборатории . М.: Изд-во МГУЛ, 2008. 51 с.
- Руднева Е. Н., Тонконогов В. Д., Дорохова К. Я. Круговорот зольных элементов и азота в ельнике-зеленомошнике северной тайги бассейна р. Мезень // Почвоведение. 1966. № 1. С. 14–26.
- Смирнов В. В. Изменение сырораствующей органической массы в еловых и елово-лиственных древостоях средней тайги в связи с их возрастом // Материалы к научному обоснованию некоторых лесохозяйственных мероприятий в северной части Вологодской области: Труды Института леса и древесины. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. Т. LIII. С. 103–125.
- Тюкавина О. Н., Евдокимов В. Н. Корневая система сосны обыкновенной в условиях северотаежной зоны // ИВУЗ. «Лесной журнал». 2016. № 1. С. 55–65.
- Усольцев В. А. В подвалах биосферы: что мы знаем о первичной продукции корней деревьев? // Эко-потенциал. 2018. № 4 (24). С. 24–77.
- Усольцев В. А., Цепордей И. С., Норицын Д. В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесобразующих пород Урала // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 1 (80). С. 4–14.
- Чибисов Г. А. Рост корневых систем в березово-еловых насаждениях и влияние на них рубок ухода // Сборник работ по лесному хозяйству и лесохимии. Архангельск: Сев.-зап. кн. изд-во, 1971. С. 121–130.
- Cairns M. A., Brown S., Helmer E. H., Baumgardner G. A. Root biomass allocation in the world's upland forests // Oecologia. 1997. № 11. P. 1–11.
- Helmisaari H.-S., Derome J., Nöjd P., Kukkola M. Fine Root Biomass in Relation to Site and Stand Characteristics in Norway Spruce and Scots Pine Stands // Tree Physiology. 2007. Vol. 27, No. 10. P. 1493–1504. DOI: 10.1093/treephys/27.10.1493.
- Kurtz W. A., Beukema S. J., Apps M. J. Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget model of the Canadian forest sector // Can J. For. Res. 1996. Vol. 26. P. 1973–1979.
- Mekontchou C. G., Houle D., Bergeron Y., Drobyshev I. Contrasting Root System Structure and Belowground Interactions Between Black Spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P) and Trembling Aspen (*Populus tremuloides* Michx) in Boreal Mixedwoods of Eastern Canada // Forests. 2020. Vol. 11, No. 2. P. 127. DOI: 10.3390/f11020127.
- Ruess R. W., Van Cleve K., Yarie J., Viereck Z. V. Contributions of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior // Can. J. For. Res. 1996. Vol. 28. P. 1326–1336.
- Shanin V. N., Rocheva L. K., Shashkov M. P., Ivanova N. V., Moskalenko S. V., Burnasheva E. R. Spatial Distribution Features of the Root Biomass of Some Tree Species (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula*) // Biology Bulletin. 2015. Vol. 42, No. 3. P. 260–268. DOI: 10.1134/S1062359015030115.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке темы госзадания Института биологии Коми научного центра УрО РАН «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России» (№ 122040100031–8).

STOCKS OF ORGANIC MATTER AND CARBON IN THE UNDERGROUND PHYTOMASS OF MIDDLE TAIGA DECIDUOUS PHYTOCENOSSES

PRISTOVA
Tatiana Alexandrovna

Ph.D., Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB Komi SC UB RAS), Komi Republic, Syktyvkar, Kommunisticheskaya, 28, pristova@ib.komisc.ru

Keywords:

post-felling deciduous forests roots
phytomass
carbon accumulation

Summary:

We carried out the studies of the underground part of phytomass of different-aged deciduous-coniferous phytocenoses of post-felling origin in the middle taiga on the Komi Republic. Data on the stocks of organic matter and carbon in tree roots less than 20 mm in diameter and underground parts of plants of the grass shrub layer at a depth of 40-55 cm were obtained. It was established that from 3.9 to 9.8 t/ha of organic matter and from 1.5 to 4.6 tC/ha were accumulated in the underground phytomass. It was found that in medium-aged deciduous-coniferous stands the mass of tree roots less than 20 mm in diameter was on average 2 times higher, and that of plants of grass shrub layer is 2 times lower than in birch-spruce young growth. The vertical structure of distribution of underground phytomass and carbon stocks is presented. It was revealed that 87–95 % of the root mass is concentrated in the upper 20–25 cm layer of soil. The distribution of tree root mass by species is shown. The obtained results allow us to assess the participation of fine roots in the pool of mobile organic matter and carbon cycle in general in middle taiga deciduous-coniferous stands of post-felling origin.

Reviewer: N. S. Ivanova

Received on: 04 April 2024

Published on: 26 June 2024

References

- Bazilevich N. I. Titlyanova A. A. Smirnov V. V. Rodin L. E. Nechaeva N. T. Levin F. I. Methods of studying the biological cycle in various natural zones. M.: Nauka, 1978. 184 p.
- Bobkova K. S. Lihanova N. V. Removal of carbon and elements of mineral nutrition during continuous cutting of spruce forests of the middle taiga, *Lesovedenie*. 2012. No. 6. P. 44–54.
- Bobkova K. S. Spruce forests, Bioprodukcionnyy process v lesnyh ekosistemah Severa, *Otv. red. K. P. Bobkova, E. P. Galenko*. SPb.: Nauka, 2001. P. 52–67.
- Cairns M. A., Brown S., Helmer E. H., Baumgardner G. A. Root biomass allocation in the world's upland forests, *Oecologia*. 1997. No. 11. P. 1–11.
- Chibisov G. A. The growth of root systems in birch-spruce plantations and the impact of logging on them, *Sbornik rabot po lesnomu hozyaystvu i lesohimii*. Arhangel'sk: Sev, zap. kn. izd-vo, 1971. P. 121–130.
- Grozovskaya I. S. Hanina L. G. Smirnov V. E. Bobrovskiy M. V. Romanov M. S. Gluhova E. M. Biomass of ground cover in spruce forests of the Kostroma region, *Lesovedenie*. 2015. No. 1. P. 63–76.
- Helmisaari H, S., Derome J., Nöjd P., Kukkola M. Fine Root Biomass in Relation to Site and Stand Characteristics in Norway Spruce and Scots Pine Stands, *Tree Physiology*. 2007. Vol. 27, No. 10. P. 1493–1504. DOI: 10.1093/treephys/27.10.1493.
- Karpechko A. Yu. Sin'kevich S. M. The influence of reconstructive logging in a deciduous spruce stand on the root competition of rocks, *Lesnoy zhurnal*. 2023. No. 3. P. 99–112.
- Kazimirov N. I. Morozova R. M. Kulikova V. N. Organic mass and flows of substances in birch forests of the middle taiga. L.: Nauka, 1978. 216 p.
- Kazimirov N. I. Morozova R. M. Biological cycling of substances in spruce forests of Karelia. L.: Nauka, 1973. 175 p.
- Korchagin A. A. The structure of plant communities, *Polevaya geobotanika*. L.: Nauka, 1976. P. 5–320.
- Kurtz W. A., Beukema S. J., Apps M. J. Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget model of the Canadian forest sector, *Can J. For. Res.* 1996. Vol. 26. P. 1973–1979.
- Mekontchou C. G., Houle D., Bergeron Y., Drobyshev I. Contrasting Root System Structure and Below-ground Interactions Between Black Spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P) and Trembling Aspen (Pop-

- ulus tremuloides Michx) in Boreal Mixedwoods of Eastern Canada, Forests. 2020. Vol. 11, No. 2. P. 127. DOI: 10.3390/f11020127.
- Orlov A. Ya. A method for determining the mass of tree roots in the forest and the possibility of taking into account the annual increase in organic matter in the thickness of the forest soil, Lesovedenie. 1967. No. 1. P. 64–70.
- Parshevnikov A. L. The cycle of nitrogen and ash elements in connection with the change of rocks in the forests of the middle taiga, Tipy lesa i pochvy severnoy chasti Vologodskoy oblasti: Trudy Instituta lesa i drevesiny, Pod red. G. P. Motovilova. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1962. P. 196–209.
- Pristova T. A. Carbon content in plants of medium-taiga deciduous phytocenoses of the Komi Republic, Principy ekologii. 2022. No. 3. P. 43–49.
- Pristova T. A. Components of the carbon cycle in deciduous and coniferous plantations of the middle taiga, Lesovedenie. 2010. No. 6. P. 12–19.
- Pristova T. A. Dynamics of woody vegetation in deciduous plantations of post-harvest origin (subzone of the middle taiga of the Komi Republic), Principy ekologii. 2019. T. 8, No. 3. P. 63–73.
- Rahteenko I. N. Root nutrition of spruce and birch in the interaction of their root systems, Izvestiya AN BSSR. Ser.: biol. nauki. 1981. No. 3 (5–8). P. 123.
- Rahteenko I. N. Root systems of tree and shrub species. M.; L: Goslesbumizdat, 1952. 106 p.
- Rodin L. E. Remezov N. P. Bazilevich N. I. Methodological guidelines for the study of dynamics and biological cycle in phytocenoses. L.: Nauka, 1968. 145 p.
- Rozhkov V. A. Kuznecova I. V. Rahmatulloev H. R. Methods of studying root systems in the field and laboratory. M.: Izd-vo MGUL, 2008. 51 p.
- Rudneva E. N. Tonkonogov V. D. Dorohova K. Ya. The cycle of ash elements and nitrogen in the spruce forest of the northern taiga of the Mezen river basin, Pochvovedenie. 1966. No. 1. P. 14–26.
- Ruess R. W., Van Cleve K., Yarie J., Viereck Z. V. Contributions of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior, Can. J. For. Res. 1996. Vol. 28. P. 1326–1336.
- Shanin V. N., Rocheva L. K., Shashkov M. P., Ivanova N. V., Moskalenko S. V., Burnasheva E. R. Spatial Distribution Features of the Root Biomass of Some Tree Species (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula*), Biology Bulletin. 2015. Vol. 42, No. 3. P. 260–268. DOI: 10.1134/S1062359015030115.
- Smirnov V. V. Changes in the raw-growing organic mass in spruce and spruce-deciduous stands of the middle taiga due to their age, Materialy k nauchnomu obosnovaniyu nekotorykh lesohozyaystvennykh meropriyatiy v severnoy chasti Vologodskoy oblasti: Trudy Instituta lesa i drevesiny. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1962. T. LIII. P. 103–125.
- Tyukavina O. N. Evdokimov V. N. The root system of Scots pine in the conditions of the North taiga zone, IVUZ. «Lesnoy zhurnal». 2016. No. 1. P. 55–65.
- Usol'cev V. A. Cepordey I. S. Noricyn D. V. Allometric models of biomass of trees of forest-forming rocks of the Urals, Lesa Rossii i hozyaystvo v nih. 2022. No. 1 (80). P. 4–14.
- Usol'cev V. A. In the basements of the biosphere: what do we know about the primary production of tree roots?, Eko-potencial. 2018. No. 4 (24). P. 24–77.
- Vakurov A. D. Polyakova A. F. Circulation of nitrogen and mineral elements in a 35-year-old aspen grove, Krugovorot himicheskikh veschestv v lesu. M.: Nauka, 1982. P. 44–54.
- Verholanceva L. A. Bobkova K. S. The influence of soil conditions on the root systems of tree species in spruce plantations of the northern taiga subzone. Syktyvkar: Komi filial AN SSSR, 1972. 56 p. (Seriya preprintov «Nauchnye doklady», AN SSSR. Komi filial; Vyp. 6).
- Zaprudina M. V. Phytomass of grass-shrub and moss tiers of dark coniferous high-grass forests of the Pechora-Ilych Reserve, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2010. T. 12, No. 1 (3). P. 876–879.



УДК 551.2.03; 574.583

ПРИНЦИПЫ ЛАНДШАФТНО-БИОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ И ШЕЛЬФА НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

РАКИТИН
Тихон Дмитриевич

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, д. 7-9, 199034, gatwar47@mail.ru

Ключевые слова:

ландшафтно-биономическое районирование морфоструктуры береговая зона Японское море донные биоценозы

Аннотация: Известная система единиц экологического (биономического) районирования береговой зоны и шельфа отображает глобальные особенности природы океана, где исходными единицами районирования служат морские экорегионы. Каждый экорегион – это региональный морской бассейн (море) со сложными своеобразными природно-климатическими условиями и факторами: солнечная радиация, рельеф побережья (берега, дна), теплообмен поверхности моря с атмосферой и адвекция морских масс, переносимых течениями и волнами. Вопросы теории и практики требуют разработки единиц детального районирования морских экорегионов. На практике принципы ландшафтно-биономического районирования основываются на использовании трех его систем единиц: морфоструктурное строение берегов, географическая зональность и вертикальная поясность. Каркасом районирования служат береговые морфоструктуры, которые располагаются вдоль побережий морского бассейна. Они определяют выделение морфоструктурных областей и районов, которые различаются по знаку унаследованных новейших и современных тектонических движений. В свою очередь внутренняя геодинамика формирует берега продольного и поперечного типов и поверхности грунта (твердые, рыхлые). Вертикальными подразделениями в береговой зоне являются литораль и sublитораль, которые подразделяются на этажи и ступени, отражающие биологическое разнообразие донных биоценозов. Широтные географические зоны поверхности моря разделяют его на границы изотермой 5 °С. Предложенная система единиц районирования позволяет отобразить детальные особенности биономических условий и связанное с ними биологическое разнообразие, которое варьируется видами в пределах береговой зоны с юго-запада на северо-запад исследуемого моря. Данная статья посвящена принципам ландшафтно-биономического районирования береговой зоны и шельфа на примере северо-западной части Японского моря.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 20 июня 2024 года

Подписана к печати: 27 июня 2024

Введение

Известная система единиц биономического районирования береговой зоны и

шельфа (Spalding et al., 2007) отображает наиболее крупные глобальные особенности природы океана. В качестве исходной

единицы районирования авторы выделяют морские экорегионы (морские бассейны). При детальном районировании морских экорегионов необходимо учитывать три системы единиц: морфоструктурное строение, служащее каркасом ландшафтно-биономического районирования, вертикальную и географическую зональность (Петров, 2020; Petrov, 2022). В настоящей работе при описании морфоструктурных районов в береговой зоне и на шельфе в северо-западной части Японского моря также отмечается их принадлежность к вертикальному подразделению и географической зональности.

Материалы

Северо-западная часть Японского моря располагается в географических координатах 40–55° с.ш. и 130–144° в.д. Области биономических районов с шагом вытягиваются с юга на север. Границы областей (районов) пролегают от суши до бровки шельфа: I. Сихотэ-Алиньская область: 1.1. Южно-приморский (41–43° с.ш. и 131–133° в.д., м. Гамова

и м. Лихачёва) и 1.2. Центральнo-приморский (42–46° с.ш. и 133–139° в.д., м. Лихачёва и м. Бакланий) районы; II. Островная Сахалинская область: 2.1. Северный район (49–52° с.ш. и 142–143° в.д., м. Тык и м. Ламанон), 2.2. Перешеек Поясок (47–49° с.ш. и 142–143° в.д., м. Ламанон и м. Яблоновый) и 2.3. Южный район (46–47° с.ш. и 142–143° в.д., м. Яблоновый и м. Криньон); III. Область северной части Татарского пролива (52–53° с.ш. и 141–142° в.д. и 49–52° с.ш. и 142–143° в.д., м. Южный и м. Тык – северная граница; 54° с.ш. и 141–142° в.д., зал. Счастья и о. Байдукова – южная граница).

Районы исследований были нанесены на цифровую модель карты (ArcMap, 2023), затем проведено экологическое описание литоральных и подводных сообществ.

Для выделения физико-географических особенностей крупных морфоструктур (ландшафтов) была использована региональная крупномасштабная карта Дальневосточного региона (рис. 1).

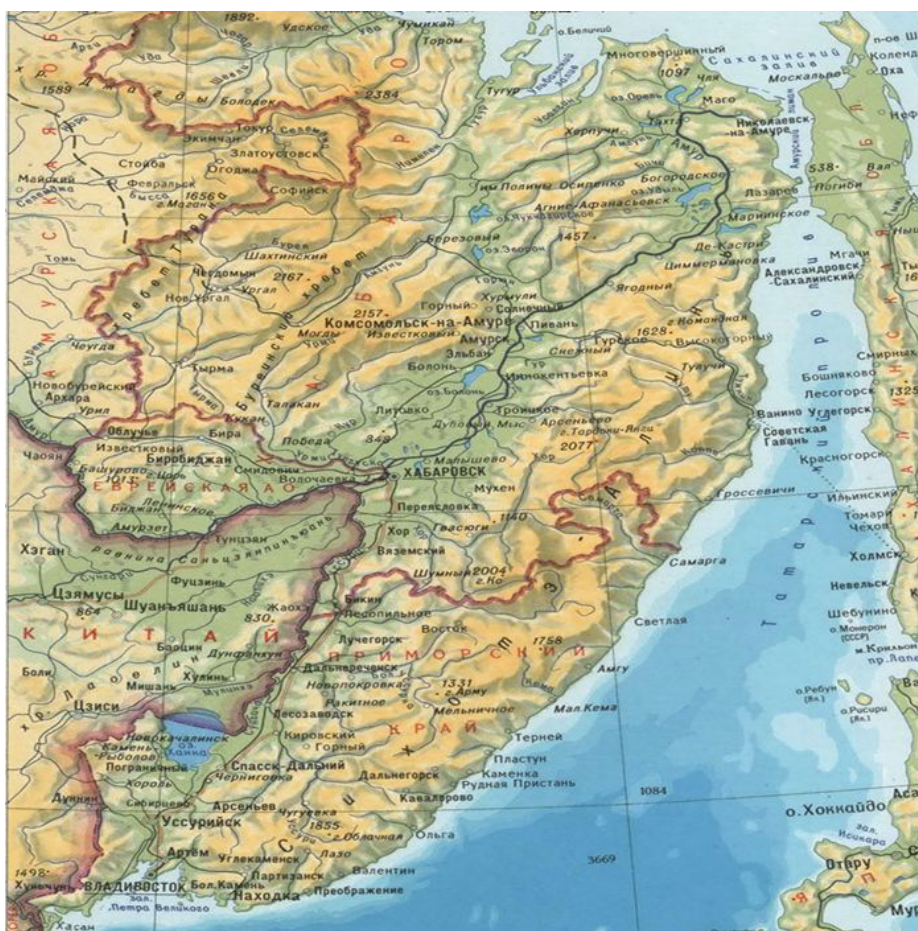


Рис. 1. Крупномасштабная карта Дальневосточного региона от Приморского края до западной части острова Сахалин (Атлас мира..., 2023)

Fig. 1. Large-scale map of the Far Eastern region, from Primorsky Krai to the western part of Sakhalin Island (World Atlas..., 2023)

Как можно заметить на рис. 1, региональные приморские крупные морфоструктуры – Сихотэ-Алинь (материк) и Западно-Сахалинские горы – вытягиваются вдоль побережий северо-западной части Японского моря. Биономическое районирование опирается на каркас ландшафтных структур, в частности береговых, которые создают экологические условия морских экосистем береговой зоны и шельфа.

Методы

Биономическое районирование северо-западной части Японского моря проводилось с использованием: космического цифрового изображения Японского моря SASPlanet-GoogleEarth Pro (v.19121.10095), его обработки в GlobalMapper Pro (v.23.1), Photoshop (v.2022) и при геопространствен-

ном проектировании районов в программном пакете ArcGISPro. Отображались биономические области и районы, пронумерованные с юга на север, каждый из которых характеризует пространственную динамику биоценозов с похожими или различающимися типами морского ландшафта и экологическими условиями окружающей среды.

Вымерен батиметрический профиль шельфа районов. Результаты отображены в программе Surfer (v.20.1.195).

Результаты

Ландшафтно-биономическое районирование

В качестве каркаса ландшафтно-биономического районирования северо-западной части Японского моря предлагается использовать карту тектогенных берегов (рис. 2).

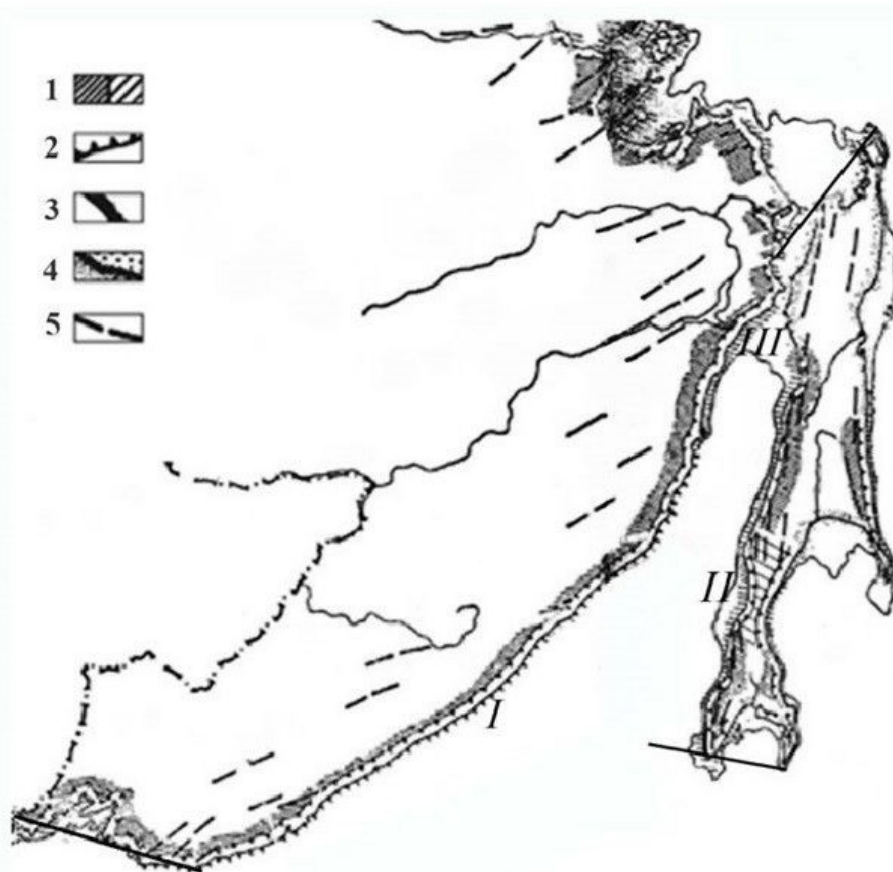


Рис. 2. Карта тектогенных берегов Японского моря (Гурьева и др., 1974): I – Сихотэ-Алинь, II – Западно-Сахалинские горы, III – северная часть Татарского пролива; 1 – участки поднятия земной коры (а – интенсивного, б – замедленного); 2 – абразионные берега (а – с активным клифом, б – с мертвым клифом); 3 – подводно-береговой склон абразионного типа; 4 – участки опускания земной коры (а – аккумулятивный берег с широким песчаным пляжем, б – подводно-береговой склон аккумулятивного типа); 5 – оси крупных тектонических структур, испытывающих поднятие

Fig. 2. Map of tectogenic coasts of the Sea of Japan (Gurieva et al, 1974): I – Sikhote-Alin, II – West-Sakhalin mountains, III – the northern part of the Tatar Strait; 1 – areas of crustal uplift (a – intensive, б – delayed); 2 – abrasive coasts (a – with an active cliff, б – with a dead cliff); 3 – underwater coastal slope of abrasive type; 4 – areas of lowering of earth crust (a – accumulative coasts with wide sand beach, б – undersea coastal slope accumulative type); 5 – axis of large tectonic structures, experiencing uplift

Развитие морфоструктур (поднятие или опускание) определяет важнейшие биономические типы береговой зоны моря: приглубость или отмелость берегов, процессы абразии или аккумуляции, формы рельефа абразионные или аккумулятивные, грунты скальные или рыхлые. На карте видно, что там, где оси складок располагаются параллельно берегу, формируются продольные приглубые абразионные берега с активным клифом. Там, где оси складок располагаются перпендикулярно берегу, формируются поперечные берега с широким подводным береговым склоном, мысами и островами (Petrov, 2022). Северная часть Татарского пролива, испытывающая тектоническое опускание, характеризуется берегами и подводным склоном аккумулятивного типа. Отмеченные морфоструктурные особенности служат основой районирования береговой зоны северо-западной части Японского моря (рис. 3).

Сихотэ-Алиньская область омывается холодным Приморским течением. Зимой море замерзает. В литорали господствуют фукусковые водоросли (*Fucus evanescens*, *Pelvetia wrightii*), указывающие на принадлежность к холоднореальной зоне. В области выделяются два района – Южно-приморский и Центрально-приморский.

В Южно-приморском районе хребты простираются по нормали к берегу (берега поперечного типа). Здесь формируются разделенные мысами глубоко врезаемые в сушу мелководные заливы: Амурский, Уссурийский, Петра Великого и многочисленные острова, шельф широкий (рис. 4, 5).

Каждый залив представляет особый ландшафт с характерным набором подводных угодий (рис. 6).

В заливе Петра Великого угодье каменистых грунтов представлено поясом скал, обрастающих крупной бурой водорослью – ламинарией и беспозвоночными: мидиями, губками, серпулидами и др. По дну ползают морские звезды, ежи и др. (см. рис. 6). Пояс скал окаймлен угодьем песчаных грунтов. Для него характерны заросли морской травы – зостеры. В песок закапываются черви – пескожилы (*Arenicola marina*). На дне лежат двустворчатые моллюски – гребешки, ползают трепанги и морские ежи (см. рис. 6).

Центрально-приморский район характеризуется продольными берегами, где оси складок направлены параллельно к берегу. Берега денудационно-абразионные, слабо-

изрезанные, высокие, с активным клифом, шельф узкий (рис. 7).

ли (*Saccharina japonica*, *S. cichorioides*; *Sargassum pallidum*, *S. miyabei*, *Costaria costata*, *Agarum clathratum*) и красные водоросли (*Ptilota filicina*, *Tichocarpus crinitus*, членистые кустики известковой водоросли *Bossiella cretacea*), а также беспозвоночные, обрастатели и бродячие формы (рис. 8).

Верхнюю сублитораль занимает пояс ламинарии (*Saccharina japonica*). Глубже распространены бурые водоросли (*Saccharina japonica*, *S. cichorioides*; *Sargassum pallidum*, *S. miyabei*, *Costaria costata*, *Agarum clathratum*) и красные водоросли (*Ptilota filicina*, *Tichocarpus crinitus*, членистые кустики известковой водоросли *Bossiella cretacea*), а также беспозвоночные, обрастатели и бродячие формы (рис. 8).

Островная Сахалинская область. Основную территорию области занимают Западно-Сахалинские горы, которые подразделяются на три района: 2.1. Северный, 2.2. Перешеек Поясок и 2.3. Южный.

Северный район соответствует одноименному антиклинорию. Берега высокие продольные с преимущественно активным клифом, подводно-береговой склон приглубый глубиной до 40 м; пояс скал представляет биотоп каменистых грунтов. Береговая зона омывается холодным Приморским течением. Зимой море замерзает. В литорали господствуют фукусковые водоросли (*Fucus evanescens*, *Pelvetia wrightii*), указывающие на принадлежность района к холоднореальной зоне.

Район Перешеек Поясок, здесь интенсивность поднятия резко снижается. Берега в основном аккумулятивные. Благодаря небольшим складкам, продолжающимся в море (берег поперечного типа), ширина шельфа увеличивается до 60 км (рис. 9).

В верхней части берегового склона простираются песчаные равнины, биотоп червя-пескожила (*Arenicola marina*), а на глубине 30–40 м – реликтовые поля гальки, биотоп голотурии (*Cucumaria japonica*).

Южный район соответствует одноименному антиклинорию. Берега высокие продольные, окаймленные низкой аккумулятивной террасой, клиф отмерший, подводно-береговой склон приглубый глубиной до 40 м, шельф узкий. Береговая зона омывается теплым Цусимским течением. Вертикальное подразделение береговой зоны района Южного Сахалина представлено на рис. 10.

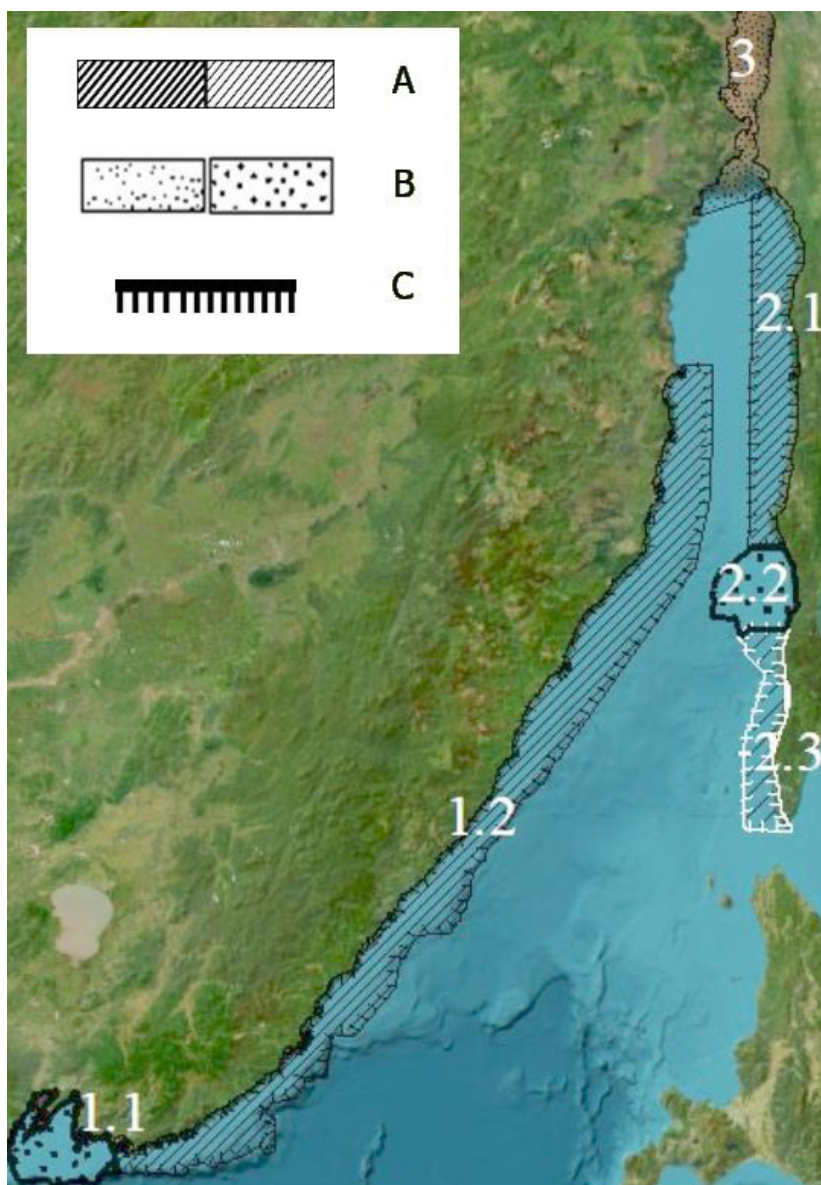


Рис. 3. Ландшафтно-биономическое районирование береговой зоны северо-западной части Японского моря. Физическая цифровая модель карты. Масштаб 1:12500000. Обработано в ArcGISPro (составлено автором): I. Сихотэ-Алинская область, районы: 1.1. Южно-приморский, 1.2. Центральнo-приморский; II. Островная Сахалинская область, районы: 2.1. Северный, 2.2. Перешеек Поясок, 2.3. Южный; III. Область северной части Татарского пролива; А – участки поднятия земной коры (а – интенсивного, б – замедленного); В – участки опускания земной коры (а – аккумулятивные берега с широким песчаным пляжем, б – подводно-береговой склон аккумулятивного типа); С – абразионные участки (а – с активным клифом (черный цвет), б – с мертвым клифом (белый цвет))

Fig. 3. Landscape-bionomic zoning of the coastal zone and shelf of the northwestern part of the Sea of Japan. The physical digital model of the map. Scale 1:12500000. Processed in ArcGISPro (compiled by the author): 1. Sikhote-Alin region, districts: 1.1. Yuzhno-Primorsky and 1.2. Tcentralno-Primorsky; II. Sakhalin Island region, districts: 2.1. North, 2.2. Istmus Belt, 2.3. South; III. The area of the northern part of the Tatar Strait; B – areas of crustal subsidence (a – accumulative shores with a wide sandy beach, b – underwater coastal slope of accumulative type); C – abrasive areas (a – with an active cliff (black), b – with a dead cliff (white))

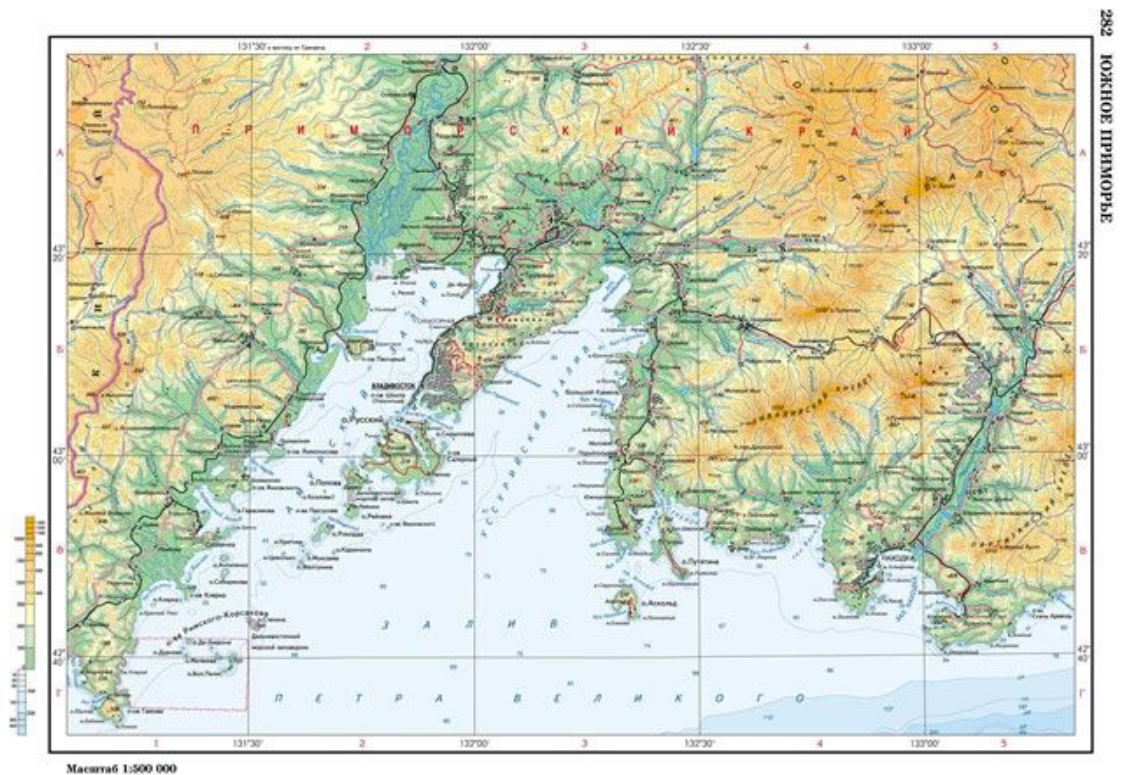


Рис. 4. Южно-приморский район Сихотэ-Алиньской области (География..., 2022)
Fig. 4. South-Primorsky area of Sikhote-Alin realm (Geography..., 2022)

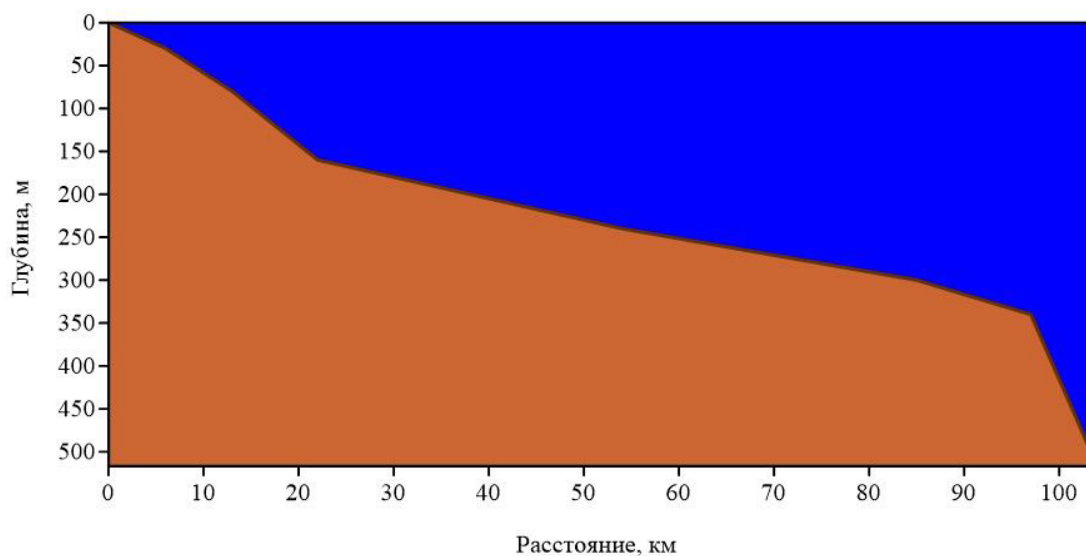


Рис. 5. Батиметрический профиль залива Петра Великого в Южно-приморском районе (по данным морской навигационной карты)
Fig. 5. Bathymetric profile of Peter the Great Bay in the South-Primorsky area (according to marine navigation map)

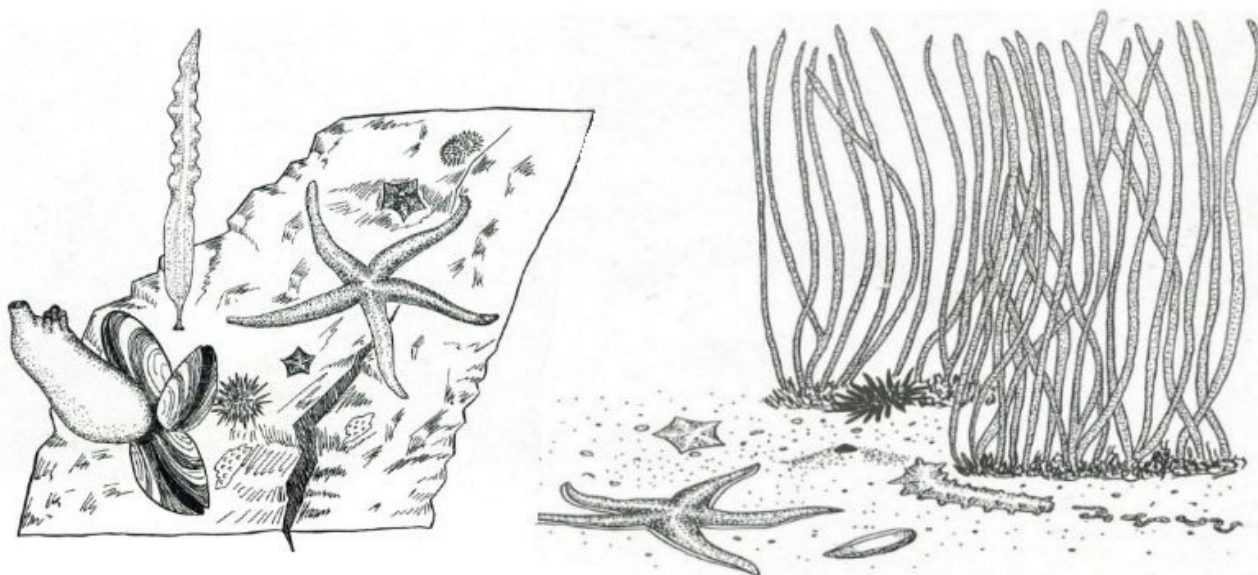


Рис. 6. Подводные угодья каменистых грунтов и песчаных грунтов залива Петра Великого (Арзамасцев, Преображенский, 1990)

Fig. 6. Undersea areas of rocky soils and of sandy soils of Peter the Great Bay (Arzamascev, Preobrazhensky, 1990)

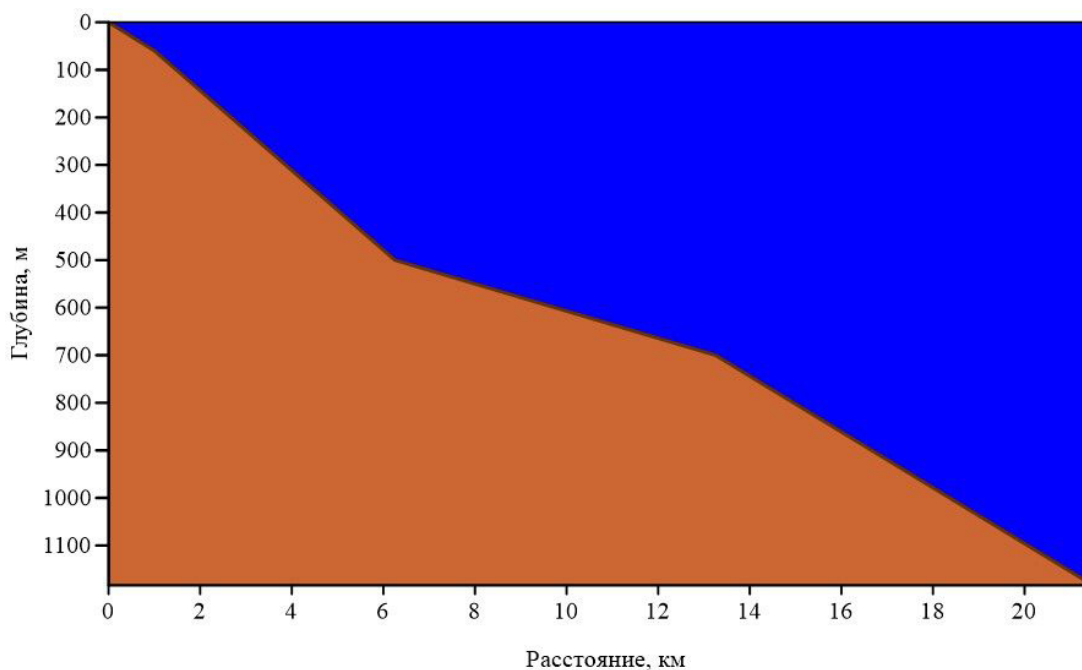


Рис. 7. Батиметрический профиль шельфа в Центрально-приморском районе (по данным морской навигационной карты)

Fig. 7. Bathymetric profile of the shelf in Central-Primorsky area (according to marine navigation map)



Рис. 8. Группировка каменистых грунтов: бродячие формы и обрастатели: а) 1 – водоросль ундария перистая (*Undaria pinnatifida*), 2 – черный морской еж (*Mesocentrotus nudus*), 3 – гребешковая патирия (*Patiria pectinifera*), 4 – серый морской еж (*Strongylocentrotus intermedius*), 5 – мидия Грея (*Crenomytilus grayanus*), 6 – губка (*Metridium senile fimbriatum*), 7 – амурская морская звезда (*Asterias amurensis*); б) 1 – рыбы-маслюки, 2 – асцидия бугорчатая «морской ананас» (*Halocynthia roretzi*), 3 – асцидия пурпурная (*Halocynthia aurantium*), 4 – тихоокеанская устрица (*Rassostrea gigas*), 5 – песчаный краб-плавунец (*Liocarcinus holsatus*), 6 – морская звезда (*Ligia cinerascens*), 7 – дальневосточный трепанг (*Apostichopus japonicus*), 8 – панцирный моллюск (Mollusca); Центрально-приморский район (Хлудова, 1963)

Fig. 8. Grouping of rocky soils: free-ranging forms and foulers: а) 1 – pinnate undaria algae (*Undaria pinnatifida*), 2 – black marine echinus (*Mesocentrotus nudus*), 3 – crested patiria (*Patiria pectinifera*), 4 – grey marine echinus (*Strongylocentrotus intermedius*), grey's mussel (*Crenomytilus grayanus*), 6 – sponge (*Metridium senile fimbriatum*), 7 – amur starfish (*Asterias amurensis*); б) 1 – butterflyfish, 2 – bumpy squirt «marine pineapple» (*Halocynthia roretzi*), 3 – purple squirt (*Halocynthia aurantium*), 4 – pacific oyster (*Rassostrea gigas*), 5 – sandy melt crab (*Liocarcinus holsatus*), 6 – starfish (*Ligia cinerascens*), 7 – far eastern marine cucumber (*Apostichopus japonicus*), 8 – testaceans mollusk (Mollusca); Central-Primorsky area (Khludova, 1963)

Остановимся на кратком описании вертикальной структуры береговой зоны первого района Островной Сахалинской области.

Литораль. В прибрежной части на песчано-илистом грунте почти сплошной пояс образует ассоциация *Zostera marina*. Здесь обитают креветки (*Pandalus latirostris*). На каменистом грунте формируется сообщество *Sargassum miyabei*. В средней части осушки волнение усиливается, рельеф мелкогрядовой. Внешняя мористая часть осушки подвержена воздействию прибоя и характеризуется грядовым рельефом. Здесь характерна ассоциация морской травы *Phyllospadix iwatensis*. К вершинам пограничных гряд, отделяющих каменистую осушку от крутого абразионного склона, приурочены сообще-

ства красной известковой кустистой водоросли *Corallina pilulifera*, плотные заросли которой именуются «кораллиновыми тротуарами». Сообщество *Sargassum miyabei* и «кораллиновые тротуары» свидетельствуют о принадлежности Южно-Сахалинского района к теплобореальной зоне.

Верхний этаж сублиторали в интервале глубин 0–5 м занят плотными зарослями ламинарии (*Sacharina japonica*). Просветы заняты красными водорослями (*Ceramium kondoi*, *Ptilota filicina*, *Tichocarpus crinitus* и др.).

Средний этаж сублиторали в интервале глубин от 5 до 15 м, занят сообществами известковых водорослей *Bossia cretacea*, *Crustida*. Характерно присут-

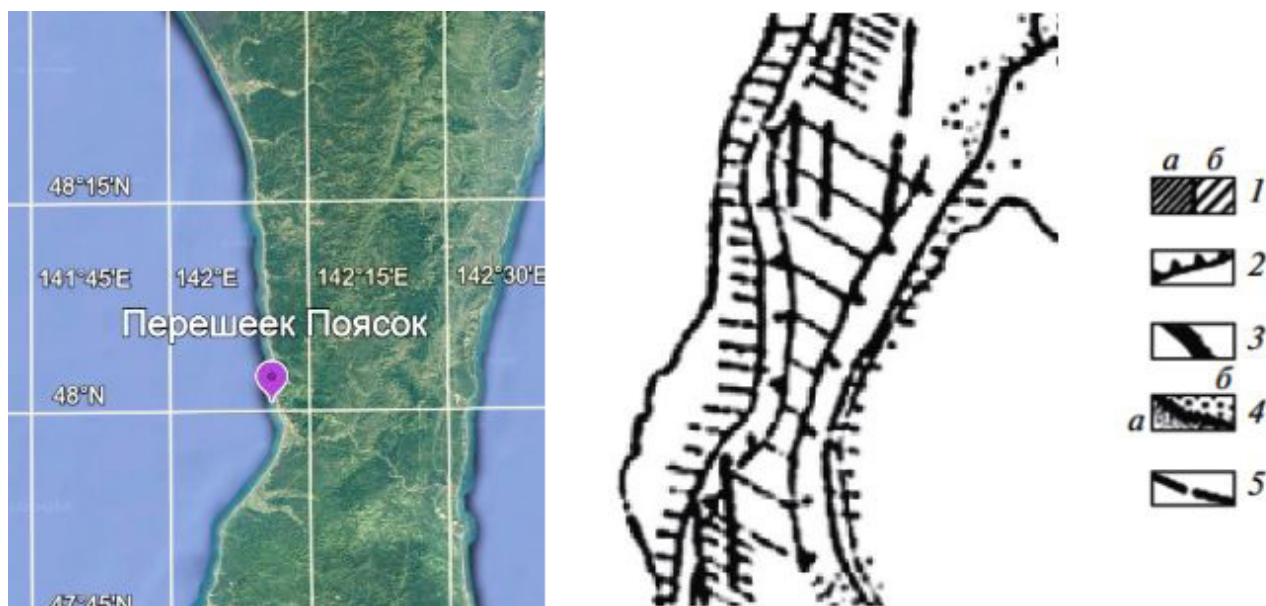


Рис. 9. Карта района Перешеек Поясок Островной Сахалинской области (Goggle Earth, 2023): 1. Участки поднятия земной коры (а – интенсивного, б – замедленного); 2. Абразивные берега; 3. Подводные ландшафты абразивного типа; 4. Участки опускания земной коры (а – аккумулятивные берега с широкими песчаными пляжами, б – подводные ландшафты аккумулятивного типа); 5. Оси тектонических структур, испытывающих поднятие (Петров, 2020)

Fig. 9. Map of the Isthmus Belt area of the Sakhalin Island Region (Goggle Earth, 2023): 1. Areas of crustal uplift (a – intensive, б – delayed); 2. Abrasive shores; 3. Underwater landscapes of abrasive type; 4. Areas of crustal subsidence (a – accumulative shores with wide sandy beaches, б – underwater landscapes of accumulative type); 5. Axes of tectonic structures experiencing uplift (Petrov, 2020)

ствии крупных бурых водорослей *Agarum cribrosum* и *Dichloria viridis*, встречающихся на расстоянии нескольких метров друг от друга. Единично встречаются багрянки *Odonthalia corymbifera* и *Tichocarpus crinitus*.

Нижний этаж сублиторали занимает глубины от 15 до 40 м. Господствующую роль в образовании донных биоценозов здесь играют беспозвоночные животные: гидроиды, губки, мшанки, серпулиды, баянусы, актинии, асцидии, мидии и др.

Область северной части Татарского пролива. Пролив имеет воронкообразную форму, узкой стороной обращен к проливу Невельского, который имеет выход в Сахалинский залив Охотского моря. Дно пролива мелководное желобообразное (рис. 11).

Устье р. Амур заканчивается обширным лиманом, ограниченным пересыпью. Берега Сахалина, окаймляющие север Татарского пролива, аккумулятивные. Дно пролива представляет аккумулятивную равнину, на песчано-илистом грунте морские травы (*Zostera asiatica*, *Z. marina*) образуют обширные заросли, представляющие иногда промысловую ценность (Дуленин, 2020).

Заключение

Ландшафтно-биономическое райониро-

вание экорегионов необходимо проводить с учетом действия трех систем единиц: морфоструктурного строения, географической и вертикальной зональности. Каркасом районирования служит морфоструктурное строение береговой зоны и шельфа. В северо-западной части Японского моря выделяются три области и шесть районов:

I. Сихотэ-Алиньская область, в литорали господствуют фукусовые водоросли (*Fucus evanescens*, *Pelvetia wrightii*), указывающие на принадлежность к холоднореальной зоне: 1.1. Южно-приморский район: берега поперечного типа характеризуются сложной ландшафтной структурой, представленной мелководными заливами, разделенными мысами и островами; 1.2. Центральнo-приморский район: берега продольные высокие с активным клифом, подводный склон приглубый (биотоп каменистых грунтов), занятый сообществами бурых и красных водорослей, группировками беспозвоночных обрастателей и бродячих форм.

II. Островная Сахалинская область: 2.1. Южный район: берег продольного типа, высокий с отмершим клифом, поднобереговой склон приглубый омывается теплым Цусимским течением, сообщество *Sargassum miyabei* и «кораллиновые троту-

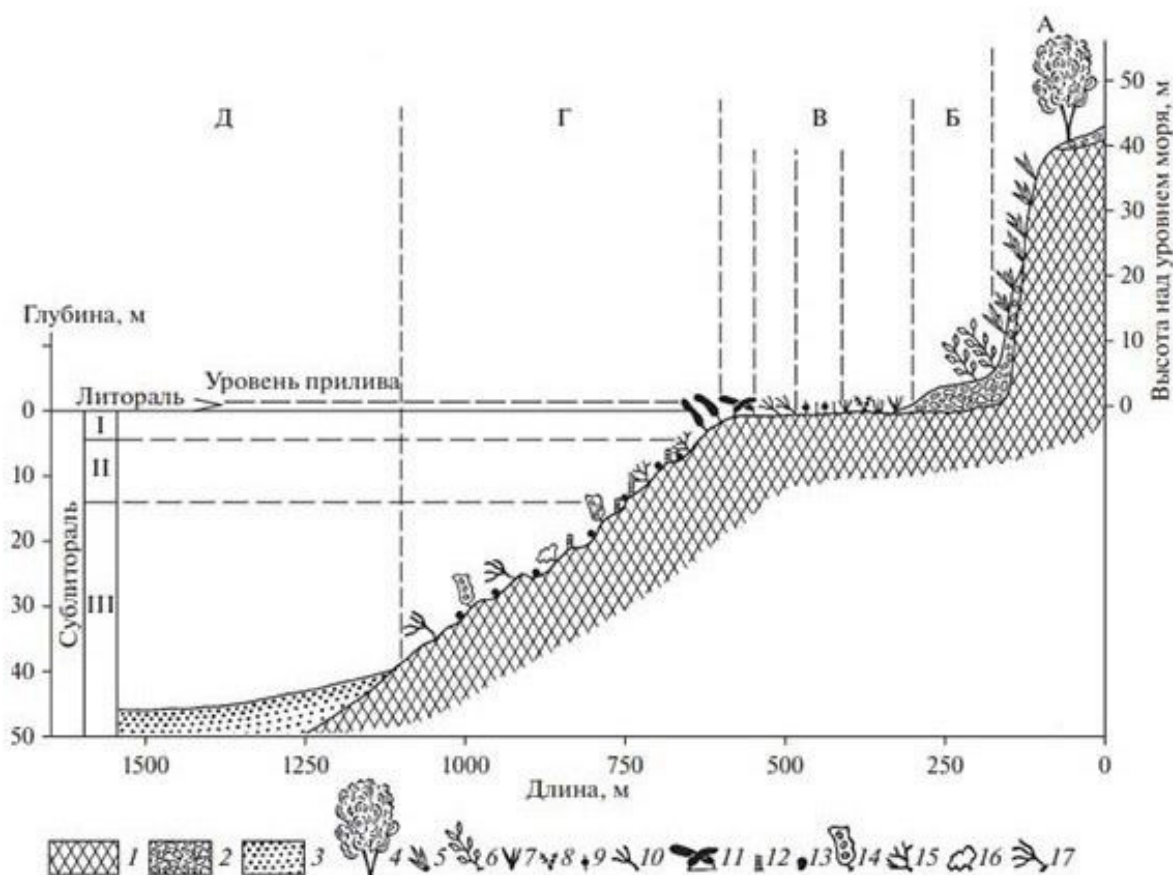


Рис. 10. Вертикальная структура подводно-берегового склона Южного Сахалина (Петров, Поздеев, 1992). Элементы рельефа: отмерший клиф (А), аккумулятивная терраса (Б), литораль (каменистая осушка) (В), sublittoral: пояс скал (Г), песчаная отсыпь (Д). Подразделения sublittorали: верхний этаж (I), средний этаж (II), нижний этаж (III). Грунты и характерные виды: пояс скал, каменистый грунт (1), щебень (2), песчаная отсыпь (3); характерные виды: каменная береза (4) (*Betula ermanii*), курильский бамбук (5) (*Sasa kurilensis*), сахалинская гречиха (6) (*Polygonum sachalinense*); на литорали и каменистом склоне характерные виды последовательно сменяют друг друга в сторону моря от *Zostera marina* (7), *Sargassum miyabei* (8), *Sphaerotrichia divaricata* (9), *Phyllospadix iwatensis* (10) к *Laminaria japonica* (11) на каменистых грядах; на первом этаже sublittorали доминирует ламинария, во втором характерны: *Agarum cribrosum* (14), *Tichocarpus crinitus* (15), *Bossiella cretacea* (12), корковые известковые красные водоросли (13), в третьем – *Dichloria viridis* (17), *Turnerella mertensiana* (16)

Fig. 10. Vertical structure of the underwater coastal slope of South area of Sakhalin Island realm (Petrov, Pozdееv, 1992). Relief elements: dead cliff (A), accumulative terrace (Б), littoral (rocky drainage) (В), sublittoral: rock belt (Г), sand hillside waste (Д). Sublittoral subunits: upper floor (I), average floor (II), low floor (III). Soils and characteristic species: rock belt, rocky ground (1), break stones (2), sand water drawing (3); characteristic species: stone birch (4) (*Betula ermanii*), kuril bamboo (5) (*Sasa kurilensis*), sakhalin beech-wheat (6) (*Polygonum sachalinense*); on the littoral and the rocky slope, the characteristic species successively replace each other towards the sea from *Zostera marina* (7), *Sargassum miyabei* (8), *Sphaerotrichia divaricata* (9), *Phyllospadix iwatensis* (10) к *Laminaria japonica* (11) on rocky ridges; kelp dominates on the ground floor of the sublittoral, and the second floor is characterized by: *Agarum cribrosum* (14), *Tichocarpus crinitus* (15), *Bossiella cretacea* (12), crustaceous calcareous red algae (13), at the third – *Dichloria viridis* (17), *Turnerella mertensiana* (16)

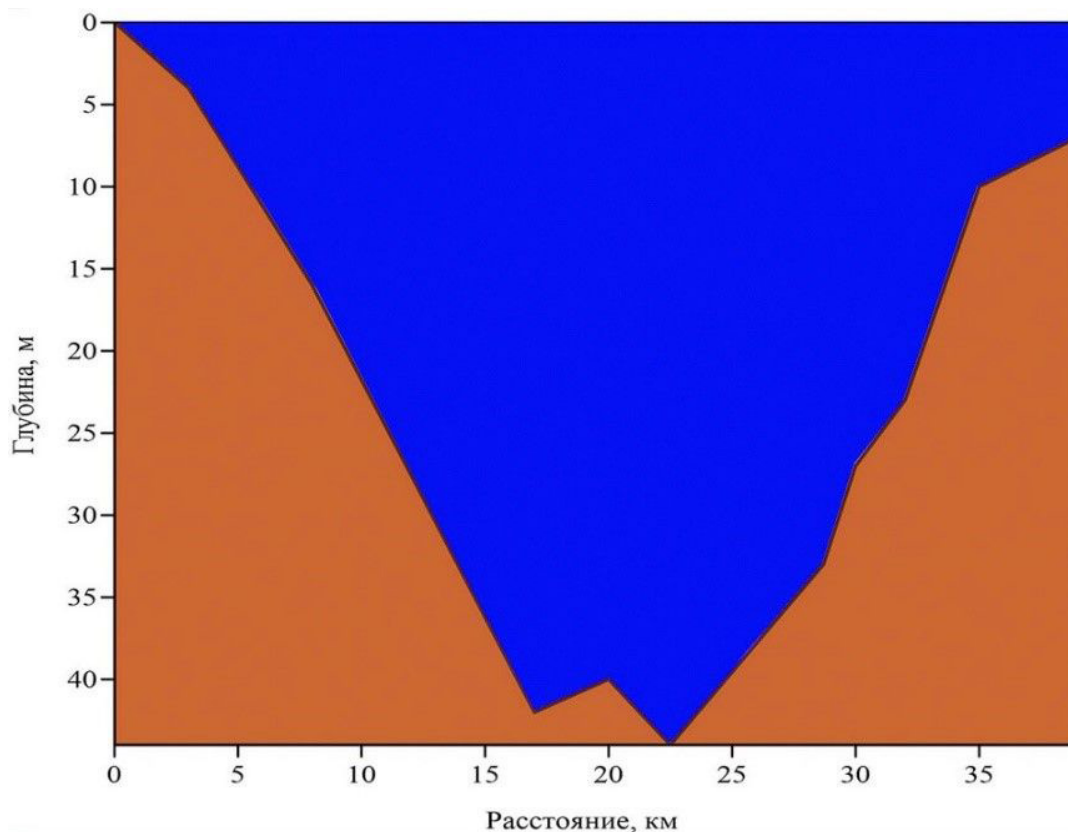


Рис. 11. Батиметрический профиль дна северной части Татарского пролива (по данным морской навигационной карты)

Fig. 11. Bathymetric profile of the bottom of the northern part of the Tatar Strait (according to marine navigation map)

ары» указывают на принадлежность района к теплобореальной зоне, на примере подводного склона Южного района раскрывается типичная для Японского моря вертикальная структура подводных ландшафтов, выделяются: литораль, верхний, средний и нижний этажи sublиторали; 2.2. Район Перешеек Поясок: морфоструктура замедленных поднятий, складки поперечного типа, не выраженные в рельефе, но определяющие расширение шельфа до 60 км; 2.3. Северный район: берег продольного типа, высокий с актив-

ным клифом, приглубый, омывается холодным Приморским течением, в литорали господствуют фукусовые водоросли (*Fucus evanescens*, *Pelvetia wrightii*), указывающие на принадлежность района к холоднореальной зоне.

III. Область северной части Татарского пролива: берега аккумулятивные, песчано-илистая равнина на месте прогиба, испытывающего опускание, биотоп морских трав. Зимой море замерзает. Область относится к холоднореальной зоне.

Библиография

- Арзамасцев И. С., Преображенский Б. В. Атлас подводных ландшафтов Японского моря. М.: Наука, 1990. 224 с.
- Атлас мира. Карта физическая. Дальний Восток. URL: <https://map-rus.com/map-vostok.html> (дата обращения: 20.11.2023).
- География. Карта Южное Приморье. URL: <https://geographyofrussia.com/karta-yuzhnoe-primore/> (дата обращения: 10.08.2022).
- Гурьева З. И., Кильдюшевский Е. И., Петров К. М., Шарков В. В. Оценка природных условий морей СССР с целью определения перспектив развития морских геологических исследований на основе аэрофотометодов // Картирование шельфов. Л.: Геогр. о-во СССР, 1974. 137 с.
- Дуленин А. А. Оптимальные условия выделения доминантов подводной растительности на примере северо-западной части Татарского пролива // Известия ТИНРО. 2020. Т. 200, вып. 3. С. 767–788. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-767-78.
- Петров К. М., Поздеев В. Б. Подводные ландшафты и фитобентос у берегов Южного Сахалина. Вла-

дивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1992. 128 с.

Петров К. М. Принципы биономического районирования береговой зоны и шельфа Мирового океана // Океанология. 2020. Т. 60, № 3. С. 381–392. DOI: 10.31857/S0030157420030089.

Хлудова О. Ф. За голубым порогом. М.: Географгиз, 1963. 142 с.

ArcMap. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/map/main/mapping-and-visualization-in-arcgis-for-desktop.htm> (дата обращения: 25.11.2023).

Petrov K. M. Detailed Zoning Of The Coastal And Shelf Areas Of Marine Coregions: A Case Study Of The Black Sea // SCIREA Journal of Environment. 2022. Vol. 6, Iss. 3. P. 20–33. DOI: 10.54647/evnironmental61295.

Google Earth. URL: <https://earth.google.com/web/@0,-2.49959985,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,Or/data=OgMKATA> (дата обращения: 25.10.2023).

Spalding M. D., Allen G., Fox H., Davidson N. C. Marine ecoregions of the World: a bioregionalization of coast and shelf areas // J. BioSci. 2007. No. 57 (2). P. 573–583.

Благодарности

Автор глубоко признателен почетному профессору Санкт-Петербургского государственного университета д. г. н. К. М. Петрову за наставничество и помощь в подготовке статьи, а также рецензентам за ценные замечания.

PRINCIPLES OF LANDSCAPE-BIONOMIC ZONING OF THE COASTAL ZONE AND SHELF ON THE EXAMPLE OF THE NORTHWESTERN PART OF THE SEA OF JAPAN

RAKITIN
Tikhon Dmitrievich

Saint-Petersburg State University, Russia, Saint-Petersburg, University Embankment, 7-9, 199034, gatwar47@mail.ru

Keywords:

landscape-bionomic zoning
morphostructures
coastal zone
the Sea of Japan
sea bottom biocenoses

Summary:

The well-known system of units of ecological (bionomic) zoning of the coastal zone and shelf reflects the global features of the ocean nature, where marine ecoregions serve as initial zoning units. Each ecoregion is a regional marine basin (sea) with its composed peculiar natural-climatic conditions and factors: solar radiation, coastal relief (shores and bottom relief), heat exchange of sea surface with atmosphere and advection of water mass, carried by currents and waves. Issues of theory and practice are required to develop units of detailed zoning of marine ecoregions. In practice, principles of landscape-bionomic zoning are based on the use of the units of its three systems: morphostructural composition of coasts, geographical zonality and vertical zonation. The framework of zoning is coastal morphostructures, which are located along the coasts of the marine basin. These determine the delineation of morphostructural areas and regions, which differ in the sign of inherited recent and modern tectonic movements. In turn, internal geodynamics forms coasts of longitudinal and transversal types and soil surfaces (hard, loose). The vertical divisions in the coastal zone are the littoral and sublittoral, which are divided into floors and steps reflecting the biological diversity of bottom biocenoses. The latitudinal geographical zones of the sea surface divide it into boundaries by an isotherm of 5 °C. The proposed system of zoning units allows to display the detailed peculiarities of bionomic conditions and the associated biological diversity, which varies by species within the coastal zone from southwest to northwest of the investigated sea. The paper is devoted to the principles of landscape and bionomic zoning of the coastal area and shelf on the example of the northwestern part of the Sea of Japan.

Received on: 20 June 2024

Published on: 27 June 2024

References

- ArcMap. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/map/main/mapping-and-visualization-in-arcgis-for-desktop.htm> (data obrascheniya: 25.11.2023).
- Arzamascev I. S. Preobrazhenskiy B. V. Atlas of underwater landscapes of the Sea of Japan. M.: Nauka, 1990. 224 p.
- Atlas of the World. Physical map. The Far East. URL: <https://map-rus.com/map-vostok.html> (data obrascheniya: 20.11.2023).
- Dulenin A. A. Optimal conditions for the allocation of dominant underwater vegetation on the example of the northwestern part of the Tatar Strait, Izvestiya TINRO. 2020. T. 200, vyp. 3. P. 767–788. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-767-78.
- Google Earth. URL: <https://earth.google.com/web/@0,-2.49959985,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,Or/data=OgMKATA> (data obrascheniya: 25.10.2023).
- Gur'eva Z. I. Kil'dyushevskiy E. I. Petrov K. M. Sharkov V. V. Assessment of the natural conditions of the seas of the USSR in order to determine the prospects for the development of marine geological research based on aerial photo methods, Kartirovanie shel'fov. L.: Geogr. o-vo SSSR, 1974. 137 p.
- Hludova O. F. Beyond the blue threshold. M.: Geografiz, 1963. 142 p.
- Petrov K. M. Pozdeev V. B. Underwater landscapes and phytobenthos off the coast of Southern Sakhalin. Vladivostok: Izd-vo Dal'nevost. un-ta, 1992. 128 p.
- Petrov K. M. Detailed Zoning Of The Coastal And Shelf Areas Of Marine Coregions: A Case Study Of The Black Sea, SCIREA Journal of Environment. 2022. Vol. 6, Iss. 3. P. 20–33. DOI: 10.54647/evnironmental61295.
- Petrov K. M. Principles of bionomic zoning of the coastal zone and the shelf of the World Ocean, Okean-

ologiya. 2020. T. 60, No. 3. P. 381–392. DOI: 10.31857/S0030157420030089.

Spalding M. D., Allen G., Fox H., Davidson N. C. Marine ecoregions of the World: a bioregionalization of coast and shelf areas, J. BioSci. 2007. No. 57 (2). P. 573–583.

The map of Southern Primorye. URL: <https://geographyofrussia.com/karta-yuzhnoe-primore/> (data obrascheniya: 10.08.2022).



УДК 598.132.4:591.111.1

СРЕДНЕАЗИАТСКАЯ ЧЕРЕПАХА *TESTUDO HORSFIELDII* GRAY, 1844 (REPTILIA: TESTUDINIDAE): АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ КРОВИ

РОМАНОВА
Елена Борисовна

доктор биологических наук, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603950, Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, romanova@ibbm.unn.ru

СТОЛЯРОВА
Ирина Александровна

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603950, Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, irinaisto75@gmail.com

БАКИЕВ
Андрей Геннадьевич

кандидат биологических наук, Самарский федеральный исследовательский центр РАН, 445003, Тольятти, ул. Комзина, 10, herpetology@list.ru

ГОРЕЛОВ
Роман Андреевич

кандидат биологических наук, Самарский федеральный исследовательский центр РАН, 445003, Тольятти, ул. Комзина, 10, gorelov.roman@mail.ru

Ключевые слова:
пресмыкающиеся аридной зоны
лейкоцитарные индексы
периферическая кровь
лейкоцитарная формула крови
Казахстан

Аннотация: Использован гематологический подход для характеристики природной популяции среднеазиатской черепахи *Testudo horsfieldii* из Мангистауской области Республики Казахстан. Проведена оценка лейкоцитарной формулы крови с расчетом связанных с ней лейкоцитарных индексов (лимфоцитарно-гранулоцитарного, сдвига лейкоцитов, отношения лимфоцитов и эозинофилов, отношения гетерофилов и эозинофилов, отношения гетерофилов и лимфоцитов). Методом многомерного дисперсионного анализа выявлены значимые различия по совокупности лейкоцитарных показателей самцов (12 особей) и самок (22 особи). Межполовые различия проявлялись повышенным содержанием лимфоцитов и значением лимфоцитарно-гранулоцитарного индекса, пониженным соотношением гетерофилов и лимфоцитов у самок. Повышенное значение индекса соотношения гетерофилов и лимфоцитов у самцов свидетельствует о стрессовом воздействии на них. У самок выявлены умеренная положительная корреляционная связь длины карапакса с содержанием в их крови гранулоцитов и эозинофилов, отрицательная связь – с суммарным содержанием агранулоцитов за счет вклада лимфоцитов. У самок, в отличие от самцов, преобладали лимфоцитарно-зависимые иммунные реакции. Методом главных компонент проведена дифференциация самцов и самок с более полным количественным описанием лейкоцитарного состава. Картина крови и динамика ее лейкоцитарных индексов отражали активный отклик организма на специфический комплекс экологических факторов среды обитания *T. horsfieldii* в аридной зоне.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: В. Л. Вершинин

Рецензент: В. А. Черлин

Получена: 04 июня 2024 года

Подписана к печати: 13 июня 2024 года

Введение

Для рептилий, населяющих аридную зону с ее «жесткими» климатическими условиями, важную роль играет мобилизация адаптационных резервов, определяемая в первую очередь ключевой иммуногематологической гомеостатической системой организма. К типичным рептилиям аридной зоны Азии относится среднеазиатская черепаха *Testudo horsfieldii* Gray, 1844 – представитель семейства Сухопутные черепахи Testudinidae. Латинское название вида дано по: The Reptile Database (2024). Некоторые отечественные герпетологи обозначают вид научным названием *Agrionemys horsfieldii* (Gray, 1844). Он распространен в Казахстане, Туркменистане, Узбекистане, Таджикистане, Киргизии, Иране, Афганистане, Китае, Пакистане. Границы имеющего разрывы видового глобального естественного ареала обозначены на карте в статье Д. А. Бондаренко (2021, с. 39).

Опубликованные данные о лейкоцитарном составе крови данного вида получены при изучении особей, длительное время содержавшихся в условиях неволи (Knotkova et al., 2002; Романова и др., 2023), никакие половые различия черепах при этом в публикациях не отмечены. С учетом вышеизложенного цель работы заключалась в сравнении лейкоцитарных характеристик самцов и самок среднеазиатской черепахи из природной популяции.

Материалы

Среднеазиатских черепах (22 самки и 12 самцов) отловили 5–6 мая 2023 г. на северо-западной границе ареала, полуострове Мангышлак, в западных окрестностях с. Кызылозен Тупкараганского района Мангистауской области Республики Казахстан. Половую принадлежность определяли по внешним морфологическим признакам. Длину карапакса (*L. car.*) измеряли по его средней линии, от переднего края загривного щитка до наиболее выдающейся назад точки надхвостового щитка, с помощью штангенциркуля.

Методы

Кровь у черепах отбирали в день поимки или следующий за ним день. От каждой черепахи готовили по два мазка крови, взя-

той из хвостовой вены. Мазки высушивали на воздухе и фиксировали в спирте. Окраску зафиксированных мазков проводили красителем Гимза азури-эозин по Романовскому (10–12-кратный раствор, фирма «Биолот») в течение 20 минут. Полученные окрашенные препараты крови черепах просматривали на микроскопе Meiji Techno (Japan, серия MT 4000) с иммерсией, при общем увеличении $\times 1500$. Для получения лейкоцитарной формулы крови гранулоциты дифференцировали на гетерофилы (Г), эозинофилы (Э) и базофилы (Б), агранулоциты – на моноциты и лимфоциты (Л).

Гетерофилы среднеазиатской черепахи содержат в цитоплазме большие, эозинофильные, удлинённые и яйцевидные цитоплазматические гранулы. Ядро с плотным хроматином смещено к краю клетки (рис. 1.1). Эозинофилы – крупные клетки сферической формы с периферическим ядром, цитоплазма заполнена овальными гранулами (рис. 1.2). Базофилы представлены округлыми небольшими клетками, гранулы цитоплазмы, окрашивающиеся в темный цвет, плотно окружают ядро клетки (рис. 1.3). Моноциты имеют расположенное на периферии клетки овальное бобовидное ядро и обильную цитоплазму (рис. 1.4). Лимфоциты имеют округлую форму с неровными очертаниями; цитоплазма окрашивается в бледно-голубой цвет и может содержать тонкую азурофильную зернистость (рис. 1.5).

По полученным результатам лейкограммы сделали расчет ряда интегральных лейкоцитарных индексов в относительных единицах: сдвига лейкоцитов ($ИСЛ = \frac{\sum \text{гранулоцитов}}{\sum \text{агранулоцитов}}$); соотношения лимфоцитов и эозинофилов ($ИСЛЭ = \frac{Л}{Э}$); соотношения гетерофилов и эозинофилов ($ИСГЭ = \frac{Г}{Э}$); лимфоцитарно-гранулоцитарный индекс ($ИЛГ = \frac{Л \times 10}{Э + Г + Б}$); индекс соотношения гетерофилов и лимфоцитов ($ИСГЛ = \frac{Г}{Л}$).

Манипуляции с черепахами провели в соответствии с «Международными руководящими принципами для биомедицинских исследований на животных» (International Guiding..., 2012). После взятия крови все черепахи были возвращены в места отлова.

Для сравнения двух групп – самцов и самок – в пакете прикладных программ



Рис. 1. Лейкоцитарные клетки крови *Testudo horsfieldii*: 1 – гетерофил; 2 – эозинофил; 3 – базофил; 4 – моноцит; 5 – лимфоцит

Fig. 1. Leukocyte blood cells of *Testudo horsfieldii*: 1 – heterophils; 2 – eosinophil; 3 – bazophil; 4 – monocyte; 5 – lymphocyte

«STATISTICA v.10», согласно виду распределения данных, использовали методы непараметрической статистики с расчетом критерия Манна – Уитни (u). Различия между полами по совокупности показателей крови оценивали методом многофакторного дисперсионного анализа. Ранговым коэффициентом Спирмена (ρ) изучали взаимосвязь морфометрических и гематологических показателей. Для упорядочивания и уменьшения размерности данных применяли метод главных компонент. За величину статистической значимости принимали $\alpha = 0.05$.

Результаты

В нашей выборке из природы преобладающими клеточными элементами в белой крови *Testudo horsfieldii* являлись аграну-

лоциты, представленные лимфоцитами и моноцитами. Как и в выборках среднеазиатской черепахи из неволи (Knotkova et al., 2002; Романова и др., 2023), в общий состав агранулоцитов основной вклад вносили лимфоциты, а в общий состав гранулоцитов – гетерофилы, по сравнению с последними доли эозинофилов и базофилов были значительно меньше.

Значимые половые различия в природной популяции по совокупности лейкоцитарных показателей выявлены методом многомерного дисперсионного анализа (λ Wilks = 0.733, $p = 0.046$). Самцы и самки значительно различались по содержанию лимфоцитов и по суммарному содержанию агранулоцитов, а также значениям двух лейкоцитарных индексов – ИЛГ и ИСГЛ (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ лейкоцитарного состава периферической крови самцов и самок *Testudo horsfieldii*

Показатели лейкограммы	Самцы ($n = 12$)		Самки ($n = 22$)		Статистические сравнения		Вся выборка, самцы и самки ($n = 34$)	
	Me	IQR	Me	IQR	u	p	Me	IQR
Гетерофилы, %	24.50	9.50	21.00	12.00	1.52	0.12	22.00	11.00
Эозинофилы, %	12.00	8.00	10.00	8.00	0.28	0.77	10.00	8.00
Базофилы, %	7.50	7.50	7.00	8.00	0.40	0.68	7.00	8.00
Моноциты, %	7.50	4.50	6.00	4.00	0.94	0.34	6.00	5.00
Лимфоциты, %	48.00	6.50	52.00	11.00	2.84	0.004	50.00	10.00
Гранулоциты, %	43.50	8.00	41.00	11.00	1.68	0.09	42.00	10.00
Агранулоциты, %	55.16	7.50	59.00	11.00	1.99	0.04	57.00	10.00
ИСЛ, отн. ед.	0.77	0.26	0.69	0.32	1.79	0.07	0.72	0.31
ИСЛЭ, отн. ед.	4.33	4.60	5.00	5.95	0.56	0.56	5.10	5.22
ИСГЭ, отн. ед.	2.38	2.36	2.14	2.26	0.28	0.77	2.27	2.28
ИЛГ, отн. ед.	11.02	3.32	12.50	6.11	2.26	0.02	12.09	4.96
ИСГЛ, отн. ед.	0.48	0.16	0.37	0.25	2.39	0.01	0.42	0.23

Ряд лейкоцитарных показателей крови корреляционно связан с размерами исследованных черепах, как показали значения рангового коэффициента Спирмена и его статистической значимости. У самок, в отличие от самцов, которые представлены выборкой малого объема, выявлена значимая корреляционная связь разной направленности между большинством показателей лейкоцитарного профиля и длиной карапакса. Значимых различий медианных значений длины карапакса в выборках между самца-

ми (176.25 ± 5.47 мм) и самками (182.09 ± 4.78 мм) не выявлено ($u = 1.03, p = 0.29$).

Для выборки в целом (самцы и самки), как и для выборки самок, установлены: статистически значимая положительная связь длины карапакса с содержанием в крови эозинофилов, гранулоцитов в целом и индексом сдвига лейкоцитов (ИСЛ), а также значимая отрицательная связь с содержанием лимфоцитов, суммарным содержанием агранулоцитов и индексами ИСЛЭ, ИСГЭ, ИЛГ (табл. 2).

Таблица 2. Корреляционный анализ связей между лейкоцитарными показателями крови и длиной карапакса *Testudo horsfieldii*

Показатели лейкограммы	Самцы ($n = 12$)		Самки ($n = 22$)		Самцы и самки ($n = 34$)	
	ρ	p	ρ	p	ρ	p
Гетерофилы, %	-0.29	0.16	-0.07	0.63	-0.17	0.15
Эозинофилы, %	0.35	0.09	0.37	0.013	0.33	0.005
Базофилы, %	0.05	0.81	0.08	0.59	0.07	0.52
Моноциты, %	-0.002	0.99	0.06	0.66	0.008	0.94
Лимфоциты, %	-0.29	0.16	-0.38	0.010	-0.28	0.018
Гранулоциты, %	0.24	0.25	0.37	0.012	0.28	0.021
Агранулоциты, %	-0.24	0.24	-0.37	0.012	-0.27	0.026
ИСЛ, отн. ед.	0.25	0.23	0.37	0.012	0.28	0.020
ИСЛЭ, отн. ед.	-0.37	0.07	-0.44	0.002	-0.39	0.001
ИСГЭ, отн. ед.	-0.40	0.051	-0.34	0.021	-0.33	0.005
ИЛГ, отн. ед.	-0.28	0.16	-0.38	0.010	-0.29	0.016

В более наглядном и обобщенном виде описание лейкоцитарного состава крови *T. horsfieldii* выполнено методом главных

компонент, позволяющим визуализировать межполовые различия на графике распределения самцов и самок (рис. 2).

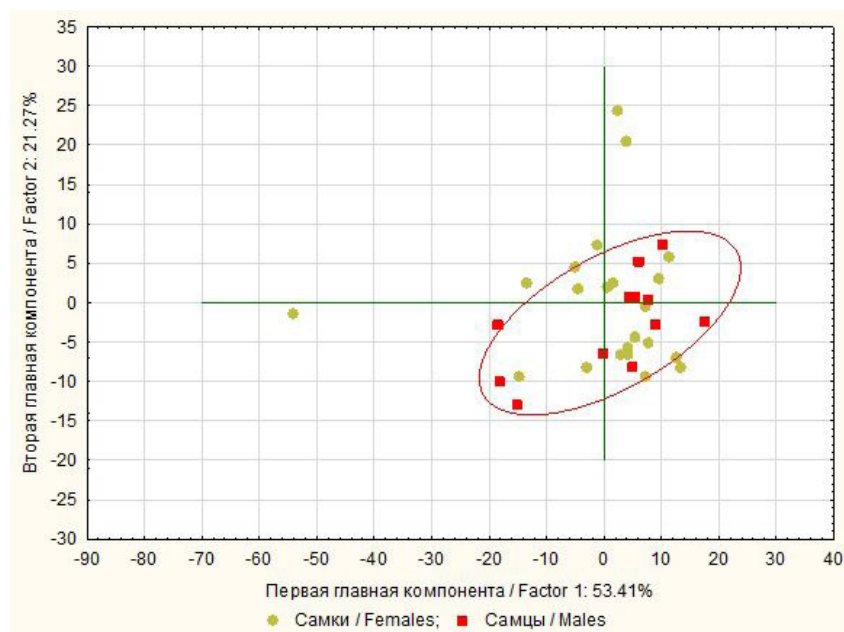


Рис. 2. Ординационная диаграмма, построенная по лейкоцитарному профилю крови самцов и самок *Testudo horsfieldii*

Fig. 2. Ordination diagram based on the leukocyte profile of males and females of *Testudo horsfieldii*

В первую компоненту, соответствующую собственному значению 199.51 и описывающую 53.41 % общей дисперсии, наибольший вклад вносят эозинофилы (сильная положительная корреляция 0.73) и индексы ИСГЭ и ИСЛЭ (сильная отрицательная корреляция -0.93 и -0.97 соответственно). Вторая главная компонента с собственным значением 79.44 описывает 21.27 % оставшейся дисперсии и имеет сильную положительную корреляцию с содержанием базофилов (0.81) и отрицательную корреляцию с содержанием гетерофилов (-0.88).

Показатели белой крови самок среднеазиатской черепахи разбросаны по факторному пространству и располагаются во всех квадрантах, что свидетельствует о более высокой экологической пластичности. Напротив, самцы более схожи по лейкоцитарному составу крови и объединяются в первом, третьем и четвертом квадрантах. Наибольший вклад в межполовую дискриминацию по лейкоцитарному профилю среднеазиатской черепахи вносят гранулоцитарные лейкоцитарные клетки (гетерофилы, базофилы и эозинофилы).

Обсуждение

Полученные данные иллюстрируют ведущую роль неспецифической защитной системы крови в ходе онтогенеза среднеазиатских черепах, что обеспечивает, по всей видимости, более устойчивое функционирование организма в условиях аридной зоны. Анализируя собственные результаты и данные литературы, можно сформулировать по крайней мере три обобщения. Во-первых, в крови самок выявлено повышенное содержание лимфоцитов по сравнению с самцами, что иллюстрировало активацию специфической иммунной системы организма. Во-вторых, лимфоцитарно-гранулоцитарный индекс (ИЛГ), который может рассматриваться как показатель сбалансированности иммунного ответа, у самцов был пониженным и отражал наличие относительной и (или) абсолютной лимфопении. Такая картина лейкоцитарной крови свидетельствует, с одной стороны, о намечающейся в организме самцов тенденции к незавершенности иммунных реакций, а с другой – о возможности активного иммунного ответа организма на комплекс экологических факторов среды обитания. В-третьих, более низкое значение индекса соотношения гетерофилов к лимфоцитам (ИСГЛ) у самок позволяет полагать, что в природных условиях аридной зоны по-

сле спаривания они испытывают меньший стресс и характеризуются большей стрессоустойчивостью по сравнению с самцами, что, по-видимому, объясняется повышенной активацией лимфоцитарно-зависимых иммунных реакций. Заметим, что в эволюции птиц низкое соотношение гетерофилов и лимфоцитов у таксонов, а соответственно, и высокая относительная доля лимфоцитов в циркулирующей крови рассматриваются как физиологический компонент медленного темпа жизни с высокой вероятностью выживания (Minias, 2019). По данным, взятым из наблюдений герпетологов в зоопарках и частных коллекциях, рекорд продолжительности жизни у среднеазиатской черепахи – 56 лет – принадлежит самкам при рекорде для самцов 49 лет (Cherepahi.ru, 2024). Возможно, большая продолжительность жизни самок связана с повышенным содержанием лимфоцитов в их крови.

В эритроцитах крови исследованных нами самцов и самок *T. horsfieldii* гемопаразиты не обнаружены, однако уменьшение соотношения гетерофилов и лимфоцитов в крови рептилий может быть вызвано и другими причинами, например, одновременным комплексным воздействием абиотических (патогены среды) и биотических (гельминты) факторов, что требует проведения дополнительных специальных популяционных исследований.

Заключение

Впервые получены базовые популяционные иммуногематологические характеристики природной популяции среднеазиатской черепахи *T. horsfieldii*, добавляющие новую информацию к знаниям о системе крови рептилий в условиях аридной зоны.

В лейкоцитарном профиле самок *T. horsfieldii* выявлено преобладание лимфоцитарно-зависимых иммунных реакций, проявляющихся более низким соотношением гетерофилов и лимфоцитов, а соответственно, и более высокой долей лимфоцитов в циркулирующей крови по сравнению с самцами. Самки характеризуются более высокой экологической пластичностью и стрессоустойчивостью по сравнению с самцами. Выявленные различия могут быть связаны как с половыми физиологическими особенностями вида, обусловленными активацией лимфоцитарно-зависимых иммунных реакций, так и носить сезонный характер. Для получения более точных характеристик половых различий лейкоцитарного

профиля среднеазиатских черепах требуется проведение дополнительного сравнительного экофизиологического анализа иммунного статуса самцов и самок в другие периоды сезонного цикла.

Выявлена статистически значительная положительная связь между содержанием в

крови гранулоцитов, а также значительная отрицательная связь между суммарным содержанием агранулоцитов за счет вклада лимфоцитов и длиной карапакса, что иллюстрировало преобладание неспецифических защитных иммунных реакций в онтогенезе среднеазиатских черепах.

Библиография

- Бондаренко Д. А. Итоги изучения распространения, систематики и экологии среднеазиатской черепахи, *Agrionemys horsfieldii* (Gray, 1844) (Testudines, Testudinidae) // Труды Института зоологии Республики Казахстан. Т. 1. Вып. 1. Алматы: Институт зоологии Республики Казахстан, 2021. С. 37–70.
- Романова Е. Б., Столярова И. А., Бакиев А. Г., Горелов Р. А. Сравнительный лейкоцитарный профиль и размерные характеристики клеток крови сухопутных черепах из Самарского зоопарка // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25, № 5. С. 58–70. Cherepahi.ru. URL: <http://www.reptile-database.org> (дата обращения: 30.05.2024).
- International Guiding Principles for Biomedical Research Involving Animals. URL: https://grants.nih.gov/grants/olaw/guiding_principles_2012.pdf (дата обращения: 30.05.2024).
- Knotkova Z., Doubek J., Knotek Z., Hajkova P. Blood Cell Morphology and Plasma Biochemistry in Russian Tortoises (*Agrionemys horsfieldi*) // Acta Veterinaria Brno. 2002. Vol. 71. P. 191–198.
- Minias P. Evolution of heterophil/lymphocyte ratios in response to ecological and life-history traits: A comparative analysis across the avian tree of life // Journal of Animal Ecology. 2019. Vol. 88. P. 554–565.

CENTRAL ASIAN TORTOISE *TESTUDO HORSFIELDII* GRAY, 1844 (REPTILIA: TESTUDINIDAE): ADAPTIVE BLOOD REACTIONS

ROMANOVA
Elena Borisovna

D.Sc., N.I.Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University, 23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod 603950, Russia, romanova@ibbm.unn.ru

STOLYAROVA
Irina Alexandrovna

N.I.Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University, 23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod 603950, Russia, irinaisto75@gmail.com

BAKIEV
Andrey Gennadyevich

Ph.D., Samara Federal Research Center RAS, 10 Komzin St., Togliatti, 445003, Russia, herpetology@list.ru

GORELOV
Roman Andreevich

Ph.D., Samara Federal Research Center RAS, 10 Komzin street, Togliatti, 445003, Russia, gorelov.roman@mail.ru

Keywords:

reptiles of the arid zone
leukocyte indices
peripheral blood
leukocyte formula of blood
Kazakhstan

Summary: To characterize the natural population of the Central Asian turtle *Testudo horsfieldii* from the Mangystau region of the Republic of Kazakhstan, a hematological approach was used. The leukocyte formula of the blood was assessed with the calculation of the leukocyte indices associated with it (lymphocyte-granulocyte, leukocyte shift, ratio of lymphocytes and eosinophils, ratio of heterophils and eosinophils, ratio of heterophils and lymphocytes). The method of multivariate analysis of variance revealed significant differences in the total leukocyte parameters of males (12 individuals) and females (22 individuals). Sex differences were manifested by an increased content of lymphocytes and the value of the lymphocyte-granulocyte index, as well as a decreased ratio of heterophils and lymphocytes in females. An increased value of the heterophils-lymphocytes ratio index in males indicates a stressful effect on them. In females, a moderate positive correlation was found between the length of the carapace and the content of granulocytes and eosinophils in their blood, and a negative correlation of that with the total content of agranulocytes due to the contribution of lymphocytes. In females, unlike males, lymphocyte-dependent immune reactions predominated. The principal components method was used to differentiate males and females with a more complete quantitative description of the leukocyte composition. The blood pattern and dynamics of its leukocyte indices reflect the active response of the body to a special complex of environmental factors of *T. horsfieldii* habitat in the arid zone.

Reviewer: V. L. Vershinin
V. A. Cherlin

Received on: 04 June 2024

Published on: 13 June 2024

References

- Bondarenko D. A. The results of studying the distribution, systematics and ecology of the Central Asian turtle, *Agrionemys horsfieldii* (Gray, 1844) (Testudines, Testudinidae), Trudy Instituta zoologii Respubliki Kazakhstan. T. 1. Vyp. 1. Almaty: Institut zoologii Respubliki Kazakhstan, 2021. P. 37–70.
Cherepahi.ru. URL: <http://www.reptile-database.org> (data obrascheniya: 30.05.2024).
International Guiding Principles for Biomedical Research Involving Animals. URL: https://grants.nih.gov/grants/olaw/guiding_principles_2012.pdf (data obrascheniya: 30.05.2024).

- Knotkova Z., Doubek J., Knotek Z., Hajkova P. Blood Cell Morphology and Plasma Biochemistry in Russian Tortoises (*Agrionemys horsfieldi*), Acta Veterinaria Brno. 2002. Vol. 71. P. 191–198.
- Minias P. Evolution of heterophil/lymphocyte ratios in response to ecological and life-history traits: A comparative analysis across the avian tree of life, Journal of Animal Ecology. 2019. Vol. 88. P. 554–565.
- Romanova E. B. Stolyarova I. A. Bakiev A. G. Gorelov R. A. Comparative leukocyte profile and size characteristics of blood cells of land turtles from the Samara Zoo, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2023. T. 25, No. 5. P. 58–70.



УДК 502/504

СНИЖЕНИЕ ФИТОТОКСИЧНОСТИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

СИВКОВ
Юрий Викторович

кандидат биологических наук, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», 625000, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2, sivkovjv@tyuiu.ru

НИКИФОРОВ
Артур Сергеевич

кандидат биологических наук, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», 625000, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2, nikiforovas@tyuiu.ru

Ключевые слова:
нефтезагрязнение
торфяная почва
поверхностно-активные вещества
бактерии
удобрения
восстановление
экология

Аннотация: В статье приведены исследования по изучению эффективности применения различных восстановительных комплексов на основе поверхностно-активных веществ «Гидробрейк» и «Рифей» с включением бактерий и удобрений для очистки нефтезагрязненных торфяных почв. Объектом исследования послужила торфяная почва на среднем торфе и торфянисто-глеевая почва, загрязненные товарной нефтью. В ходе проведения опыта оценивались показатели остаточного содержания нефтепродуктов и показатели фитотоксичности. Результаты проведенных исследований показали, что наиболее эффективным является способ снижения загрязнения почвы нефтью с применением поверхностно-активных веществ, биологического препарата и удобрений, снижение концентрации в течение 26 суток в этом случае составило 37.4 и 34.8 % для торфяной почвы на среднем торфе и торфянисто-глеевой почвы соответственно. При оценке фитотоксичности в качестве тест-объектов использовался овес посевной. Снижение фитотоксичности наблюдалось во всех вариантах применения восстановительных комплексов. Всхожесть для торфяной почвы на среднем торфе для вариантов с применением восстановительных комплексов была выше, чем в контрольном варианте, на 6–32 %, для торфянисто-глеевой почвы на 8–30 %. Проведенные исследования свидетельствуют о высокой эффективности применения восстановительных комплексов.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 12 ноября 2023 года

Подписана к печати: 26 июня 2024 года

Введение

Нарушение устойчивого функционирования почвенной экосистемы, связанное с поступлением в нее нефтезагрязнения, а также сопутствующее загрязнение подземных и поверхностных вод, атмосферного воздуха, растительности являются одной из актуальных проблем природопользования.

Тюменская область относится к терри-

тории, которая имеет высокий риск нефтезагрязнения окружающей среды в связи с большим количеством объектов нефтегазовой отрасли. Неуправляемые техногенные потоки углеводородов, образующиеся в результате добычи нефти и газа, их транспортировки, переработки и потребления, приводят к антропогенному преобразованию географической оболочки, при котором по-

чвы имеют нулевой потенциал для функционирования природных систем (Пиковский, 1993). Когда нефть попадает в окружающую среду, ее соединения подвергаются физическим, химическим и биологическим изменениям (Бабаев, Мовсумзаде, 2009; Кирий и др., 2014; Баландина и др., 2014).

Проблема загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами решается различными методами рекультивации земель, среди которых наиболее значимым являются *in situ* – то есть методы восстановления почв «на месте» без изъятия нефтезагрязненного грунта. В современных условиях с повышением критериев к охране окружающей среды это связано в первую очередь с относительной эффективностью и безопасностью для местных экосистем, а также меньшими экономическими затратами в сравнении с методами *ex situ* (Никифоров, 2021).

На сегодняшний день основными методами являются: внесение удобрений, фитомелиоративные мероприятия, рыхление, известкование, добавление сорбентов, орошение, внесение ферментов или косубстратов, структурообразователей, поверхностно-активных веществ.

За последние годы накоплено немало результатов исследований, подтверждающих эффективность применения различных по химической природе поверхностно-активных веществ в биоремедиации (Плотникова и др., 2016; Куликова, 2019; Антипова и др., 2014; Неустроев, 2016 и др.). Однако особенности синергетических эффектов совместного применения поверхностно-активных веществ и биопрепаратов (удобрения, бакпрепараты) остаются слабо изученными как на биофизическом, так и на биохимическом уровне.

Цель исследования заключалась в изучении эффективности применения различных восстановительных комплексов на основе поверхностно-активных веществ и биопрепаратов для биоремедиации нефтезагрязненных торфяных почв.

Материалы

Объектом исследования являются торфяно-перегнойные типичные почвы на мелком торфе, а также торфянисто-перегнойно-глеевая солончаковая почва, расположенная в Тюменском районе Тарманского болотного массива. Растениями-торфообразователями служили осоки, тростник, гипнум и др.

Подстилающими породами являются

мелкозернистые пески и песчаные глины четвертичных отложений (липовская свита), имеющие мощность 16 м. Ниже четвертичных осадков залегают породы палеогена (туртасская и куртамышская свиты). Литологические осадки свит представлены мелкозернистыми песками и глинами общей мощностью 25 м. Ниже располагается пласт глины регионального водоупора (тавдинская свита), мощность которого в пределах Тарманского болота 60–130 м.

Агрохимические свойства торфяных почв северной лесостепи тесно связаны с условиями их образования. Торфяная почва на среднем торфе имеет слабокислую реакцию среды (5.9–6.0 $pH_{\text{кол}}$), гидролитическая кислотность составляет в среднем 22.7 мг-экв. на 100 г абсолютно сухой почвы. Торфянисто-глеевая почва, напротив, имеет слабощелочную реакцию (7.5 $pH_{\text{кол}}$) и низкую гидролитическую кислотность (5.5 мг-экв. на 100 г абсолютно сухой почвы). Торфяная почва на мелком торфе и торфянисто-глеевая почва имеют высокую степень насыщенности основаниями (85.3–96.3 %) (Сивков, 2015).

Высокое содержание органических веществ и минералов в торфянисто-глеевой почве делает ее более плодородной, чем торфяной почвы на мелком торфе, поэтому они часто используются в сельском хозяйстве.

Методы

Процесс постановки лабораторного опыта заключался в моделировании загрязнения нефтью торфяной почвы из расчета 5 % от объема с последующим внесением восстановительных комплексов по следующей схеме в четырехкратной повторности (рис. 1):

1. Незагрязненная почва (П0);
2. Контроль (П1);
3. Гидробрейк 1:100 (П2);
4. Гидробрейк 1:100 + Дестройл (П3);
5. Гидробрейк 1:100 + Дестройл + Микориза (П4);
6. Гидробрейк 1:100 + Дестройл + Гумат (удобрения) (П5);
7. Рифей 1:20 (П6);
8. Рифей 1:20 + Дестройл (П7);
9. Рифей 1:20 + Дестройл + Микориза (П8);
10. Рифей 1:20 + Дестройл + Гумат (удобрения) (П9).



Рис. 1. Образцы нефтезагрязненной почвы

Fig. 1. Samples of oil-contaminated soil

В качестве поверхностно-активных веществ при проведении исследований использовались два вещества, применяемых для промывки почвы, загрязненной нефтью: гидробрейк и рифей.

Препаратами на основе поверхностно-активных веществ, применяемыми при проведении исследований по очистке почв от нефтезагрязнения, являлись коммерческие препараты «гидробрейк» и «рифей-эко». По данным производителей, состав гидробрейка представляет собой водный раствор биоразлагаемых поверхностно-активных веществ, слабых органических кислот и растительных экстрактов; состав рифей-эко: вода, смесь поверхностно-активных веществ (диспергаторы и деэмульгаторы), органические добавки, антиресорбент. Данные препараты были выбраны в связи с востребованностью их предприятиями, занимающимися ликвидацией аварийных разливов нефти, и недостаточным подтверждением их эффективности научными исследованиями.

Оба препарата имеют схожий способ и область применения, заключающуюся в многократном разбавлении водой (от 10 до 200 раз в зависимости от степени загрязнения) и последующем орошении нефтезагрязненного грунта или поверхности.

Для стимуляции процесса биodeградации нефтезагрязнения в образцах торфяной по-

чвы применялся биологический препарат «Дестройл» (ПО «Сиббиофарм») на основе *Acinetobacter* sp. Этот препарат представляет собой порошок, состоящий из клеток микроорганизма, обладающих углеводородокисляющей активностью с концентрацией не менее 10^8 клеток в 1 грамме препарата, остатков питательной среды (Никифоров, 2021).

Для поддержания процессов жизнедеятельности углеводородокисляющей микрофлоры в почву вносились микориза (ООО «Биоабсолют») и гумат (ООО «НПЦ «Эврика»).

Микориза – это симбиотическое союзное сообщество корней растений и грибов. Этот вид биологического удобрения позволяет повысить урожайность и качество продукции, а также снизить затраты на химические удобрения (Брындина, 2022).

Гумат – это органическое удобрение, обладает стимулирующими и адаптогенными свойствами. Повышает энергию прорастания, всхожесть, устойчивость к болезням, к стрессам от пестицидов, низких температур, засухи и других внешних условий; увеличивает коэффициент использования питательных веществ; снижает содержание нитратов в продукции. Он ускоряет рост и развитие растений, повышает урожайность и качество продукции, норма внесения 5–10 г на 1 м²

или 10 г на 10 л воды (Грехова, 2015).

В качестве загрязнителя была использована нефть товарная, взятая из нефтепровода Шаим-Тюмень. Данная нефть имеет плотность 838–854 кг/м³, кинематическую вязкость 8.5 сСт и температуру застывания минус 14 °С. Также в нефти кроме основного продукта присутствуют механические примеси (не более 0.02 %), сера (не более 0.75 %) и хлористые соли (до 26 мг/дм³).

В процессе опыта контроль остаточного содержания нефтепродуктов в почвенных образцах осуществлялся в начале эксперимента, на 8-е и 26-е сутки по методике ПНДФ 16.1:2.21-98 «Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости "Флюарат-02"».

Оценку всхожести семян определяли согласно ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести».

Для постановки эксперимента по определению всхожести использовались вегетационные сосуды емкостью 700 мл. Для каждого образца отбиралось по 50 семян овса посевного, которые были предварительно проверены визуально, чтобы убедиться, что они сходного размера и не повреждены. Затем семена дважды промывали этанолом (70 %). Высев семян производился в почву на 26-е сутки от начала эксперимента. Семена *Avena* проращивали при комнатной температуре 20 ± 2 °С.

Для оценки степени токсичности образцов почвы в лабораторных условиях определяли показатели прорастания семян – всхожесть и среднюю длину всходов. Всхожесть семян рассчитывали как долю проросших семян, выраженную в процентах от общего количества семян, взятых для проращивания.

В результатах научной работы представлены среднеарифметические данные четырех повторностей вариантов опыта и стандартные ошибки. Для достоверного определения отличий в опыте и контроле использовали парный *t*-тест и двухфакторный дисперсионный анализ. Статистическую обработку осуществляли с использованием Microsoft Excel.

Результаты

Анализ остаточного содержания нефтепродуктов на начало опыта в торфяной почве на среднем торфе и торфянисто-глеевой почве показал значения 21.9 и 23.3 г/кг соответственно.

Через сутки после формирования отдельных проб был поставлен эксперимент с внесением в них компонентов в соответствии со схемой, представленной выше.

Отбор почвенных образцов для проведения исследования на содержание нефти производился на 8-е и 26-е сутки от начала эксперимента. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1 для торфяной почвы на среднем торфе и торфянисто-глеевой почвы соответственно.

Таблица 1. Динамика снижения остаточного содержания нефтепродуктов

Показатель	Варианты опыта								
	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9
Торфяная почва на среднем торфе									
1. Содержание НП, г/кг:									
на начало опыта	21.9	21.9	21.9	21.9	21.9	21.9	21.9	21.9	21.9
через 8 суток	20.4	19	18.35	19.2	19.4	18.75	19.65	20.2	19.35
через 26 суток	17.5	15	14.4	14.15	13.7	14.2	16.7	15	14.5
2. Снижение остаточного содержания НП, %									
	20.1	31.5	34.2	35.4	37.4	35.2	23.7	31.5	33.8
Торфянисто-глеевая почва									
1. Содержание НП, г/кг:									
на начало опыта	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3
через 8 суток	21.9	21.6	20.8	21.2	20.5	21.45	21.8	20.7	20.8
через 26 суток	18.75	16	16.7	16.3	15.2	18.1	18	16.5	15.8
2. Снижение остаточного содержания НП, %									
	19.5	31.3	28.3	30.0	34.8	22.3	22.7	29.2	32.2

Из таблицы видно, что во всех вариантах отмечается снижение остаточного содержания нефтепродуктов.

Анализируя эффективность применения восстановительных комплексов на основе поверхностно-активных веществ «Гидробрейк» и «Рифей», можно отметить их положительное влияние по всем вариантам лабораторного эксперимента, в среднем снижение остаточного содержания нефтепродуктов в первые восемь дней составило 11 %, а через 26 дней – 31 % по всем вариантам от начала эксперимента.

В вариантах с внесением помимо поверхностно-активных веществ биологического препарата «Дестройл» во все сроки не отмечено значительных отклонений от средних значений скорости снижения остаточного содержания нефтепродуктов. Так, в среднем по вариантам остаточное содержание нефтепродуктов для торфяной почвы на среднем торфе снизилось в первые восемь дней незначительно, в последующие 26 дней – в среднем на 32.8 %. Примерно аналогичная ситуация по остаточному содержанию нефтепродуктов наблюдается и для торфянисто-глеевой почвы.

Двухфакторный дисперсионный анализ данных, приведенных в табл. 1, показал влияние на снижение нефтепродуктов восстановительных комплексов для торфяной почвы на среднем торфе ($F = 13.79 > F_U = 2.05$) и торфянисто-глеевой почвы ($F = 11.46 > F_U = 2.05$), а также влияние продолжительности

проведения эксперимента ($F = 1458.01 > F_U = 3.10$ и $F = 1276.90 > F_U = 3.10$ для соответствующего типа почвы).

Максимальное снижение концентрации отмечается в вариантах, где добавлялись поверхностно-активные вещества, биопрепарат и удобрение. Для торфяной почвы на среднем торфе значение составило 13.7 г/кг (П5), а для торфяно-глеевой – 14.5 г/кг (П9). Аналогичная ситуация отмечается и для торфяно-глеевой почвы, значение остаточного содержания нефтепродуктов составило 15.2 и 15.8 г/кг соответственно.

Рассматривая варианты применения поверхностно-активных веществ «Гидробрейк» и «Рифей», можно отметить, что снижение содержания нефтепродуктов в вариантах с применением «Гидробрейка» для обоих типов почв выше в среднем на 4.1 %, что по результату парного двухвыборочного t -теста не является статистически значимым различием ($t_{набл.} = 0.76 < t_{крит.} = 2.06$).

Анализ литературы показывает, что оценка фитотоксичности является наиболее подходящим биоиндикатором эффективности процесса восстановления плодородия нефтезагрязненных почв (Гашева и др., 1990; Фомченков и др., 1996; Капелькина, 2001; Назаров, Иларионов, 2005; Adam, Duncan, 1999; Banks, Schultz, 2005).

Результаты оценки всхожести семян и длины всходов в исследуемых образцах приведены на рис. 2 и в табл. 2.

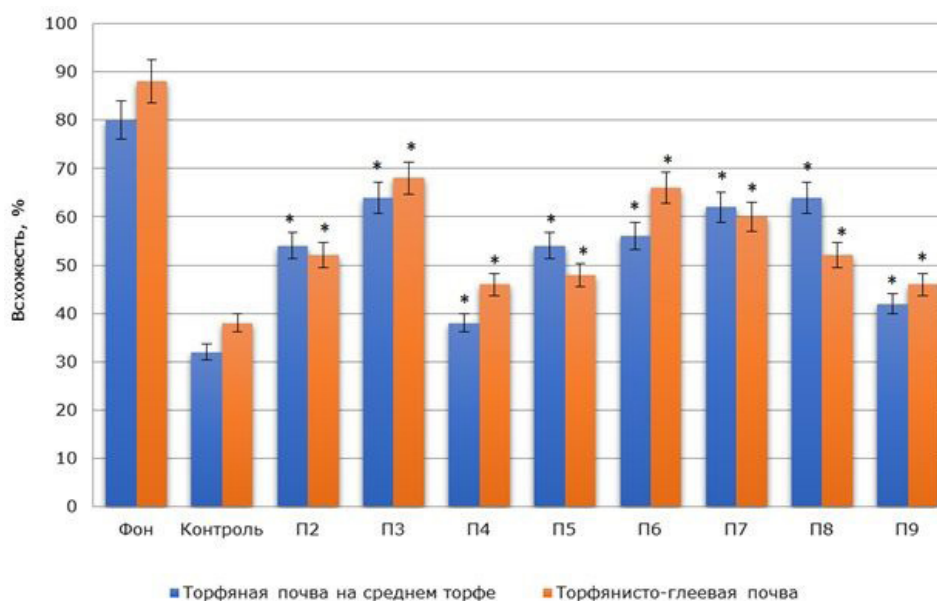


Рис. 2. Результаты оценки всхожести семян в исследуемых образцах.

* – различия с контролем достоверны при $p < 0.05$

Fig. 2. The results of the evaluation of seed germination in the studied samples.

* – differences with the control are significant at $p < 0.05$

Таблица 2. Результаты измерения длины всходов в исследуемых образцах, мм

Номер образца	Торфяная почва на среднем торфе		Торфянисто-глеевая почва	
	Min–Max	M ± m (p=0.05)	Min–Max	M ± m (p=0.05)
П0	65–185	108 ± 7.2	63–156	115 ± 7.9
П1	18–74	49 ± 2.8	35–81	62 ± 4.4
П2	14–88	61 ± 4.2	18–117	83 ± 5.7
П3	20–113	70 ± 4.8	64–144	108 ± 7.3
П4	15–97	65 ± 4.5	15–110	87 ± 6.3
П5	28–96	66 ± 4.5	55–150	106 ± 6.9
П6	38–101	59 ± 4.0	43–146	104 ± 7.0
П7	29–80	54 ± 3.6	35–120	98 ± 8.1
П8	35–92	68 ± 5.1	25–153	96 ± 7.7
П9	20–85	62 ± 4.4	45–128	95 ± 7.4

Из данных, приведенных на рис. 2, видно, что снижение фитотоксичности наблюдается во всех вариантах применения восстановительных комплексов. Всхожесть для торфяной почвы на среднем торфе для вариантов П2–П9 была выше, чем в контрольном варианте П1, на 6–32 %, для торфянисто-глеевой почвы – на 8–30 %. Максимальная всхожесть наблюдалась в вариантах П3, П7, П8 для торфяной почвы на среднем торфе и П3, П6, П7 для торфянисто-глеевой почвы. Двухфакторный дисперсионный анализ данных, приведенных на рис. 2, показал наличие статистически значимых различий между вариантами опыта ($F = 58.21 > F_{\alpha} = 2.04$) и отсутствие существенного влияния типа почвы на показатели всхожести семян ($F = 2.42 < F_{\alpha} = 4.01$) при уровне значимости $\alpha = 0.05$.

Результаты измерения длины всходов в исследуемых образцах показали значительный разброс значений внутри каждого варианта опыта, что, очевидно, связано с наличием других неучтенных факторов, влияющих на этот показатель. Если учитывать только среднюю длину ростков, то в образцах, где применялись восстановительные комплексы, этот показатель был выше, чем в нефтезагрязненном контроле, на 5–21 мм для торфяной почвы на среднем торфе и на 21–46 мм для торфянисто-глеевой почвы. Результаты статистической обработки данных дают основания говорить о существенном влиянии типа почвы на длину ростков овса ($F = 49.91 > F_{\alpha} = 5.12$).

Обсуждение

Добавление различных компонентов приводит к снижению остаточного содержания нефтепродуктов в первые восемь суток на 7.8–16.2 и 6.4–12.0 % соответственно для торфяной почвы на среднем торфе и торфянисто-глеевой почве по сравнению с контролем. Аналогичные результаты были получены в исследованиях, проводимых А. В. Ледневым и И. А. Скворцовой (2017), где нефтезагрязнение торфяной почвы составляло 20 г/кг и в течение первых пяти дней доля извлечения нефтепродуктов равнялась 7 %. На 26-е сутки снижение остаточного содержания нефтепродуктов от начала эксперимента составило 23.7–37.4 % для торфяной почвы на среднем торфе и 22.3–34.8 % для торфянисто-глеевой почвы, на контроле остаточное содержание нефтепродуктов уменьшилось на 20.1 и 19.5 % соответственно. Эти данные подтверждаются результатами исследований И. И. Толпешта и др. (2015), в которых снижение загрязнения нефтью торфа с удобрениями в течение 2.5 месяца привело к уменьшению содержания в образцах нефтепродуктов на 26 %.

В результате проведенного лабораторного исследования можно отметить, что наиболее эффективным является способ снижения загрязнения почвы нефтью с применением поверхностно-активных веществ, биологического препарата и удобрений, снижение концентрации в течение 26 суток в этом случае составляет 37.4 и 34.8 % соот-

ветственно для торфяной почвы на среднем торфе и торфянисто-глеевой почвы. Полученные результаты подтверждаются статистической достоверностью различия с контролем на 26-й день во всех вариантах кроме П7 на торфяной почве на среднем торфе и вариантов П6 и П7 на торфянисто-глеевой почве. Положительный эффект применения поверхностно-активных веществ отмечается в работе О. А. Куликовой (2019), через неделю после обработки почвы снижение уровня нефтяного загрязнения в почвогрунте составило 33.6 %.

В целом показатели всхожести и длины стеблей отражают эффективность применения восстановительных комплексов на основе поверхностно-активных веществ, тем самым подтверждая снижение фитотоксичности. В работе А. С. Чердакова и С. В. Гальченко (2020) говорится, что применения мелиорантов повышает уровень детоксикации загрязненной почвы, что выражается в снижении ее фитотоксичности. Исследованиями Э. Р. Зайнулгабидинов и др. (2014) установлена зависимость фитотоксичности почв от содержания в ней углеводов, изменение концентрации загрязнителя во времени отражается на показателе фитотоксичности. Полученные в данной работе результаты не позволяют судить о высоте ростков как надежном показателе, характеризующем фитотоксичность нефтезагрязненных почв.

Заключение

Результаты статистической обработки данных, полученных в результате проведенных исследований, показывают, что все применяемые восстановительные комплексы приводят к статистически значимому снижению

остаточного содержания нефтепродуктов ($t_{набл.} = 4.77 > t_{крит.} = 2.07$) по сравнению с контролем. Однако среди данных вариантов можно выделить наиболее эффективные восстановительные комплексы.

Применение поверхностно-активных веществ привело на конец эксперимента к снижению остаточного содержания нефтепродуктов в среднем на 31 % для исследуемых типов почв. В контрольном варианте снижение остаточного содержания нефтепродуктов составило в среднем 19.8 %.

Необходимо отметить, что применение бакпрепарата «Дестройл» в дополнение к поверхностно-активным веществам не приводит к статистически значимому влиянию на эффективность биоремедиации ($t_{набл.} = 1.56 < t_{крит.} = 2.07$).

По результатам парного двухвыборочного t -теста статистически значимые отличия наблюдаются при добавлении гуматов в восстановительном комплексе на основе Гидробрейка ($t_{набл.} = 4.12 > t_{крит.} = 2.07$).

Оценка фитотоксичности почв показала, что значение всхожести семян *Avena* превышали контрольные значения во всех вариантах с применением восстановительных комплексов на 6–32 %.

Результаты измерения длины всходов в исследуемых образцах подтвердили, что нефтезагрязнение оказывает угнетающее влияние на морфометрические показатели по сравнению с незагрязненной почвой. Однако в образцах, где применялись восстановительные комплексы, средняя длина всходов была выше, чем в нефтезагрязненном контроле, на 5–21 мм для торфяной почвы на среднем торфе и на 21–46 мм для торфянисто-глеевой почвы.

Библиография

- Антипова К. А., Мурадян А. С., Максимова В. В. и др. Влияние поверхностно-активных веществ на рост и деструктивную активность углеводородокисляющих микроорганизмов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 3. С. 256–259.
- Бабаев Э. Р., Мовсумзаде М. Э. Преобразование нефти в процессе ее микробиологической деградации в почве // Башкирский химический журнал. 2009. Vol. 16, № 3. С. 80–87.
- Баландина А. В., Кузнецов Д. Б., Бурдова Л. В. Самовосстановление нефтезагрязненных почв // Успехи современного естествознания. 2014. № 4. С. 85–88.
- Брындина Л. В., Арнаут Ю. И., Алыкова О. И. Микоризообразующие грибы в формировании биогеоценозов: аналитический обзор // Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12, № 1 (45). С. 5–20. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/1.
- Гашева М. Н., Соромотин А. В., Гашев С. Н. Состояние растительности как критерий нарушенности лесных биоценозов при нефтяном загрязнении // Экология. 1990. № 2. С. 77–78.
- Грехова И. В. Гуминовый препарат из низинного торфа // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 87–90.
- Зайнулгабидинов Э. Р., Игнатъев Ю. А., Петров А. М. Особенности изменения фитотоксичности дерново-карбонатной и светло-серой лесной почв, загрязненных нефтепродуктами // Журнал экологии и промышленной безопасности. 2014. № 1–2 (61–62). С. 35–37.

- Капелькина Л. П. Экосистемный подход к установлению региональных нормативов допустимого остаточного уровня содержания нефтепродуктов в почвах болотных ландшафтов // Экобиотехнология. Борьба с нефтяным загрязнением окружающей среды: Тез. докл. конф., Пущино, 29–30 января 2001 г. Пущино, 2001. С. 9–10.
- Кирий О. А., Колесников С. И., Зинчук А. Н., Казеев К. Ш. Использование углеводородокисляющих бактерий при биоремедиации нефтезагрязненных почв и вод: Монография. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. 140 с. URL: <https://rucont.ru/efd/637106> (дата обращения: 30.03.2024).
- Куликова О. А. Экологические аспекты применения ПАВ для восстановления нарушенных арктических земель: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 162 с.
- Леднев А. В., Скворцова И. А. Влияние нефтяного загрязнения на микробное сообщество торфяных почв среднего Предуралья // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017. № 1 (56). С. 47–53.
- Назаров А. В., Иларионов С. А. Изучение причин фитотоксичности нефтезагрязненных почв // Письма в Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2005. № 1. С. 60–65.
- Неустроев М. М. Экологическая оценка нефтезагрязненных мерзлотных почв и разработка способов их биоремедиации: Дис. ... канд. биол. наук. Якутск, 2016. 131 с.
- Никифоров А. С. Биоремедиация нефтезагрязненных луговых почв юга Тюменской области: Дис. ... канд. биол. наук. Тюмень, 2021. 142 с.
- Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 208 с.
- Плотникова М. Д., Щербань М. Г., Медведева Н. А. Перспективы использования водных композиций поверхностно-активных веществ для очистки нефтезагрязненных грунтов // Географический вестник. 2016. № 3 (38). С. 114–121.
- Сивков Ю. В. Физико-химические свойства торфа, применяемого для рекультивации нарушенных земель // Инновации и инвестиции. 2015. № 9. С. 204–205.
- Толпешта И. И., Трофимов С. Я., Эркенова М. И. и др. Лабораторное моделирование последовательного аэробного и анаэробного разложения нефтепродуктов в загрязненном нефтью верховом торфе // Почвоведение. 2015. № 3. С. 360. DOI: 10.7868/S0032180X15030120.
- Чердакова А. С., Гальченко С. В. Изменение фитотоксичности почв, загрязненных нефтепродуктами, в процессе их микробиологической ремедиации при внесении гуминовых препаратов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020. Т. 28, № 4. С. 336–348. DOI: 10.22363/2313-2310-2020-28-4-336-348.
- Adam G., Duncan H. Effect of diesel fuel on growth of selected plant species // Environmental Geochemistry and Health. 1999. Vol. 21. P. 353–357.
- Banks M. K., Schultz K. E. Comparison of plants for germination toxicity tests in petroleum contaminated soils // Water Air and Soil Pollution. 2005. Vol. 167 (1–4). P. 211–219.

REDUCTION OF PHYTOTOXICITY OF OIL-CONTAMINATED PEAT SOILS THROUGH THE USE OF REGENERATIVE COMPLEXES BASED ON SURFACTANTS

SIVKOV
Yuri Viktorovich

Ph.D., Tyumen Industrial University, 625000, Tyumen, Lunacharsky St., 2, sivkovjv@tyuiu.ru

NIKIFOROV
Artur Sergeevich

Ph.D., Tyumen Industrial University, 625000, Tyumen, Lunacharsky St., 2 2, nikiforovas@tyuiu.ru

Keywords:

oil pollution
peat soil
surfactants
bacteria
fertilizers
restoration
ecology

Summary: The article presents studies on the effectiveness of using various regenerative complexes based on the surfactants “Hydrobreak” and “Rifey” with the inclusion of bacteria and fertilizers for purification of oil-contaminated peat soils. The object of the study was peat soil on medium peat and peaty gley soil contaminated with commercial oil. During the experiment, the residual content of petroleum products and phytotoxicity indicators were assessed. The results of the studies showed that the most effective way to reduce soil contamination with oil was using surfactants, biological preparations and fertilizers. The decrease in concentration over 26 days in this case was 37.4 and 34.8% for peat soil on medium peat and peaty gley soil, respectively. When assessing phytotoxicity, oats were used as test objects. A decrease in phytotoxicity was observed in all variants of using regenerative complexes. When using regenerative complexes, germination rate for peat soil on medium peat was higher than in the control by 6–32 %, for peaty gley soil by 8–30 %. The conducted studies indicate the high efficiency of the use of regenerative complexes.

Received on: 12 November 2024

Published on: 26 June 2024

References

- Adam G., Duncan H. Effect of diesel fuel on growth of selected plant species, *Environmental Geochemistry and Health*. 1999. Vol. 21. P. 353–357.
- Antipova K. A. Muradyan A. S. Maksimova V. V. The influence of surfactants on the growth and destructive activity of hydrocarbon-oxidizing microorganisms, *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2014. T. 17, No. 3. P. 256–259.
- Babaev E. R. Movsumzade M. E. Transformation of oil during its microbiological degradation in soil, *Bashkirskiy himicheskij zhurnal*. 2009. Vol. 16, No. 3. P. 80–87.
- Balandina A. V. Kuznecov D. B. Burdova L. V. Self-regeneration of oil-contaminated soils, *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya*. 2014. No. 4. P. 85–88.
- Banks M. K., Schultz K. E. Comparison of plants for germination toxicity tests in petroleum contaminated soils, *Water Air and Soil Pollution*. 2005. Vol. 167 (1–4). P. 211–219.
- Bryndina L. V. Arnaut Yu. I. Alykova O. I. Mycorrhiza-forming fungi in the formation of biogeocenoses: an analytical review, *Lesotehnicheskij zhurnal*. 2022. T. 12, No. 1 (45). P. 5–20. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/1.
- Cherdakova A. S. Gal’chenko S. V. Changes in the phytotoxicity of soils contaminated with petroleum products in the process of their microbiological remediation with the addition of humic preparations, *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Èkologiya i bezopasnost’ zhiznedeyatel’nosti*. 2020. T. 28, No. 4. P. 336–348. DOI: 10.22363/2313-2310-2020-28-4-336-348.
- Gasheva M. N. Soromotin A. V. Gashev S. N. The state of vegetation as a criterion for the disturbance of forest biocenoses during oil pollution, *Èkologiya*. 1990. No. 2. P. 77–78.
- Grehova I. V. Humic preparation from lowland peat, *Teoreticheskaya i prikladnaya èkologiya*. 2015. No. 1. P. 87–90.
- Kapel’kina L. P. An ecosystem approach to establishing regional standards for the permissible residual level of petroleum products in soils of swamp landscapes, *Èkobiotehnologiya. Bor’ba s neftyanym zagryazneniem okružhayuschey sredy: Tez. dokl. konf., Puschino, 29–30 yanvarya 2001 g. Puschino*, 2001. P. 9–10.
- Kiriya O. A. Kolesnikov S. I. Zinchuk A. N. Kazeev K. Sh. The use of hydrocarbon-oxidizing bacteria in the

- bioremediation of oil-contaminated soils and waters: Monograph. Rostov-na-Donu: Izd-vo YuFU, 2013. 140 p. URL: <https://rucont.ru/efd/637106> (data obrascheniya: 30.03.2024).
- Kulikova O. A. Environmental aspects of the use of surfactants for restoration of disturbed Arctic lands. M., 2019. 162 p.
- Lednev A. V. Skvorcova I. A. The influence of oil pollution on the microbial community of peat soils in the middle Cis-Urals, *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2017. No. 1 (56). P. 47–53.
- Nazarov A. V. Ilarionov S. A. Studying the causes of phytotoxicity of oil-contaminated soils, *Pis'ma v Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya»*. 2005. No. 1. P. 60–65.
- Neustroev M. M. Environmental assessment of oil-contaminated cryogenic soils and development of methods for their bioremediation. Yakutsk, 2016. 131 p.
- Nikiforov A. S. Bioremediation of oil-contaminated meadow soils in the south of the Tyumen region. Tyumen', 2021. 142 p.
- Pikovskiy Yu. I. Natural and man-made flows of hydrocarbons in the environment. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1993. 208 p.
- Plotnikova M. D. Scherban' M. G. Medvedeva N. A. Prospects for the use of aqueous compositions of surfactants for cleaning oil-contaminated soils, *Geograficheskiy vestnik*. 2016. No. 3 (38). P. 114–121.
- Sivkov Yu. V. Physico-chemical properties of peat used for reclamation of disturbed lands, *Innovacii i investicii*. 2015. No. 9. P. 204–205.
- Tolpeshta I. I. Trofimov S. Ya. Erkenova M. I. Laboratory modeling of sequential aerobic and anaerobic decomposition of petroleum products in oil-contaminated high peat, *Pochvovedenie*. 2015. No. 3. P. 360. DOI: 10.7868/S0032180X15030120.
- Zaynulgabidinov E. R. Ignat'ev Yu. A. Petrov A. M. Features of changes in phytotoxicity of soddy-carbonate and light gray forest soils contaminated with petroleum products, *Zhurnal ekologii i promyshlennoy bezopasnosti*. 2014. No. 1–2 (61–62). P. 35–37.



ЮБИЛЕЙ СЕРГЕЯ АНДРЕЕВИЧА ОСТРОУМОВА (К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

Казалось, совсем недавно мы поздравляли Сергея Андреевича Остроумова (О.С.А.) с 60-летием (Toderas et al., 2009; Розенберг, Саксонов, 2010), с 70-летием (Розенберг, Саксонов, 2019)... И вот пролетело еще пять лет – и уже не «круглая дата», а настоящий юбилей.

О.С.А. родился 21 июня 1949 г. в г. Корсакове (на Сахалине). Окончил Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова с отличием (именной стипендиат) и был оставлен в аспирантуре. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1975), затем доктора биологических наук (2000). Многие годы О.С.А. работает на биологическом факультете МГУ.

Активно в 90-х, нулевых годах и далее О.С.А. повышал квалификацию по специальности «разнообразие микроорганизмов» в Морской биологической лаборатории (Marine Biological Laboratory, Вудс-Хоул, США) и Университете Кардиффа (по приглашению Royal Society, Великобритания), по вопросам экологии и окружающей среды в университетах Нью-Йорка, Мэриленда, Джорджии, Массачусетса, в лаборатории Агентства по охране окружающей среды США и в National Science Foundation, США; по водной токсикологии в Plymouth Marine Laboratory, Великобритания.

Творческая деятельность О.С.А. включает научно-исследовательскую, лекционную, учебно-методическую, издательскую работу, активное участие в распространении экологических знаний. Он опубликовал инновационные работы в области экологии, вносящие вклад в биохимическую экологию, научные основы сохранения окружающей среды, водных систем и биоразнообразия.

О.С.А. прекрасный экспериментатор, что позволило ему разработать новые методы биотестирования и экологически существенной характеристики водных организмов с

использованием проростков растений, моллюсков и других организмов. Благодаря использованию разработанных им методов О.С.А. получил новые интересные факты о негативном воздействии загрязняющих веществ (ПАВ, тяжелых металлов, смесевых препаратов, пестицидов и др.) на разнообразные организмы – бактерии (морские простекобактерии), цианобактерии (водные и почвенные), зеленые водоросли (водные и почвенные), несколько видов высших растений (наземные и водные), водные моллюски (легочные и двустворчатые). В частности, при использовании моллюсков он разработал новые варианты оценки способности химических веществ снижать фильтрационную активность моллюсков. Полученные им новые факты о действии ПАВ и ПАВ-содержащих препаратов на фильтрационную активность моллюсков послужили основой для экологически важных выводов и после соответствующей экспертизы были признаны научным открытием (Диплом 274, 31 января 2005 г.). О.С.А. предложил новый алгоритм и формулу для проведения сопоставлений и сравнений при оценке биологической активности веществ; вычисляемый показатель был им назван «коэффициентом корреспондирования».

Как и у большинства естествоиспытателей, знакомство с О.С.А. началось у нас с монографии по охране природы (Яблоков, Остроумов, 1983), в которой впервые было дано многостороннее систематизированное изложение, научный анализ, проблемы, охрана живой природы, сохранение биоразнообразия. Кроме того, в работе впервые были четко сформулированы основные направления экологизации жизни общества, заложены научные основы охраны живой природы, впервые сформулировано понятие биосфероцентризма (акцент сделан не на «человеческое», а на «биосферное» измерение

бытия). Эта книга, написанная в соавторстве с будущим (через год) членом-корреспондентом АН СССР А. В. Яблоковым, сразу стала настольной для большинства специалистов по охране природы. Положительные рецензии на нее были опубликованы в ряде авторитетных научных журналов («Ботанический журнал», «Природа», «Человек и природа», «Биология в школе», «Научные доклады высшей школы. Биологические науки»), а также в СМИ («Московская правда» и др.). Книга до сих пор широко используется в преподавании экологических дисциплин, включена в программы кандидатского минимума, университетских курсов по ряду биологических, экологических и географических дисциплин, вступительных экзаменов в аспирантуру. Она была переведена на болгарский, чешский, испанский и английский языки; фрагменты книги переведены на румынский язык.

Потом была интересная монография (одна из первых) по биохимической экологии (Остроумов, 1986), в которой автор ввел в науку новые понятия и термины: экологические хемомедиаторы, экологические хеморегуляторы (некоторые химические вещества, вырабатываемые живыми организмами, играют роль факторов переноса информации и сигналов в экосистемах; О.С.А. показал, что эти вещества могут выполнять функцию регуляторов экологически важных процессов и явлений), новую концепцию биосферы как эколого-биохимического континуума, впервые сформулировал список основных биосферных и экологических функций вторичных метаболитов. Из предисловия химика-органика, чл.-корр. АН СССР И. В. Торгова: «Становится ясным, что на стыке биохимии и экологии <...> возникает новое направление науки, важное и теоретически, и практически <...> осуществляется интенсивный научный поиск и быстрое накопление новых интересных фактов, которые нуждаются в систематизации и осмыслении. Данная книга представляет собой работу именно в этом направлении». На книгу также были опубликованы положительные рецензии в журналах «Природа», «Вестник Московского университета. Сер. 16. Биология», «Физиология и биохимия культурных растений», «Экология», «Агрехимия», «Физиология растений», «Известия АН СССР. Сер. Биологическая», «Studia Univ. Babeş-Bolyai. Biologia» (Румыния), «Экологические ведомости – Wiadomości Ecologiczne» (Польша), «Журнал общей биологии»; книга была

переведена на болгарский и польский языки.

Представляют интерес и работы О.С.А. в области теоретической экологии, где он расширил сферу использования фундаментально важной концепции биокосного вещества, выдвинутой В. И. Вернадским (Остроумов, 2013, 2019). Он предложил рассматривать, наряду с биокосным веществом, и биокосную регуляцию перемещений вещества в экосистемах. Он также сформулировал и обосновал новые модернизированные варианты определения экосистемы и биогеоценоза, отметив при этом, что они «отражают современное видение основ экологии и в своих формулировках избегают порочного круга использования других терминов, в свою очередь требующих пояснений» (Остроумов, 2003, с. 43).

О.С.А. активно работает и как преподаватель: он разработал и читает новые учебные курсы в нескольких университетах («Биохимическая экология», «Актуальные проблемы гидробиологии», «Проблемы химического загрязнения среды» в МГУ, курсы по вопросам окружающей среды в РУДН, курс «Ecological Safety» читался в ряде университетов КНР). Он разработал программу новой междисциплинарной научной дисциплины на стыке экологии, биохимии и других наук – биохимической экологии водно-пищевого рациона человека, опубликовал программы по устойчивому развитию, экологической безопасности, экологической инженерии. Для демонстрации широты его научных интересов назовем коллективную работу, в которой он принимал активное участие, – учебное пособие «Гуманитарная биология и экология» (Олескин и др., 2011) и работу по экосистемным услугам (Остроумов, Котелевцев, 2017).

Нельзя не отметить и подвижническую деятельность О.С.А.: с 1999 г. он бессменный председатель оргкомитета ежегодных международных конференций под общим названием «Экосистемы, организмы, инновации», в которых принимает участие много молодых естествоиспытателей; организатор издания серии сборников «Ecological Studies, Hazards, Solutions» (издаются с 2000 г., вышло уже 30 выпусков); в последние годы он активно участвует в работе Московского общества испытателей природы (секция гидробиологии и ихтиологии). Кроме того, О.С.А. активный член редколлегий и редсоветов ряда отечественных и зарубежных изданий. Среди них можно отметить следу-

ющие: «Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии», серия книг под общим названием «Ecological Studies, Hazards, Solution»; журналы «Экологическая химия», «Вода: технология и экология», «Internat. J. Oceans and Oceanography» (Индия), «Internat. J. Phytoremediation» (США), «Ekologia» (Литва), журнала «Hydrobiologia» (Нидерланды); журнала «Экология окружающей среды» (Украина) и др.

Работы О.С.А. отмечены дипломами и премиями, он избран членом нескольких общественных академий (Российской академии естественных наук, Академии проблем водохозяйственных наук, Международной академии авторов научных открытий и изобретений, Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, ассоциированной с ООН). Он член Научного совета РАН по гидробиологии и ихтиологии, Гидробиологического общества, Московского общества испытателей природы, Международной ассоциации теоретической и прикладной лимнологии и других международных научных обществ; О.С.А. – председатель московского отделения Междуна-

родного союза экологической этики (ISEE) и почетный член этого общества; член международной комиссии по выдвижению кандидатов на почетное звание «Водный эколог года».

Наше заочное знакомство получило очное продолжение. Мы неоднократно встречались в Москве, на годовых собраниях РАН, разного рода конференциях и пр. О.С.А. посещал и наш Институт экологии (в качестве оппонента на защите диссертаций) и принимал активное участие в проводимой в Самаре (на базе Самарского государственного экономического университета) и Тольятти международной конференции «Размышления натуралиста. Академические чтения, посвященные 150-летию со дня рождения академика Владимира Ивановича Вернадского» (март, 2013 г.). И всегда он оставался вдумчивым, доброжелательным и приятным лектором и собеседником.

От всей души поздравляем с юбилеем доктора биологических наук Сергея Андреевича Остроумова, желаем ему здоровья, новых творческих удач, успешного продолжения его служения делу науки и образования.

Библиография

- Олескин А. В., Карташева Е. Р., Ботвинко И. В., Остроумов С. А., Лукьянов А. С., Шульга Е. Н. Гуманитарная биология и экология: Учебно-методическое пособие для средней общеобразовательной школы, лицеев, колледжей, университетов / Под ред. проф. А. В. Олескина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 96 с.
- Остроумов С. А. Введение в биохимическую экологию. М.: Изд-во МГУ, 1986. 176 с.
- Остроумов С. А. Концепции экологии «экосистема», «биогеоценоз», «границы экосистем»: поиск новых определений // Вестник Московского университета. Сер. 16: Биология. 2003. № 3. С. 43–50.
- Остроумов С. А. Новое в современном развитии некоторых идей В. И. Вернадского и экологические аспекты использования природных ресурсов // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2013. № 3. С. 65–74.
- Остроумов С. А. Дополнения к некоторым концепциям, содержащимся в работах В. И. Вернадского о биосфере // Экологическая химия. 2019. Т. 28, № 5. С. 287–290.
- Остроумов С. А., Котелевцев С. В. Анализ концепции «услуги экосистем», «устойчивое развитие» // Изучение биосферы и окружающей среды. М.: МАКС Пресс, 2017. С. 113–117. (Сер.: Ecological Studies, Hazards, Solutions. Vol. 24).
- Розенберг Г. С., Саксонов С. В. Сергей Андреевич Остроумов (к 60-летию со дня рождения) // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2010. Т. 19, № 2 (32). С. 189–195.
- Розенберг Г. С., Саксонов С. В. Сергей Андреевич Остроумов (к 70-летию со дня рождения) // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2019. Т. 28, № 3. С. 270–273.
- Яблоков А. В., Остроумов С. А. Охрана живой природы: проблемы и перспективы. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 268 с.
- Toderas I. K., Kriksunov E. A., Rozenberg G. S., Ermakov V. V. Scientific activity of S. A. Ostroumov, Doctor in Biology // Buletinul Academiei de Stiinte a Moldovei. Stiintele Vietii (Известия Академии наук Молдовы. Науки о жизни). 2009. № 1 (307). P. 180–184.