научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

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

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

http://ecopri/ru

№ 1 (55). Март, 2025

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. Gugołek
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

12+

© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

Содержание № 1. 2025

От редакции

	И вновь...	3

Оригинальные исследования

Афонин А. А., Ляпунова Е. Р., Комарова Л. Н.	***Подбор оптимальной питательной среды для культивирования микроводоросли Chlorella kessleri ВКПМ AI-11 ARW в лабораторных условиях***	4 – 15
Носова М. В., Середина В. П., Стовбуник С. А.	***Геохимическая оценка распределения подвижных форм тяжелых металлов в нефтезагрязненных аллювиальных почвах среднетаежной подзоны Западной Сибири***	16 – 28
Равкин Ю. С., Цыбулин С. М., Чеснокова С. В., Лялина М. И.	***Пространственно-временная неоднородность населения земноводных Западной Сибири***	29 – 48
Ракитин Т. Д..	***Изменчивость температуры поверхностных слоев в береговой зоне северо-западной части Японского моря***	49 – 65
Романова Е. Б., Плотникова В. Д., Горелов Р. А., Бакиев А. Г.	***Оценка функциональной активности иммунных реакций и индексов органов озерных лягушек, Pelophylax ridibundus (Amphibia: Ranidae), зараженных гемопаразитами***	66 – 77
Эйхвальд К. А., Баженова О. П.	***Фитопланктон как показатель экологического состояния реки Маны (Красноярский край)***	78 – 87

Методы экологических исследований

Аннаниязов К. О., Худайназаров С. А.	***Библиотека спектральных характеристик растительности на территории Туркменистана***	88 – 93

Рецензия

Илюха В. А..	***А. М. Макаров «Общая биология. Происхождение жизни, доклеточные и клеточные формы»***	94 – 96

Синопсис

Макаров А. М.	***Происхождение***	97 – 99

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

Выпуск № 1

От редакции

И ВНОВЬ...

Уважаемые читатели, авторы и рецензенты!

Хочется в который раз обратить внимание авторов на тематику нашего журнала – это в основном биологическая экология. В центре внимания таких исследований должны находиться взаимоотношения между организмами и средой, различного рода воздействия на биоту и ее реакции на них. К сожалению, в прошедшем году пришлось отклонить четыре рукописи, не соответствующие этой направленности. Жалко обманывать (пусть и необоснованные) ожидания авторов и их усилия по оформлению статьи на нашем сайте. Интересно отметить появление очередной рецензии, ведь публикации этого жанра нам предлагают весьма редко, хотя именно они позволяют составить более полноценное впечатление от рассматриваемой работы. Тем более интересно сравнить ее с авторским синопсисом, представленным в этом же выпуске.

В качестве анонса. Мы планируем скорый выход внеочередного (пятого) выпуска, который будет содержать написанный в 1934 г. отчет Г. Н. Лихачёва, посвященный промыслу изюбря. Работа ранее не публиковалась; она представляет не только исторический интерес, но содержит уникальную информацию по биологии и методам учета этого вида.

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

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 574.22, 574.6, 57.083.13

ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛИ *CHLORELLA KESSLERI* ВКПМ AI-11 ARW В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

АФОНИН
Алексей Алексеевич

Обнинский институт атомной энергетики — филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 249039, Калужская область, городской округ «Город Обнинск», г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1, afoninalekse@yandex.ru

ЛЯПУНОВА
Елена Романовна

кандидат биологических наук, Обнинский институт атомной энергетики — филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 249039, Калужская область, городской округ «Город Обнинск», г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1, lyapunovae@gmail.com

КОМАРОВА
Людмила Николаевна

доктор биологических наук, Обнинский институт атомной энергетики — филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 249039, Калужская область, городской округ «Город Обнинск», г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1, komarova_l411@mail.ru

Ключевые слова:
протококковые водоросли
хлорелла
питательная среда
штамм
фитопланктон
альголизация
культивирование
среда Тамия

Аннотация: Проведен подбор оптимальной питательной среды для культивирования микроводоросли *Chlorella kessleri* в лабораторных условиях. Согласно патентной информации, для выращивания микроводоросли *C. kessler*i штамма ВКПМ AI-11 ARW (РФ, НПО «Алгобиотехнология») необходимо использовать комплексную питательную среду, состоящую из растворов четырех составов химических реактивов и фугата послеспиртовой барды. Результаты выращивания водоросли на предлагаемой среде продемонстрировали хорошие показатели роста с минимальными сроками для достижения оптимальной оптической плотности (5 суток) и выхода на экспоненциальную фазу (3 суток). Исходя из полученных в ходе исследования данных, наиболее подходящей для культивирования в лаборатории, с учетом практических аспектов, таких как простота и стоимость, оптимальной будет среда Тамия в концентрации 30 % без дополнительного внесения в нее микроэлементов, при культивировании на которой были получены аналогичные результаты: время до достижения оптимальной оптической плотности составило 5 суток, а время выхода на экспоненциальную фазу – 3 суток.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 10 марта 2025 **Подписана к печати**: 02 апреля 2025

Введение

Микроводоросль хлорелла – удобный объект биологического мониторинга состояния природных экологических систем, поскольку имеет широкий ареал распространения и присутствует как в водоемах, так и на почвах. Благодаря этому она стала объектом массового культивирования для применения в самых разных направлениях. С использованием хлореллы была получена информация о мутагенных и летальных эффектах высоких доз внешнего облучения, продуктов ядерного деления ^{235}U разного возраста, ^{232}Th, неорганических и органических соединений в модельных растворах, компонентов природных и промышленных вод (Шевченко и др., 1969; Векшина и др., 1970; Wong, 1980; Шевченко и др., 1996; Евсеева и др., 2008)

Первые теоретические и экспериментальные исследования биорегенеративных систем были проведены на водорослях рода *Chlorella*. Подробное изучение этой водоросли позволило выявить и решить ряд проблем, связанных со специфическими требованиями биологических систем жизнеобеспечения человека.

В данном исследовании использовался штамм микроводоросли *Chlorella kessleri* ВКПМ AI-11 ARW (РФ, НПО «Алгобиотехнология»). 15 января 2022 г. вступил в силу ГОСТ Р 59977-2022, содержащий технологию биологической реабилитации водных объектов данным штаммом хлореллы.

Применение эталонной питательной среды для выращивания данного штамма, представленной в патенте № RU2585523C1, приводит к высоким результатам роста водорослей, однако ее приготовление в малых объемах требует значительных усилий и точных дозировок, что увеличивает время и сложность процесса (Богданов, 2016). По сравнению с оригинальным составом, среда Тамия характеризуется более простой методикой приготовления, что делает ее более удобной для лабораторного применения. Сама по себе среда Тамия – это стандартная культуральная среда для выращивания протококковых водорослей, таких как хлорелла. Эта среда была разработана для стабильного и эффективного культивирования водорослей в лабораторных условиях. Она используется для различных исследований в области микробиологии и биотехнологии, обеспечивая оптимальные условия для роста и развития водорослей (Зайцев и др., 2022; Полынов и др., 2024; Tulegenova et al., 2020). Среда Тамия отличается простой методикой приготовления, что способствует снижению экономических затрат и ускорению получения воспроизводимых результатов. Данная среда широко используется в научных исследованиях, что обеспечивает возможность сравнения результатов, полученных на данном штамме, с данными других работ без учета влияния различий в составе питательных сред. Это упрощает задачу стандартизации экспериментов и способствует более объективному сопоставлению данных.

Таким образом, цель данного исследования – оценить эффективность применения среды Тамия для выращивания штамма микроводоросли *C. kessleri* ВКПМ AI-11 ARW в лабораторных условиях с целью упрощения процесса культивирования и обеспечения стандартизации экспериментов.

Материалы

C. kessleri ВКПМ AI-11 ARW – штамм микроводоросли, способный активно продуцировать биомассу, получен в результате селекции штамма водорослей *Parachlorella nurekis* 1904 KIEG и *Chlorella vulgaris* BIN (Богданов, 2014, 2016). Штамм обладает планктонными свойствами, т. е. находится во взвешенном состоянии и свободно парит в водной толще, а также равномерно распределяется в культуральной среде благодаря тому, что клетки несут на себе отрицательный заряд (Богданов, 2016).

Антагонистические свойства штамма проявляются при наборе культурой оптической плотности 0.85 ед., при этом наступает лизис прочей альгофлоры, гибель бактерий, грибов и дрожжей. Штамм строго соблюдает условия монокультуры по отношению к прочим водорослям и обладает невосприимчивостью к фагам (Богданов, 2016).

«Предшественник» данного штамма водорослей, *P. nurekis* 1904 KIEG, неоднократно использовался для альголизации водоема-охладителя – Белоярского водохранилища (4200 га) Белоярской атомной станцией. Другие предприятия также часто пользовались данным штаммом, например, ОАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» в период с 2013 по 2019 г. ежегодно альголизировало хлореллой Нижнетагильский

городской пруд (780 га), пруд на реке Вязовка (3.5 га) и Леневское водохранилище (2300 га). По данным компании-производителя, в 2011 г. было предотвращено цветение водоемов общей площадью 22344.5 га (Список предприятий…, 2025).

Штамм *C. kessleri*, согласно патентной информации, в лабораторных условиях растет на комплексной питательной среде, состоящей из растворов четырех составов химических реактивов на один литр водопроводной воды и фугата послеспиртовой барды, причем последний вводится в питательную среду до получения уровня pH не ниже 7.0. Штамм не требует подачи углекислого газа и барботирования культуры воздухом (Богданов, 2016).

Составы питательной среды, согласно патенту:

- состав № 1: азотно-фосфорный – 0.30 мл;
- состав № 2: железисто-натриевый – 0.15 мл;
- состав № 3: медно-кобальтовый – 0.15 мл;
- состав № 4: сернокислого калия – 0.33 мл.

Методы

В ходе работы были приготовлены различные варианты среды, в т. ч. стандартная для протококковых водорослей среда Тамия, и были опробованы различные комбинации сред для поиска наиболее оптимального варианта.

Состав среды Тамия с концентрацией 100 % указан в табл. 1 (Ляпунова, 2015).

Таблица 1. Состав среды Тамия

Компоненты среды	Масса, г/л
KNO_3	5
$MgSO_4$	2.5
KH_2PO_4 x $3H_2O$	1.25
$FeC_6H_5O_7$	0.003

Для возможности параллельного культивирования сразу на нескольких средах был использован многокюветный культиватор водорослей КВМ-05. Данный культиватор способен поддерживать температуру культивирования водоросли в диапазоне от 25 до 40 °C, точность поддержания температуры при этом составляет ±1 °C. Постоянная температура поддерживается автоматическим включением и выключением встроенного вентилятора по команде блока термостабилизации прибора. Исходя из патентной информации и технических возможностей культиватора, температура культивирования составляла 28 ± 1 °C.

Углекислотное насыщение фотосинтеза наблюдается при концентрации его в растворах в пределах 0.01–0.027 %. Следовательно, 0.03%-ное количество углекислоты в воздухе вполне достаточно для обеспечения питания водорослей (Музафаров и др., 1972).

В процессе культивирования суспензия водоросли облучается светом лампы накаливания 40 Вт, 220 В. Режим освещенности составлял 12 часов в сутки, что обеспечивалось с помощью реле, автоматически срабатывающего по времени, с погрешностью отсчета не более 2 с/сут.

Для исследования были приготовлены:

1. Среда Тамия в различных концентрациях (15, 30, 50, 65 и 80 %) без добавления дополнительных растворов микроэлементов;
2. Среда Тамия в различных концентрациях (15, 30, 50, 65 и 80 %) с добавлением дополнительных растворов микроэлементов;
3. Культуральная среда, указанная в патенте;
4. Комбинации патентной культуральной среды и среды Тамия (1:1, 2:1, 3:1).

Дополнительные растворы микроэлементов состоят из двух частей, состав которых приведен в табл. 2.

Различные концентрации питательной среды получены путем разбавления исходного 100 % раствора питательной среды Тамия дистиллированной водой. В вариантах питательной среды с добавлением микроэлементов их внесение осуществлялось из расчета 0.5 мл каждого раствора на 1 л среды (Ляпунова, 2015).

Засев водоросли производился с начальной плотностью 0.20 единицы оптической плотности. После засева на среду проводилось ежедневное наблюдение динамики на-

Таблица 2. Состав дополнительных растворов микроэлементов

Компоненты среды	Масса, мг/л
Раствор 1	
H_3BO_3	2.86
$MnCl_2 \times 4H_2O$	1.81
$ZnSO_4 \times 7H_2O$	0.222
Раствор 2	
MoO_3	17.64
NH_4VO	22.96

растания культуры. Наращивание культуры проводилось в течение 14 дней. Значение оптической плотности ежедневно регистрировалось в процессе культивирования измерителем плотности суспензии ИПС-03 в течение двух недель.

Согласно основному закону светопоглощения, существует прямопропорциональная зависимость между оптической плотностью и концентрацией растворенного вещества в растворе. Подобная связь наблюдается и между оптической плотностью и числом клеток в водорослевой суспензии. Таким образом, величина оптической плотности позволяет оперативно и с высокой точностью оценивать изменения в численности клеток на протяжении роста водорослевой культуры.

В работе были исследованы:

- динамика нарастания культуры;
- удельная скорость роста;
- время достижения максимальной оптической плотности (ОП), принятой за 1.45 ед., при первоначальном внесении культуры в среду;
- время выхода на экспоненциальную фазу роста;
- время достижения максимальной оптической плотности (ОП) при пересеве культуры в фазу экспоненциального роста.

Определение удельной скорости роста (1) позволяет оценить, насколько эффективно культура микроорганизмов, в частности водорослей, использует ресурсы среды. При измерении удельной скорости роста с использованием оптической плотности в водных культурах водорослей удельная скорость роста будет характеризовать, как быстро меняется оптическая плотность (косвенно, количество клеток) в единицу времени. Наиболее эффективно рассчитывать удельную скорость роста в экспоненциальной фазе, когда организм активно делится и скорость роста зависит от доступных ресурсов. Для расчета достаточно любых двух экспериментальных точек:

$$\mu = (\ln(D_2) - \ln(D_1)) / (t_2 - t_1) \quad (1),$$

где μ – удельная скорость роста (сут$^{-1}$); ln (D_1) – натуральный логарифм оптической плотности в момент времени t_1; ln (D_2) – натуральный логарифм оптической плотности в момент времени t_2; t_1 и t_2 – моменты времени, на которых проводятся замеры.

Обработка полученной информации осуществлялась с использованием пакета приложений Microsoft Excel 2016. Оценки средних и доверительных интервалов проводили стандартными методами математической статистики. На диаграммах представлены средние значения и стандартные ошибки.

Результаты

Согласно полученным результатам по динамике роста микроводоросли *C. kessleri* на питательной среде Тамия различных концентраций без внесения дополнительных микроэлементов (рис. 1), наилучший вариант для культивирования водоросли – концентрация среды Тамия в 30 %. При концентрации в 15 % переходная фаза занимает на одни сутки больше, что может быть вызвано недостатком питательных веществ, из-за чего клетки водоросли имеют более низкую активность и им необходимо больше времени для усвоения ресурсов и активации ферментов для повышения метаболических процессов и начала активного деления. Низкая концентрация таких питательных веществ, как азот и углерод, необходимые для синтеза белков и углеводов, а также фосфор, необходимый для синтеза нуклеотидов, не дает клеткам возможности быстро начать деление с высокой скоростью. Таким образом, переход из лаг-фазы в фазу экспоненциального роста замедляется.

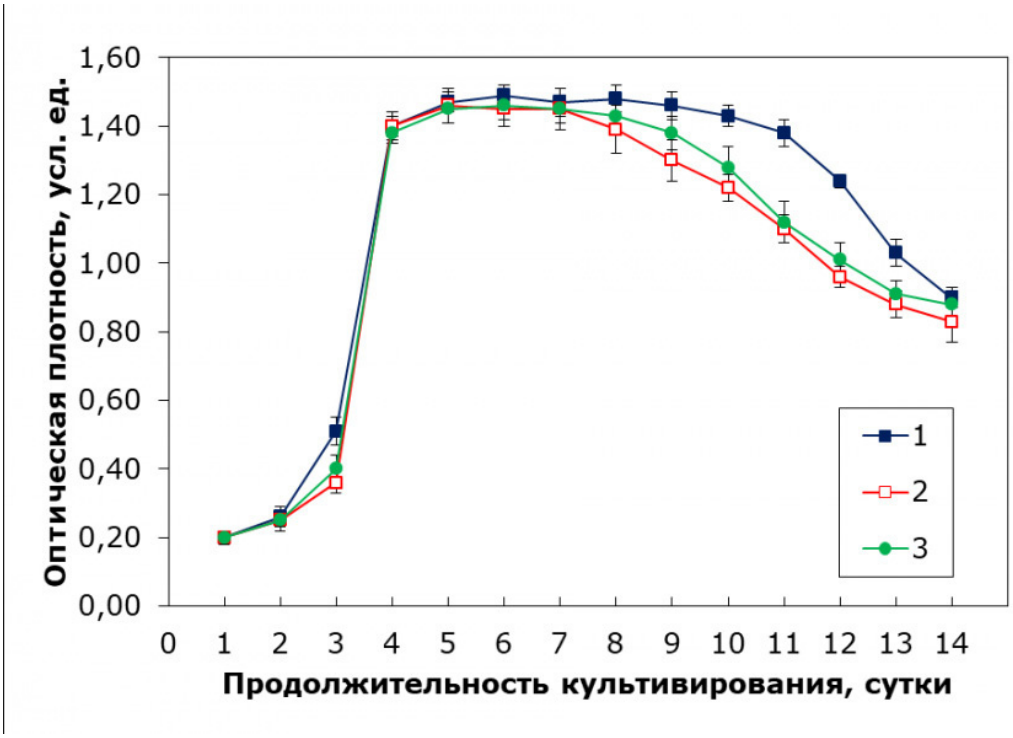


Рис. 1. Кривые роста C. kessleri в зависимости от используемой концентрации среды Тамия (без внесения дополнительных микроэлементов): 1 – среда Тамия с концентрацией 15 %, 2 – среда Тамия с концентрацией 30 %, 3 – среда Тамия с концентрацией 50 %, 4 – среда Тамия с концентрацией 65 %

Fig. 1. Growth curves of C. kessleri depending on the concentration of Tamya medium used (without additional trace elements): 1 – Tamiya medium with a concentration of 15 %, 2 – Tamiya medium with a concentration of 30 %, 3 – Tamiya medium with a concentration of 50 %, 4 – Tamiya medium with a concentration of 65 %

При больших концентрациях увеличивается непосредственно лаг-фаза, что особенно хорошо заметно при концентрации среды Тамия в 65 %. Это может быть связано с несколькими факторами, такими как токсичность продуктов метаболизма, осмотический стресс и нарушение осморегуляции из-за избыточных концентраций некоторых ионов (например, фосфор и/или магний).

Обобщенные результаты по выходу на фазу экспоненциального роста и достижения оптической плотности в 1.45 ед. приведены в табл. 3.

Таблица 3. Рост водорослей при различных концентрациях среды Тамия без внесения в среду дополнительных микроэлементов

	Среда Тамия без микроэлементов				
	0.15	0.3	0.5	0.65	0.8
Время достижения ОП 1.45 ед. при полном жизненном цикле, сут	9	5	6	11	-
Время, необходимое для выхода на фазу экспоненциального роста, сут	5	3	4	8	-
Время достижения ОП 1.45 ед. при пересеве в экспоненциальную фазу, сут	4	3	4	6	-

При 15 % концентрации время достижения оптимальной оптической плотности составило 9 суток, а выход на экспоненциальную фазу занял 5 суток, что указывает на замедленный рост культуры. Наилучшие результаты были получены при 30 % концентрации среды, где время до достижения ОП уменьшилось до 5 суток, а время выхода на экспоненциальную фазу составило 3 суток. При повышении концентрации до 50 % рост микроводоросли также улучшался, однако наблюдалось замедление роста в фазах выхода на экспоненциальную фазу и пересева. Высокие концентрации (65 % и 80 %) привели к значительному ухудшению результатов, при 80 % концентрации среды Тамия клетки

водорослей практически не выживали. Таким образом, оптимальными для культивации являются концентрации среды Тамия в пределах 30–50 %. Удельная скорость в фазе экспоненциального роста составила 0.86 сут$^{-1}$ для концентрации 30 % и 0.65 сут$^{-1}$ для концентрации 50 %.

При использовании питательной среды Тамия с внесением дополнительных микроэлементов (рис. 2) можно увидеть более продолжительное нахождение культуры в стационарной фазе для всех концентраций среды, однако общая зависимость остается схожей.

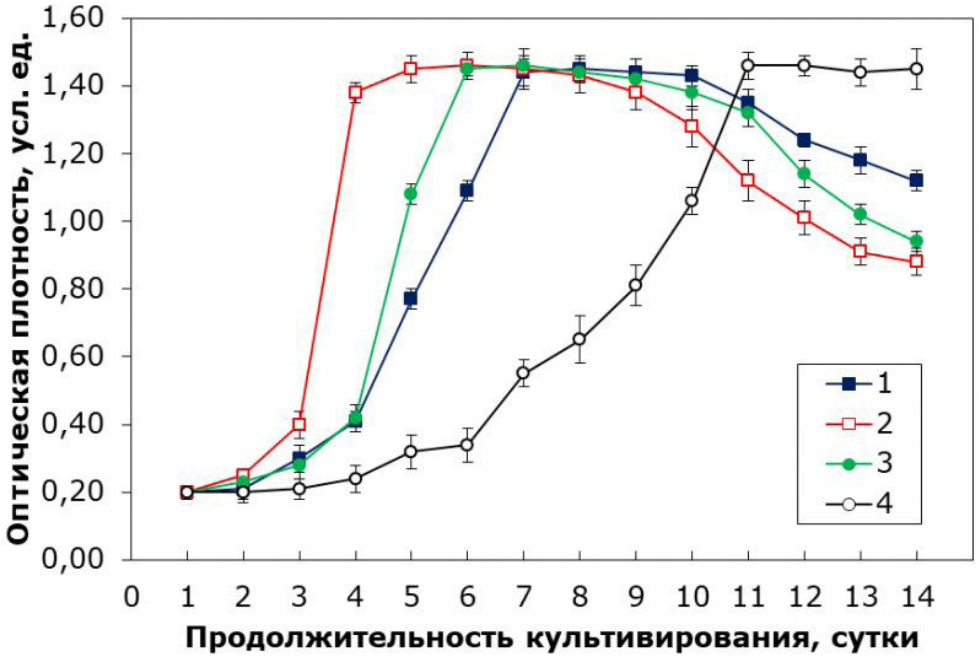


Рис. 2. Кривые роста *C. kessleri* в зависимости от используемой концентрации среды Тамия (с внесением дополнительных микроэлементов): 1 – среда Тамия с концентрацией 15 %, 2 – среда Тамия с концентрацией 30 %, 3 – среда Тамия с концентрацией 50 %, 4 – среда Тамия с концентрацией 65 %

Fig. 1. Growth curves of *C. kessleri* depending on the concentration of Tamiya medium used (with additional trace elements): 1 – Tamiya medium with a concentration of 15 %, 2 – Tamiya medium with a concentration of 30 %, 3 – Tamiya medium with a concentration of 50 %, 4 – Tamiya medium with a concentration of 65 %

Из приведенных в табл. 4 данных, где к среде Тамия в тех же концентрациях дополнительно добавляли растворы микроэлементов, видно, что время достижения оптимальной оптической плотности при концентрации среды 15 % составило 7 суток, время выхода на экспоненциальную фазу – 4 суток, а при пересеве – 3 суток. При 30 % концентрации результаты улучшились (5, 3 и 3 суток соответственно). При 50 % концентрации время до ОП увеличилось до 6 суток, но остальные параметры остались на уровне 4 суток. При 65 % наблюдается замедление роста (11 суток для достижения ОП и 7 суток для выхода на экспоненциальную фазу). При 80 % концентрации среды клетки водоросли не выжили. Таким образом, добавление микроэлементов улучшает рост при всех изученных концентрациях, но при слишком высоких концентрациях (80 %) происходит гибель клеток. Оптимальными вариантами вновь оказались концентрации среды Тамия 30–50 %. Удельная скорость роста для концентрации среды Тамия 30 % составила 0.85 сут$^{-1}$, для 50 % – 0.62 сут$^{-1}$.

В результате сравнения применения культуральной среды из патента и ее комбинаций со средой Тамия были получены следующие результаты (рис. 3).

Таблица 4. Рост водорослей при различных концентрациях среды Тамия с внесением в среду дополнительных микроэлементов

	Среда Тамия с микроэлементами (%)				
	15	30	50	65	80
Время достижения ОП 1.45 ед. при полном жизненном цикле, сут	7	5	6	11	-
Время, необходимое для выхода на фазу экспоненциального роста, сут	4	3	4	7	-
Время достижения ОП 1.45 ед. при пересеве в экспоненциальную фазу, сут	3	3	4	6	-

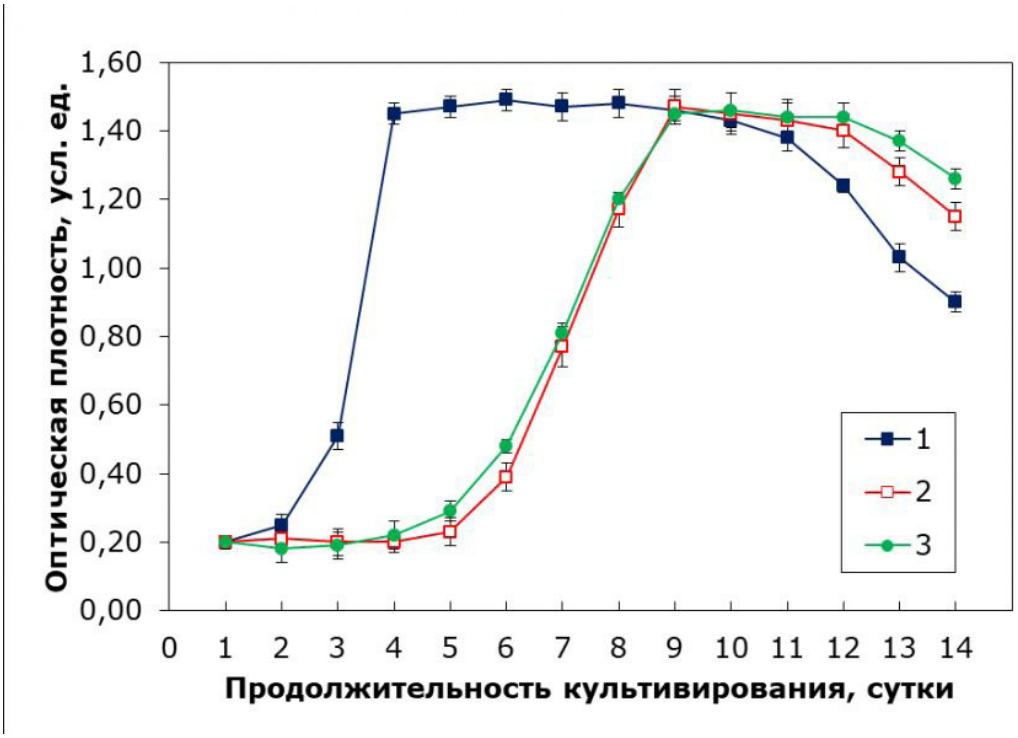


Рис. 3. Кривые роста *C. kessleri* при культивировании на эталонной питательной среде и ее комбинациях со средой Тамия в различных соотношениях: 1 – питательная среда из патента, 2 – комбинация среды Тамия и патентной среды в соотношении 2:1, 3 – комбинация среды Тамия и патентной среды в соотношении 3:1

Fig. 3. Growth curves of *C. kessleri* when cultivated on a reference nutrient medium and its combinations with Tamiya medium in various ratios: 1 – the nutrient medium from the patent, 2 – a combination of Tamiya medium and patent medium in a ratio of 2:1, 3 – a combination of Tamiya medium and patent medium in a ratio of 3:1

При использовании питательной среды, указанной в патенте, кривая роста ожидаемо показывает хорошие результаты по выходу из лаг-фазы, росту культуры и времени нахождения в стационарной фазе, а удельная скорость роста в экспоненциальной фазе равна 0.88 сут$^{-1}$. Комбинация питательной среды Тамия и патентной питательной среды в соотношении 1:1 привела к гибели культуры, а в соотношениях 2:1 и 3:1 можно было увидеть продолжительную лаг-фазу и довольно короткую стационарную фазу. Данные эффекты можно объяснить измененным соотношением макроэлементов, например азота, фосфора и калия, из-за чего клеткам необходимо переключаться на другой механизм потребления транспортных веществ, также избыток отдельных элементов, таких как фосфаты, может быть токсичными. Комбинирование двух сред увеличивает концентрацию солей в растворе, что может вызывать осмотический стресс и/или дегидратацию, и клеткам необходимо длительное время для адаптации. Токсичные метаболиты, например аммиак, органические кислоты, кислородные радикалы и др., которые токсичны сами по себе, также могут взаимодействовать с различными компо-

нентами питательной среды, создавая тем самым дополнительные стрессовые условия.

В табл. 5 приведены обобщенные результаты по культивированию хлореллы на культуральной среде, указанной в патенте, и различных ее комбинациях со средой Тамия.

Таблица 5. Рост водорослей при культивировании на культуральной среде, указанной в патенте, и различных ее комбинациях со средой Тамия

	Культуральная среда, указанная в патенте	Комбинация сред		
		1:1	2:1	3:1
Время достижения ОП 1.45 ед. при полном жизненном цикле, сут	5	-	9	9
Время, необходимое для выхода на фазу экспоненциального роста, сут	3	-	7	6
Время достижения ОП 1.45 ед. при пересеве в экспоненциальную фазу, сут	3	-	6	5

Для среды из патента время достижения оптимальной оптической плотности составило 5 суток, выход на экспоненциальную фазу – 3 суток, а при пересеве – 3 суток. Для комбинации 1:1 результаты не были получены, т. к. культура погибла. При комбинациях 2:1 и 3:1 время до ОП составило 9 суток, что свидетельствует о замедлении роста по сравнению с эталонной средой, но остальные параметры (выход на экспоненциальную фазу и пересев) оставались в пределах 6–7 суток. Таким образом, комбинации среды из патента со средой Тамия показали ухудшение роста, особенно при соотношении 1:1. На рис. 4 отображены кривые роста, показавшие лучшие результаты при культивировании.

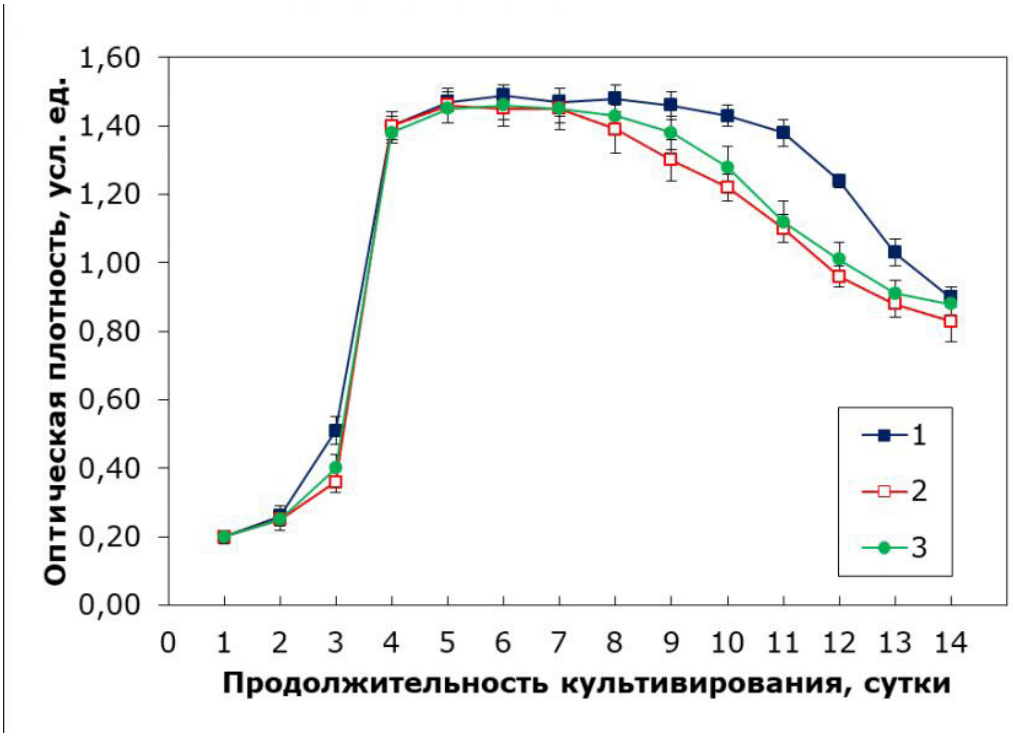


Рис. 4. Наилучшие кривые роста *C. kessleri* при культивировании на различных вариантах среды: 1 – питательная среда из патента, 2 – среда Тамия с концентрацией 30 % (без внесения дополнительных микроэлементов), 3 – среда Тамия с концентрацией 30 % (с внесением дополнительных микроэлементов)

Fig. 4. The best growth curves of *C. kessleri* when cultivated on various media variants: 1 – nutrient medium from the patent, 2 – Tamiya medium with a concentration of 30 % (without additional trace elements), 3 – Tamiya medium with a concentration of 30 % (with additional trace elements)

Кривая 1 на рис. 4 представляет эталонный вариант, который демонстрирует наилучшие результаты среди исследованных условий. На ней наблюдается более выраженный переход от лаг-фазы к фазе роста, что свидетельствует о быстром приспособлении культуры к новой среде и эффективном начале роста. Кроме того, эта среда обеспечивает более длительное нахождение культуры в стационарной фазе, что является индикатором стабильности метаболической активности клеток в условиях насыщения питательными веществами.

Кривые 2 и 3, хотя и имеют некоторые показатели, уступающие эталонному варианту, в целом не демонстрируют существенных отличий по сравнению с ним. Удельные скорости роста не имеют явно выраженных различий: 0.88 сут$^{-1}$ для кривой 1, 0.86 сут$^{-1}$ для кривой 2 и 0.85 сут$^{-1}$ для кривой 3. Основными отличиями являются замедленный переход от лаг-фазы к фазе роста, а также сокращенная продолжительность стационарной фазы. Однако эти различия не оказывают значительного влияния на общую динамику при регулярном пересеивании культуры в фазе роста.

Заключение

В ходе данного исследования была проведена оценка различных вариантов культуральных сред для культивирования *C. kessleri* в лабораторных условиях. Результаты культивирования микроводоросли на среде из патента продемонстрировали хорошие показатели роста водорослей с минимальными сроками для достижения оптимальной оптической плотности и выхода на экспоненциальную фазу. Исходя из полученных данных, наиболее подходящими для культивирования в лаборатории являются среды на основе использования среды Тамия при концентрации 30 %, как с добавлением микроэлементов, так и без. Однако с учетом практических аспектов, таких как простота и стоимость, оптимальным выбором будет среда Тамия в концентрации 30 % без дополнительного внесения в нее микроэлементов. Это сочетание обеспечивает хороший баланс между эффективностью роста и затратами.

Библиография

ГОСТ Р 59977-2022. Биологическая безопасность. Обезвреживание и утилизация биологических и органических материалов. Общие технические условия . М.: Российский институт стандартизации, 2022. 11 с.

Богданов Н. И. Планктонный штамм *Chlorella kessleri* для предотвращения «цветения» водоемов синезелеными водорослями : Патент № RU2585523C1. 2016. 6 с.

Богданов Н. И. Планктонный штамм водорослей *Parachlorella nurekis* и его применение для уничтожения цианобактерий : Патент № RU2527895C2. 2014. 10 с.

Векшина Л. И., Коган И. Г., Кудряшов Е. И., Маренный А. Н., Пятышев Д. Р., Сакович И. С., Шевченко В. А. Относительная биологическая эффективность многозарядных ионов при однократном облучении хлореллы // Космическая биология и медицина. 1970. Т. 5. С. 39–42.

Евсеева Т. И., Майстренко Т. А., Гераськин С. А., Белых Е. С. Механизмы действия ^{232}Th и Ce(III) на *Chlorella vulgaris* Beijer. Оценка вклада радиационного воздействия ^{232}Th в индуцируемый эффект // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48. С. 370–377.

Зайцев В. В., Петряков В. В., Зайцева Л. М., Махимова Ж. Н. Влияние питательной среды на морфологические особенности и жизнеспособность клеток микроводоросли *Chlorella vulgaris* Beijer // Самарский научный вестник. 2022. Т. 11, № 2. С. 52–56.

Ляпунова Е. Р. Относительная биологическая эффективность альфа-облучения хлореллы при различных условиях культивирования клеток : Дис. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2015. 103 с.

Музафаров А. М., Таубаев Т. Т., Якубов Х. Ф. Массовое культивирование протококовых водорослей в установках под открытым небом // Культивирование водорослей и высших водных растений в Узбекистане. Ташкент: ФАН УзССР, 1972. 133 с.

Полынов В. А., Максимова Е. Н., Богданов А. В., Цырендылыкова Л. Б. Оценка чувствительности стандартизированных альгобиотестов на основе зеленых водорослей к действию «модельного» токсиканта // Вода: химия и экология. 2024. № 4. С. 70–79.

Список предприятий и организаций, водоемы которых альголизировало ООО НПО «Альгобиотехнология» . URL: http://www.algobiotehnologia.com/shop/?gid=5 (дата обращения: 24.03.2025).

Шевченко В. А., Визгин В. П., Алексеенок А. Я. О мутационном процессе в популяциях одноклеточных водорослей при остром и хроническом облучении ионизирующей радиацией // Генетика. 1969. № 9 (5). С. 61–73.

Шевченко В. А., Абрамов В. И., Кальченко В. А., Федотов И. С., Рубанович А. В. Генетические последствия для популяций растений радиоактивного загрязнения окружающей среды в связи с Чернобыльской аварией // Радиационная биология. Радиоэкология. 1996. Т. 36. С. 531–545.

Tulegenova S. E., Beisenova R. R., Auelbekova A. K. The sensitivity of algae to the effect of antifungal drugs // Bulletin of the Karaganda University. Series Biology. Medicine. Geography. 2020. Vol. 97, № 1. P. 90–95.

Wong M. H. Effects of cobalt and zinc to Chlorella pyrenoidosa in soft and hard water // Microbiosis. 1980. Vol. 28. P. 19–25.

SELECTION OF THE OPTIMAL NUTRIENT MEDIUM FOR CULTIVATION OF MICROALGAE *CHLORELLA KESSLERI* VKPM AI-11 ARW IN LABORATORY CONDITIONS

AFONIN Aleksei Alekseevich — *Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, 249039, Russia, Kaluga Region, Obninsk Urban District, Obninsk City, Student Campus Area, 1st building, afoninalekse@yandex.ru*

LYAPUNOVA Elena Romanovna — *Ph.D., Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, 249039, Russia, Kaluga Region, Obninsk Urban District, Obninsk City, Student Campus Area, 1st building, lyapunovae@gmail.com*

KOMOROVA Ludmila Nikolaevna — *D.Sc., Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, 249039, Russia, Kaluga Region, Obninsk Urban District, Obninsk City, Student Campus Area, 1st building, komarova_l411@mail.ru*

Keywords:
protococcal algae
chlorella
nutrient medium
strain
phytoplankton
algalazation
cultivation
Tamiya medium

Summary: We carried out the selection of the optimal nutrient medium for the cultivation of microalgae *Chlorella kessleri* in laboratory conditions. According to the patent information, to grow C. kessleri microalgae of the VKPM AI-11 ARW strain (Russian Federation, NPO Algobiotechnology), it is necessary to use a complex nutrient medium consisting of solutions of four chemical reagents and a centrate of distillery stillage. The results of algae culturing on the proposed medium demonstrated good growth rate with minimal time to achieve optimal optical density (5 days) and enter the exponential phase (3 days). Based on the data obtained during the study, the Tamiya medium at a concentration of 30% without additional application of trace elements will be the most suitable for cultivation in the laboratory and optimal one, taking into account practical aspects such as simplicity and cost. Similar results were obtained during cultivation on this medium: the time to achieve optimal optical density was 5 days, and the time to enter the exponential phase was 3 days.

Received on: 10 March 2025 **Published on:** 02 April 2025

References

Biological safety. Neutralization and disposal of biological and organic materials. General technical conditions. M.: Rossiyskiy institut standartizacii, 2022. 11 p.

Bogdanov N. I. Plankton strain Chlorella kessleri to prevent «bloom» of blue-green algae in ponds: Patent No. RU2585523C1. 2016. 6 p.

Bogdanov N. I. Planktonic algae strain Parachlorella nurekis and its application for destruction of cyanobacteria: Patent No. RU2527895C2. 2014. 10 p.

Evseeva T. I. Maystrenko T. A. Geras'kin S. A. Belyh E. S. Mechanisms of action of 232Th and Ce(III) on Chlorella vulgaris Beijer. Assessment of the contribution of radiation exposure of 232Th to the induced effect, Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya. 2008. T. 48. P. 370–377.

List of enterprises and organizations whose reservoirs were algolized by NPO Algobiotechnology LLC. URL: http://www.algobiotehnologia.com/shop/?gid=5 (data obrascheniya: 24.03.2025).

Lyapunova E. R. Relative biological efficacy of alpha irradiation of chlorella under various cell culture conditions: Dip. ... kand. biol. nauk. Obninsk, 2015. 103 p.

Muzafarov A. M. Taubaev T. T. Yakubov H. F. Mass cultivation of protococcal algae in open-air installations, Kul'tivirovanie vodorosley i vysshih vodnyh rasteniy v Uzbekistane. Tashkent: FAN UzSSR, 1972. 133 p.

Polynov V. A. Maksimova E. N. Bogdanov A. V. Cyrendylykova L. B. Assessment of the sensitivity of standardized algobiotests based on green algae to the action of a «model» toxicant, Voda: himiya i ekologiya. 2024. No. 4. P. 70–79.

Shevchenko V. A. Abramov V. I. Kal'chenko V. A. Fedotov I. S. Rubanovich A. V. Genetic consequences

of radioactive environmental pollution for plant populations in connection with the Chernobyl accident, Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya. 1996. T. 36. P. 531–545.

Shevchenko V. A. Vizgin V. P. Alekseenok A. Ya. On the mutation process in populations of unicellular algae under acute and chronic ionizing radiation exposure, Genetika. 1969. No. 9 (5). P. 61–73.

Tulegenova S. E., Beisenova R. R., Auelbekova A. K. The sensitivity of algae to the effect of antifungal drugs, Bulletin of the Karaganda University. Series Biology. Medicine. Geography. 2020. Vol. 97, No. 1. P. 90–95.

Vekshina L. I. Kogan I. G. Kudryashov E. I. Marennyy A. N. Pyatyshev D. R. Sakovich I. S. Shevchenko V. A. Relative biological efficiency of multiply charged ions under single irradiation of chlorella, Kosmicheskaya biologiya i medicina. 1970. T. 5. P. 39–42.

Wong M. H. Effects of cobalt and zinc to Chlorella pyrenoidosa in soft and hard water, Microbiosis. 1980. Vol. 28. P. 19–25.

Zaycev V. V. Petryakov V. V. Zayceva L. M. Mahimova Zh. N. Influence of nutrient medium on morphological features and cell viability of microalgae Chlorella vulgaris Beijer, Samarskiy nauchnyy vestnik. 2022. T. 11, No. 2. P. 52–56.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК УДК 504.064

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВАХ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

НОСОВА Мария Владимировна — *кандидат биологических наук, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, Россия, г. Томск, пр. Мира, д. 72, nsmvsh@mail.ru*

СЕРЕДИНА Валентина Петровна — *доктор биологических наук, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36, seredina_v@mail.ru*

СТОВБУНИК Сергей Анатольевич — *АО «ТомскНИПИнефть», 634027, Россия, г. Томск, пр. Мира, д. 72, StovbunikSA@tomsknipi.ru*

Ключевые слова: тяжелые металлы подвижные формы нефтезагрязнение коэффициент геоаккумуляции суммарный индекс загрязнения методы рекультивации экологическое воздействие

Аннотация: В статье рассмотрено содержание подвижных форм тяжелых металлов (ТМ) в нефтезагрязненных почвах среднетаежной подзоны Западной Сибири. Исследования проводились для верхних горизонтов почв (0–20 см) в различных зонах техногенной нагрузки (эпицентр, импактная зона, граница) и на фоновых участках. Результаты анализа показали значительное превышение концентраций ТМ над предельно допустимыми значениями (ПДК), установленными СанПиН 1.2.3685–21, а также над фоновыми уровнями в нефтезагрязненных почвах. Содержание подвижных форм ТМ в зоне техногенного загрязнения уменьшается в ряду: V > Mn > Ni > Cu > Pb > Zn. В ходе работы были рассчитаны корреляционные зависимости между содержанием подвижных форм ТМ, органического углерода (Сорг) и нефтепродуктов (НП), а также определены коэффициент геоаккумуляции (Igeo) и индекс суммарного загрязнения почв (Zc). Установлено закономерное снижение значений Zc по мере удаления от эпицентра загрязнения. Все исследуемые зоны находятся в диапазоне загрязнения, требующем мониторинга и проведения мероприятий по снижению техногенной нагрузки. Элементы Zn, Mn и V демонстрируют стабильно высокие значения Igeo и Zc, что связано с их повышенной техногенной активностью. Выявленные закономерности подчеркивают необходимость разработки и реализации комплексных природоохранных мероприятий для восстановления экологического состояния загрязненных почв.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: В. И. Кулагина
Рецензент: В. В. Вапиров

Получена: 22 декабря 2024 года **Подписана к печати**: 22 марта 2025 года

Введение

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ) в сочетании с техногенным воздействием, таким как нефтезагрязнение, представляет одну из актуальных экологических проблем современности. Почвенный покров, как ключевой компонент экосистем, выполняет важные функции, включая фильтрацию, сорбцию и накопление загрязнителей, что делает его уязвимым к накоплению и перераспределению ТМ.

Тяжелые металлы, такие как свинец (Pb), цинк (Zn), медь (Cu), никель (Ni), ванадий (V) и марганец (Mn), обладают высокой устойчивостью и склонностью к длительному накоплению в почве, что усиливает их потенциальное воздействие на экосистемы. Свинец благодаря своей токсичности и низкой подвижности часто накапливается в верхних горизонтах почвы (Kabata-Pendias, Pendias, 2011). Цинк и медь, хотя и являются микроэлементами, при повышенных концентрациях проявляют токсические свойства (Alloway, 2013). Никель и ванадий, связанные с нефтяным загрязнением, выделяются способностью мигрировать и изменять химические свойства почвы (Olujimi et al., 2014). Марганец, как компонент природных процессов, проявляет зависимость от смены окислительно-восстановительных условий, характерных для нефтезагрязненных почв.

Среднетаежная подзона Западной Сибири с ее специфическими климатическими и почвенными условиями характеризуется высокой чувствительностью к техногенному воздействию. Однако в условиях данной территории исследования, направленные на изучение распределения подвижных форм ТМ в верхнем горизонте нефтезагрязненных почв, остаются недостаточно разработанными.

Цель исследования – выявить закономерности распределения подвижных форм свинца, цинка, меди, никеля, ванадия и марганца в верхнем горизонте нефтезагрязненных почв среднетаежной подзоны Западной Сибири.

Материалы

Объектом исследования послужил участок разлива нефти на территории средней тайги Западной Сибири в пределах Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО). Очаг загрязнения возник после аварийной ситуации на промысловом трубопроводе в центральной части поймы р. Оби. Нефтяное загрязнение было успешно устранено в ходе рекультивационных работ, выполненных в строгом соответствии с нормативными требованиями ГОСТ Р 59057–2020 (2020), ГОСТ Р 57447–2017 (2017), а также внутренними стандартами компании-недропользователя. По завершении работ участок прошел обязательную проверку и был принят уполномоченными представителями, подписавшими акт рекультивации.

В процессе восстановления территории были применены авторские предложения: помимо внесения минеральных удобрений, в почву добавлены цеолиты, которые эффективно снижают подвижность тяжелых металлов. На биологическом этапе рекультивации использовалась специальная нефтестойкая травосмесь, дополненная растениями – аккумуляторами тяжелых металлов (*Lupinus polyphyllus.,* 1753, *Salix spp.,* 1991), что позволило усилить процесс извлечения металлов из почвы.

Результаты проведенных мероприятий подтвердили их высокую эффективность: содержание подвижных форм тяжелых металлов в почве достигло фоновых значений, что свидетельствует о полном восстановлении экологического состояния участка. В статье не приводится конкретных данных о содержании подвижных форм тяжелых металлов после рекультивации, поскольку их концентрации соответствуют фоновым значениям, что подтверждает успешность выполненных работ.

Объект исследования разделен по зонам: эпицентр загрязнения (№ 1, 26 почвенных прикопок, промзона трубопроводного транспорта); импактная зона загрязнения (№ 2, 26 почвенных прикопок, в 3 м от центра разлива) и граница загрязнения (№ 3, 25 почвенных прикопок, в 5 м от эпицентра загрязнения). Кроме загрязненных почв также были отобраны фоновые почвы (№ 4, 25 почвенных прикопок) и условный фон (№ 5, 25 почвенных прикопок). Фоновые почвы отбирались за пределами нефтяного месторождения, чтобы исключить любое антропогенное и техногенное влияние (в 10 км на север от нефтяного месторождения). Это позволило установить естественный уровень содержания веществ в почве, который служит эталоном для сравнения. Условный фон отбирался в 500 м от границы загрязнения, где следы загрязнения нефтью отсутствуют. Он формируется в пределах нефтяного месторождения, но на участках, не подверженных прямому воздействию загрязняющих веществ.

Выделение фона и условного фона необходимо для корректного анализа экологической ситуации, что позволяет разделить естественные и техногенные изменения, повлекшие трансформацию свойств почв. Это также обеспечило более точную оценку загрязнения, учитывая как фоновые, так и локальные условия.

При выборе фоновых участков соблюдалось требование максимальной однородности факторов почвообразования. В различных зонах распространения поллютантов и на незагрязненной территории проводилось морфологическое описание почв и определялось общее проективное покрытие растительности (ОПП). Полный перечень объектов исследования представлен в табл. 1.

Таблица 1. Объекты исследования

Глубина, см	Морфологическое строение	Растительный покров
Эпицентр загрязнения (№ 1, *n* = 26). Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой глееватой средне-мелкой почве (*Gleyic Toxic Fluvisols*)		
0–20	На поверхности – сплошная битумизированная корка с характерным сильным запахом. Почва однородная, темно-серая, почти черная. По шкале Манселла: яркость – 3, цветность – 5B, тон – Gley 2. Горизонт бесструктурный, тяжелосуглинистый, вязкий, сырой, уплотненный, пропитанный нефтью. Переход по окраске незаметен, границы не дифференцируются.	Наблюдается полная деградация древесно-кустарничкового яруса. Отмечено наличие единичных видоизмененных экземпляров таволги иволистной (*Spiraea salicifolia* L., 1753) и лютика ползучего *(Ranunculus repens** L., 1753). ОПП не превышает 10 %.
Импактная зона (№ 2, *n* = 26). Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой глееватой средне-мелкой почве (*Gleyic Toxic Fluvisols*)		
0–20	На поверхности заметна слабо выраженная битумизированная корка. Почва однородная, серого цвета. В сухом состоянии по шкале Манселла: яркость – 5, цветность – N, тон – Gley 1. Горизонт бесструктурный, с цементированными глыбистыми включениями, покрытыми маслянистой пленкой, пропитан нефтью. Переход по окраске незаметен, границы не дифференцируются.	Растительный покров представлен частично деградированными кустарниковыми ассоциациями рябины сибирской (*Sorbus sibirica Hedl.,* 1901), таволги средней (*Spiraea media* L., 1792) и шиповника иглистого (*Rosa acicularis* L., 1820). Растительность угнетена, генеративные органы не развиты. ОПП до 45 %.
Граница загрязнения (№ 3, *n* = 25). Хемозем нефтезагрязненный по аллювиальной серогумусовой глееватой средне-мелкой почве (*Gleyic Toxic Fluvisols*)		
0–20	На поверхности наблюдаются радужные размытые пленки. Почва неоднородная по окраске, серо-бурая. В сухом состоянии по шкале Манселла: яркость – 7, цветность – 3, тон – 7.5YR. Горизонт бесструктурный, тяжелосуглинистый, вязкий, сырой, уплотненный, пропитанный нефтью. Переход по окраске незаметен, границы не дифференцируются.	В растительности преобладают подросты березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и осины (*Populus tremula* L., 1753). ОПП до 60 %.
Фон (№ 4, *n* = 25). Аллювиальная серогумусовая глееватая средне-мелкая тяжелосуглинистая почва (*Gleyic Fluvisols*)		
0–20	Почва неоднородная, серо-бурая с сизыми прожилками. В сухом состоянии по шкале Манселла: яркость – 7, цветность – 3, тон – 5YR. Состоит из остатков травянистой растительности разной степени разложения, пронизана корневыми системами. Переход по составу почвенной массы четкий, граница ровная.	Растительный покров представлен ивой (*Salix* sp.), черной смородиной (*Ribes nigrum* L., 1753), таволгой иволистной (*Spiraea salicifolia* L., 1753), лабазником (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., 1879), лютиком ползучим (*Ranunculus repens* L., 1753), калужницей (*Caltha palustris* L., 1753) и *осокой* (*Carex* sp.). ОПП до 80 %.

Таблица 1. Продолжение

Глубина, см	Морфологическое строение	Растительный покров
Условный фон (№ 5, *n* = 25). Аллювиальная серогумусовая глееватая средне-мелкая тяжелосуглинистая почва (*Gleyic Fluvisols*)		
0–20	Почва неоднородная, серо-бурая с сизыми прожилками. По шкале Манселла: яркость – 7, цветность – 3, тон – 5YR. Состоит из остатков травянистой растительности, меньше пронизана корневыми системами, чем в зоне № 4. Переход по составу почвенной массы четкий, граница ровная.	Растительный покров включает люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus* L., 1753), донник желтый (*Melilotus officinalis* L., 1779) и клевер луговой (*Trifolium pratense* L., 1753). ОПП до 70 %.

Систематическое положение почв на каждом обследованном участке определено по Классификации и диагностике почв России (Шишов и др., 2004) и World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2022). Исследования проведены спустя 1–2 месяца с момента загрязнения.

Методы

Исследование распределения подвижных форм тяжелых металлов в нефтезагрязненных почвах среднетаежной подзоны Западной Сибири проводилось с применением современных стандартов и методов химико-аналитического анализа.

В мировой и отечественной практике используются различные подходы, направленные на снижение подвижности тяжелых металлов или их полное удаление из почв. Эти методы базируются на физических, химических и биологических процессах, позволяя адаптировать технологии к специфическим условиям загрязнения (McBride, 1989; Орлов и др., 2002; Середина и др., 2006; Smith, 2009; Водяницкий и др., 2009; Du, Yu, 2012; Геннадиев, 2016).

Отбор проб почвы выполнялся в полевых условиях в соответствии с методическими требованиями ГОСТ 17.4.4.02–84 (1984). Пробы отбирали из верхнего горизонта почвы (0–20 см), наиболее подверженного воздействию нефтезагрязнений и накоплению тяжелых металлов. Верхний слой является первым барьером, где происходят процессы сорбции, накопления и перераспределения загрязнителей, а также формируются условия для дальнейшей миграции ТМ в нижележащие слои и грунтовые воды.

Содержание подвижных форм тяжелых металлов (свинца, цинка, меди, никеля, ванадия и марганца) определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП). Данный метод характеризуется высокой чувствительностью и точностью, позволяет выявлять содержание исследуемых элементов в следовых концентрациях. Перед анализом из почвенных проб проводили экстракцию подвижных форм металлов с использованием слабокислого экстрагента (ацетатно-аммонийного буфера).

Определение содержания нефтепродуктов (НП) в почвенных образцах осуществлялось флуориметрическим методом согласно требованиям ПНД Ф 16.1:2.21–98 (1998). Этот метод позволяет выявлять содержание углеводородов нефти в широком диапазоне концентраций за счет регистрации интенсивности их флуоресценции. Подготовка образцов для анализа включала экстракцию органических загрязнителей растворителями с последующим измерением флуоресценции при заданных длинах волн. В целях установления химического состояния почв был также определен общий органический углерод (Сорг) по методу Тюрина ГОСТ 26213–91 (1991).

Результаты химико-аналитических измерений подвергались статистической обработке с целью оценки достоверности полученных данных и выявления закономерностей распределения подвижных форм тяжелых металлов и нефтепродуктов. Применялись методы описательной статистики и корреляционного анализа для установления взаимосвязей между содержанием тяжелых металлов и степенью нефтезагрязнения (содержанием НП). В работе использовались параметрические методы статистики – коэффициент корреляции Пирсона. Полученные данные также были сгруппированы по зонам загрязнения с определением диапазона данных (min–max). В диапазоне выделены средние значения, стандартное отклонение (SD), коэффициент вариации (V).

Для оценки накопления тяжелых металлов или других загрязняющих веществ в почве по сравнению с фоновыми значени-

ями был рассчитан индекс геоаккумуляции (*Igeo*). Комплексная оценка уровня загрязнения почвы несколькими загрязняющими веществами одновременно проведена с помощью суммарного коэффициента загрязнения (*Zc*). Формулы для расчета индекса геоаккумуляции и суммарного коэффициента загрязнения широко используются в экологической геохимии для оценки степени загрязнения почв тяжелыми металлами.

Индекс *Igeo* применяется для отображения процессов накопления, оценки уровня загрязненности тяжелыми металлами и рассчитывается по формуле (Forstner, Muler, 1981):

$$Igeo = log_2 * (Ci / 1.5 * Cf),$$

где *Ci* – содержание элемента в исследуемом образце (мг/кг),

Cf – содержание металла в фоновом образце (мг/кг),

1.5 – поправочный коэффициент, учитывающий природные вариации состава почвы.

Суммарный показатель химического загрязнения *Zc* характеризует степень химического загрязнения почв обследуемой территории тяжелыми металлами и определяется как сумма коэффициентов концентрации *Кс* (*Кс = Ci / Cf)* отдельных компонентов загрязнения по формуле (СанПиН 1.2.3685-21):

$$Zc = \sum(Ci / Cf + \dots Ci / Cf_n) – (n – 1),$$

где *n* – число определяемых компонентов.

Для расчета суммарного показателя загрязнения использовались средние значения содержания подвижных форм тяжелых металлов в профилях исследованных фоновых почв.

Применение описанных методов позволило обеспечить высокую точность и надежность результатов исследования, а также получить данные, необходимые для дальнейшего анализа закономерностей поведения тяжелых металлов в условиях нефтезагрязненных почв.

Результаты

В исследованных почвах максимальное содержание тяжелых металлов характерно не только для верхних замазученных горизонтов эпицентра загрязнения. Эта закономерность проявляется во всех зонах техногенной нагрузки: в импактной зоне, границе нефтяного пятна (табл. 2).

Таблица 2. Концентрация подвижных форм тяжелых металлов в почвах, мг/кг

Глубина, см	Pb	Zn	Cu	Ni	V	Mn
	ПДК по СанПиН 1.2.3685–21					
	6	23	3	4	–*	100**
	Эпицентр загрязнения (№ 1, *n* = 26)					
0–20	8.75–10.55/ 9.65 ± 0.52 (CV = 5.4)	48.85–52.4/ 50.63 ± 1.03 (CV = 2.1)	8.6–9.9/ 9.25 ± 0.38 (CV = 4.1)	18.8–20.6/ 19.7 ± 0.52 (CV = 2.6)	28.5–36.3/ 32.45 ± 2.25 (CV = 6.9)	675–732/ 703.5 ± 16.43 (CV = 2.3)
	Импактная зона (№ 2, *n* = 26)					
0–20	8.25–11.6/ 9.93 ± 0.97 (CV = 9.7)	38.5–48.15/ 43.33 ± 2.78 (CV = 6.4)	5–7/ 6 ± 0.58 (CV = 9.6)	11.05–14.35/ 12.7 ± 0.95 (CV = 7.5)	18.8–26.4/ 22.6 ± 2.18 (CV = 9.6)	549.5–635/ 592.25 ± 24.71 (CV = 4.1)
	Граница загрязнения (№ 3, *n* = 25)					
0–20	6.3–7.5/ 6.9 ± 0.35 (CV = 5.1)	21.2–25.45/ 23.33 ± 1.22 (CV = 5.2)	3.85–5.45/ 4.65 ± 0.46 (CV = 9.9)	7.9–9.25/ 8.58 ± 0.39 (CV = 4.5)	10.65–14.2/ 12.43 ± 1.02 (CV = 8.2)	328.5–405/ 366.75 ± 22.15 (CV = 6.1)
	Фон (№ 4, *n* = 25)					
0–20	1.15–1.6/ 1.38 ± 0.13 (CV = 9.4)	3–4.65/ 3.83 ± 0.48 (CV = 12.5)	0.5–1.15/ 0.83 ± 0.19 (CV = 22.8)	1.7–4.5/ 3.1 ± 0.8 (CV = 25.8)	2.8–4.7/ 3.75 ± 0.55 (CV = 14.6)	77.2–90.2/ 83.7 ± 3.75 (CV = 4.4)
	Условный фон (№ 5, *n* = 25)					
0–20	2.85–3.21/ 3.03 ± 0.1 (CV = 3.3)	3.5–5.84/ 4.67 ± 0.68 (CV = 14.6)	1.1–2.87/ 1.99 ± 0.51 (CV = 25.6)	3.1–5.9/ 4.5 ± 0.81 (CV = 18.0)	4.8–6.1/ 5.45 ± 0.38 (CV = 6.9)	82.8–96.3/ 89.55 ± 3.91 (CV = 4.3)

Примечание. * – ПДК не установлены; ** – извлекаемый ацетатно-аммонийным буфером с pH 4.8. Вверху – диапазон данных: lim = min–max, внизу – среднее ± стандартное отклонение, в скобках – коэффициент вариации (CV, %).

Для подтверждения наличия закономерностей в распределении концентраций исследуемых подвижных форм тяжелых металлов в связи с изменением содержания $C_{орг}$ и НП рассчитывались коэффициенты корреляции (R). Выявлены парные корреляционные зависимости между отдельными элементами в почвах, что позволяет судить о сходной направленности биогеохимических процессов (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции (R) на глубине 0–20 см

Параметр	Содержание	Корреляционная связь ТМ с содржанием Сорг, НП					
		Pb	Zn	Cu	Ni	V	Mn
Эпицентр загрязнения (№ 1, *n* = 26)							
НП, г/100 г почвы	2.94–11.41/ 7.18 ± 2.45	0.94	0.83	0.95	0.98	1	1
Сорг, %	12.95–58.58 / 35.77 ± 13.16	1	0.84	0.91	1	0.98	1
Импактная зона (№ 2, *n* = 26)							
НП, г/100 г почвы	3.26-9.79/ 6.53 ± 1.88	0.83	0.8	0.9	0.88	0.95	1
Сорг, %	9.03–47.74/ 28.39 ± 11.15	1	0.88	0.88	0.98	0.91	1
Граница загрязнения (№ 3, *n* = 25)							
НП, г/100 г почвы	4.85–7.72/ 6.29 ± 0.82	0.8	0.74	0.78	0.82	0.85	1
Сорг, %	1.66–9.49/ 5.58±2.26	1	0.78	0.75	0.9	0.79	1

Примечание. Над чертой – диапазон данных: lim = min–max, под чертой – среднее ± стандартное отклонение

Индекс геоаккумуляции (Igeo) и суммарный показатель загрязнения (Zc) являются важными инструментами для оценки степени загрязнения почв и донных отложений. Их расчет позволяет получить количественную характеристику экологического состояния исследуемой территории и выявить источники загрязнения. Согласно полученным данным, аварийные разливы нефти способствуют техногенному приносу всех исследованных подвижных форм ТМ (табл. 4).

Таблица 4. Индексы загрязнения почв (по среднему значению)

Параметр	Глубина, см	Pb	Zn	Cu	Ni	V	Mn
		Ci (Условный фон (№ 5), средние значения					
		3.03	4.67	1.99	4.5	5.45	89.55
Эпицентр загрязнения (*n* = 26)							
Cf	0–20	9.65	50.63	9.25	19.7	32.45	703.5
Zc	0–20	36.86					
Igeo	0–20	1.09	**2.85**	1.63	1.55	**1.99**	**2.39**
Импактная зона (*n* = 26)							
Cf	0–20	9.93	43.33	6.6	12.7	22.6	592.25
Zc	0–20	29.15					
Igeo	0–20	1.13	**2.63**	1.01	0.91	**1.47**	**2.14**
Граница загрязнения (*n* = 25)							
Cf	0–20	6.9	23.33	4.65	8.58	12.3	366.5
Zc	0–20	17.89					
Igeo	0–20	0.60	**1.74**	0.64	0.35	0.60	**1.45**

Значения индекса геоаккумуляции отражают в первую очередь степень вовлеченности элементов и долю техногенной нагрузки относительно фонового содержания.

Анализ содержания подвижных форм тяжелых металлов в верхнем горизонте (0–20 см) нефтезагрязненных почв среднетаежной подзоны Западной Сибири выявил существенное превышение концентраций этих элементов над предельно допустимыми значениями. Полученные данные подтверждают значительное техногенное воздействие, изменяющее химический состав и экологическое состояние почвенного покрова.

Свинец (Pb). Средняя концентрация свинца в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения в 7 раз. Высокая вариативность концентраций в импактной зоне загрязнения (9.93 мг/кг) указывает на неравномерное распределение загрязнения, что может быть связано с точечными выбросами или различиями в сорбционной способности почв.

Цинк (Zn). Концентрация цинка в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения более чем в 13 раз. Стандартное отклонение относительно небольшое, что говорит о стабильном уровне загрязнения. Источником может быть как нефтяное загрязнение, так и техногенные выбросы, связанные с обработкой металлов (работы ремонтно-механических мастерских в ближайших производственных зонах).

Медь (Cu). Средняя концентрация меди в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения более чем в 11 раз. Низкая вариативность данных в зоне загрязнения указывает на равномерное распределение меди, что может быть связано с устойчивостью ее соединений в почвенном горизонте.

Никель (Ni). Концентрация никеля в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения в 6.4 раза. Значительные колебания стандартного отклонения в зоне фона и условного фона могут быть связаны с природной вариативностью содержания никеля в почвах и низкой сорбционной способностью почвы в данных участках.

Ванадий (V). Средняя концентрация ванадия в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения в 8.7 раза. Умеренная вариативность данных в загрязненных зонах может быть связана с неравномерным распределением нефтяных остатков, содержащих ванадий.

Марганец (Mn). Концентрация марганца в эпицентре загрязнения превышает фоновые значения в 8.4 раза. Небольшое стандартное отклонение в эпицентре загрязнения свидетельствует о стабильном источнике поступления марганца, что может быть связано с окислительно-восстановительными процессами, активируемыми нефтезагрязнением.

Полученные данные подтверждают значительное техногенное воздействие, изменяющее природный химический состав почвенного покрова. В сравнении с гигиеническими нормативами, на глубине 0–20 см в 100.0 % случаев почвы загрязнены тяжелыми металлами. Исследование показало, что доля тяжелых металлов по кратности превышений ПДК согласно СанПиН 1.2.3685–21 (2021) и фоновых значений в нефтезагрязненных почвах убывает в следующем ряду: V > Mn > Ni > Cu > Pb > Zn.

Почвы, загрязненные нефтепродуктами, характеризуются изменением содержания тяжелых металлов и органического углерода, что связано с комплексными химическими и физическими процессами. В эпицентре загрязнения среднее содержание нефтепродуктов составляет 7.18 г/100 г почвы, а органического углерода (Сорг) – 35.77 %. Наблюдаются сильные положительные корреляции между тяжелыми металлами и НП, особенно для ванадия и марганца (R = 1.0), что свидетельствует о возможной адсорбции этих металлов углеводородными фракциями нефти. Аналогичная связь наблюдается между содержанием ТМ и Сорг с коэффициентами корреляции до 1.0 (Pb, Ni, Mn), что указывает на стабилизацию ТМ органической матрицей почвы.

В импактной зоне среднее содержание НП составляет 6.53 г/100 г почвы, а Сорг – 28.39 %. Корреляционные связи между ТМ и НП остаются высокими, но несколько снижаются (R = 0.9 для Cu и 0.88 для Ni), что может быть связано с уменьшением содержания нефти. На границе загрязнения среднее содержание НП составляет 6.29 г/100 г почвы, а Сорг – 5.58 %. Корреляции между ТМ и НП заметно ослабевают (R = 0.74–0.85), что может быть обусловлено снижением адсорбционных свойств почвы.

На границе загрязнения (№ 3, n = 25) среднее содержание НП составляет 6.29 г/100 г почвы, а Сорг – 5.58 %. Между ТМ и НП корреляции заметно снижаются (R = 0.74–0.85), что может быть связано с уменьшением адсорбционных свойств почвы из-за снижения содержания НП. Ослабевает, но остается заметной связь между ТМ и Сорг (R = 0.9 для Ni, 0.79 для V), что подтверждает важность

органического углерода в удержании металлов. Общее снижение НП и Сорг приводит к меньшей фиксации ТМ, что увеличивает их подвижность.

Полученные закономерности могут быть экстраполированы на другие нефтезагрязненные почвы среднетаежной подзоны Западной Сибири с аналогичными характеристиками (тип почв, уровень загрязнения, содержание органического углерода). Применимость за пределами этого региона ограничена из-за различий в почвенных свойствах, климатических условиях и источниках загрязнения. Закономерность применима для верхнего горизонта почв (0–20 см). Экстраполяция на более глубокие горизонты требует дополнительных исследований, т. к. процессы миграции и сорбции ТМ могут отличаться. Закономерности справедливы для почв, загрязненных нефтепродуктами, с высоким содержанием органического углерода. Для других типов загрязнения (например, промышленные выбросы, сельскохозяйственные химикаты) экстраполяция может быть некорректной.

Для оценки уровня загрязнения почв использован коэффициент геоаккумуляции (Igeo), который позволяет определить степень техногенного влияния. В эпицентре загрязнения значения Igeo варьируют от 1.09 (Pb) до 2.85 (Zn). Наибольший вклад в загрязнение вносят Zn и Mn, что связано с их высокими концентрациями относительно фона. В данной зоне Zn и Mn характеризуются умеренно сильным загрязнением, а остальные элементы – умеренным. В импактной зоне значения Igeo варьируют от 1.01 (Cu) до 2.63 (Zn). Основной вклад в загрязнение вносят Zn, Mn и V. Уровень загрязнения большинства элементов снижается по сравнению с эпицентром, что указывает на уменьшение техногенного воздействия. На границе загрязнения значения Igeo колеблются от 0.35 (Ni) до 1.74 (Zn). Загрязнение всех элементов снижается, а концентрации приближаются к условно-фоновым уровням (№ 5). Все элементы характеризуются низким (до умеренного) уровнем загрязнения, что соответствует переходной зоне.

Величины индекса снижаются от эпицентра к границе, что ожидаемо, т. к. концентрации загрязняющих веществ уменьшаются по мере удаления от источника загрязнения. Для элементов Zn, Mn и V наблюдается устойчиво высокий вклад в загрязнение.

Суммарный индекс загрязнения показывает совокупное воздействие всех элементов, сравнивая их концентрации с фоновыми уровнями. В эпицентре загрязнения значение Zc = 36.86 указывает на экстремально высокое загрязнение (более 30). В импактной зоне Zc = 29.15 уровень загрязнения высокий, но ниже, чем в эпицентре.

На границе загрязнения (Zc = 17.89) уровень загрязнения средний (от 10 до 20). Загрязнение все еще выше нормы, но уже не угрожает экосистеме. Вклад элементов Zn, Mn и V все еще существенен, но снижается.

Значения Zc демонстрируют закономерное уменьшение по мере удаления от эпицентра. Все зоны находятся в диапазоне загрязнения, который требует мониторинга и мероприятий по снижению техногенной нагрузки.

Таким образом, элементы Zn, Mn и V демонстрируют устойчиво высокие значения Igeo и Zc, что связано с их повышенной техногенной активностью.

Загрязнение уменьшается с удалением от эпицентра, что подтверждает локальный характер источника загрязнения. В эпицентре загрязнения наблюдается высокая экологическая опасность Zc > 30. Импактную зону можно охарактеризовать как опасное загрязнение, а загрязнение на границе нефтяного пятна – умеренное.

Обсуждение

Проведенное исследование выявило значительное влияние нефтяного загрязнения на содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах среднетаежной подзоны Западной Сибири. Полученные результаты согласуются с данными других исследований, посвященных изучению взаимосвязи между загрязнением ТМ и нефтепродуктами. Однако наблюдаются и некоторые различия, обусловленные спецификой региона, характером загрязнения и свойствами почв.

Результаты исследования показали, что в нефтезагрязненных почвах концентрации ТМ значительно превышают фоновые значения и предельно допустимые концентрации. Это согласуется с данными, полученными в работах Kabata-Pendias, Pendias (2011), Alloway (2013), где также отмечается увеличение содержания ТМ в почвах, загрязненных нефтью. Например, в исследовании Alloway (2013) было установлено, что нефтяное загрязнение способствует накоплению таких элементов, как ванадий (V), никель (Ni) и марганец (Mn), что объясняется их высокой аффинностью к органическим соединениям, содержащимся в нефти. В нашем

исследовании также выявлено значительное увеличение концентраций V, Ni и Mn в эпицентре загрязнения, что подтверждает их связь с нефтяными остатками.

Однако в отличие от работ Adriano (2001) и Smith (2009), где основное внимание уделялось свинцу (Pb) и кадмию (Cd), в рамках проведенного исследования повышенная вариативность содержания свинца (Pb) и никеля (Ni) может быть вызвана точечным характером техногенных источников загрязнения и локальными особенностями почвы (сорбционной способностью, уровнем влажности, pH). Относительно стабильные стандартные отклонения для Zn, Cu и Mn указывают на постоянный источник загрязнения, связанный с техногенными выбросами. Ванадий (V) и марганец (Mn) демонстрируют умеренные отклонения, что может быть связано с их химическими свойствами: ванадий сорбируется органическими веществами, а марганец активно участвует в редокс-реакциях. Наибольшее превышение ПДК наблюдалось для ванадия (V) и марганца (Mn). Это может быть связано с региональными особенностями состава нефти и почв, а также с различиями в методах отбора проб и анализа.

Сильные корреляции между ТМ и НП в эпицентре загрязнения свидетельствуют о механизмах комплексообразования и физической сорбции. Снижение корреляций в импактной зоне и на границе загрязнения связано с уменьшением содержания НП и Сорг, что ослабляет фиксацию ТМ и увеличивает их подвижность. Полученные результаты согласуются с данными исследований Yang et al. (2017, 2021), Man et al. (2022), где также отмечается, что углеводородные фракции нефти способствуют адсорбции и стабилизации ТМ в почве. В работе Ruan et al. (2023) показано, что органические соединения нефти образуют комплексы с металлами, снижая их подвижность и способствуя их накоплению в верхних горизонтах почвы.

Однако в импактной зоне и на границе загрязнения наблюдалось ослабление корреляционных связей, что может быть связано с уменьшением содержания НП и органического углерода (Сорг). Это согласуется с выводами работы Водяницкого и др. (2009), где отмечается, что снижение концентрации НП приводит к уменьшению сорбционной способности почвы и увеличению подвижности ТМ. Таким образом, полученные данные подтверждают важную роль органического вещества в удержании ТМ в нефтезагрязненных почвах.

Результаты расчета индекса геоаккумуляции (Igeo) и суммарного показателя загрязнения (Zc) показали, что наиболее значительный вклад в загрязнение вносят Zn, Mn и V. Это согласуется с данными работы Девятовой и др. (2022), где также отмечается высокая техногенная активность этих элементов в нефтезагрязненных почвах. Однако в отличие от исследования Wang et al. (2012), где основное внимание уделялось Cu и Pb, в нашем случае эти элементы имели меньший вклад в общее загрязнение.

Закономерное уменьшение значений Igeo и Zc по мере удаления от эпицентра загрязнения подтверждает локальный характер источника загрязнения, что согласуется с выводами работы Yang et al. (2017, 2021). В то же время, в отличие от исследования Tozser et al. (2023), где уровень загрязнения оставался высоким даже на значительном расстоянии от источника, на исследованных почвах наблюдалось снижение Zc до умеренного уровня. Это может быть связано с особенностями распределения нефтяных остатков и свойствами почв.

Полученные данные подчеркивают необходимость разработки и применения комплексных мероприятий по рекультивации нефтезагрязненных почв. В частности, для зон с экстремально высоким уровнем загрязнения (Zc > 30) требуется проведение мероприятий по снижению токсичности почв и восстановлению их экологических функций.

Таким образом, результаты исследования подтверждают значительное влияние нефтяного загрязнения на содержание и распределение ТМ в почвах. Выявленные закономерности согласуются с данными других исследований, но имеют свои особенности, обусловленные региональными условиями. Полученные данные указывают на необходимость дальнейшего изучения механизмов взаимодействия ТМ и НП, а также разработки эффективных методов рекультивации загрязненных территорий.

Заключение

Анализ корреляционных связей показал, что содержание нефти и органического углерода почв оказывает значительное влияние на распределение подвижных форм ТМ в почвах. В эпицентре загрязнения высокие корреляционные связи обусловлены значительной концентрацией органического углерода, который формирует устойчивые комплексы

с тяжелыми металлами. По мере удаления от эпицентра корреляционные связи ослабевают, что связано с уменьшением содержания НП и Сорг. Вещества с высоким содержанием органики (НП и Сорг) увеличивают сорбцию ТМ за счет комплексообразования и физической фиксации, а уменьшение концентрации органического вещества приводит к повышению подвижности тяжелых металлов.

Полученные данные указывают на значительное превышение норм содержания ТМ в верхнем слое почв в зонах нефтяного загрязнения. Накопление ТМ оказывает токсическое воздействие на почвенную микрофлору, замедляет биодеградацию углеводородов и ухудшает условия для естественного восстановления почв. Наибольшее внимание следует уделить свинцу, меди и ванадию, поскольку их накопление в верхнем горизонте наиболее выражено.

Для снижения токсичности почв рекомендуется использовать методы химической стабилизации (например, внесение цеолитов или фосфатов), которые снижают подвижность металлов. Метод будет более эффективен совместно с посевом растений-аккумуляторов (*Lupinus polyphyllus, Salix spp*.) для извлечения металлов из почвы. Во время проведения восстановительных мероприятий необходимо проводить систематическое наблюдение на основе корреляционных связей между содержанием органического вещества и ТМ для более точного прогнозирования загрязнения.

Библиография

Водяницкий Ю. Н., Васильев А. А., Лобанова Е. С. Загрязненность тяжелыми металлами и металлоидами почв г. Пермь // Агрохимия. 2009. № 4. С. 60–68.

Геннадиев А. Н. Нефть и окружающая среда // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2016. № 6. С. 30–39.

ГОСТ 17.4.4.02–84. Охрана природы. Почвы. Методы определения содержания загрязняющих веществ . М.: Государственный комитет СССР, 1984. 15 с.

ГОСТ 26213–91. Почвы. Методы определения органического вещества . М.: Государственный комитет СССР, 1992. 7 с.

ГОСТ Р 57447-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация земель и земельных участков, загрязненных нефтью и нефтепродуктами . М.: Стандартинформ, 2017. 32 с.

ГОСТ Р 59057–2020. Охрана окружающей среды. Земли. Общие требования по рекультивации нарушенных земель . М.: Стандартинформ, 2020. 24 с.

Девятова Т. А., Горбунова Н. С., Горбунова Ю. С., Гафар Х. Г. Распределение тяжелых металлов и бенз(а)пирена в нефтезагрязненных почвах города Кайяра (Ирак) // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. 2022. № 1. DOI: https://doi.org/10.51419/202121116.

Орлов Д. С., Садовникова Л. К., Лозановская И. Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении / Под общ. ред. Д. С. Орлова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2002. 334 с.

ПНД Ф 16.1:2.21–98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости Флюорат-02 . М.: Федеральное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1998. 31 с.

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания . М.: Роспотребнадзор, 2021. 192 с.

Середина В. П., Андреева Т. А., Алексеева Т. П., Бурмистрова Т. И., Терещенко Н. Н. Нефтезагрязненные почвы: свойства и рекультивация . Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 270 с.

Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификации и диагностика почв России . Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Adriano D. C. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. 2nd Edition. New York: Springer, 2001. 867 p.

Alloway B. J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Dordrecht: Springer, 2013. 614 p.

Du C. W., Yu Y. J. Distribution of heavy metals in the soils of the mining area in Western Liaoning Province // International Journal of Environmental Research. 2012. P. 31–33.

Forstner U., Muler G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact // Geojournal. 1981. Vol. 5. P. 417–432.

Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. (4th ed.). Boca Raton: CRC Press, 2011. 520 p.

Man J., Zeng L., Luo J., Gao W., Yao Y. Application of the deep learning algorithm to identify the spatial distribution of heavy metals at contaminated sites // ACS EST Engg. 2022. Vol. 2 (2). P. 158–168. DOI: https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00224

McBride M. B. Reactions controlling heavy metal solubility in soils // Advances in Soil Science. 1989. Vol. 10. P. 1–57.

Olujimi O. O., Fatoki O. S., Oputu O., Opeolu B. O. Heavy metals in environment: Distribution and their influence on environmental pollution // Environmental Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21, № 13. P. 7981–7988.

Ruan X., Ge S., Jiao Z., Zhan W., Wang Y., Bioaccumulation and risk assessment of potential toxic elements in the soil-vegetable system as influenced by historical wastewater irrigation // Agric. Water Manag. 2023. Vol. 279. P. 108197. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023

Smith S. R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge // Environment International. 2009. Vol. 35, № 1. P. 142–156.

Tozser D., Sipos B., Tothmeresz B., Simon E. Heavy Metal Pollution of Soil in Vienna, Austria Dina Bibi // Water Air Soil Pollut. 2023. Vol. 234 (232). P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1007/s11270-023-06244-5

Wang J., Zheng Y. A., Wang A. Effect of kapok fiber treated with various solvents on oil absorbency // Industrial Crops and Products. 2012. Vol. 40 (1). P. 178–184.

World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps // World Soil Resources Reports. Rome: FAO, 2022. № 106. P. 181.

Yang H., Huang K., Zhang K., Weng Q., Zhang H., Wang F. Predicting heavy metal adsorption on soil with machine learning and mapping global distribution of soil adsorption capacities // Environ. Sci. Technol. 2021. Vol. 55 (21). P. 14316–14328. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02479

Yang Z., Dong C., Chen C., Sheu Y., Kao C. Using polyglutamic acid as soil-washing agent to remediate heavy metal-contaminated soils // Environ. Sci. Pollut. 2017. Vol. 25. P. 5231–5242. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-017-9235-7

GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF THE DISTRIBUTION OF MOBILE FORMS OF HEAVY METALS IN OIL-CONTAMINATED ALLUVIAL SOILS OF THE MIDDLE TAIGA SUBZONE OF WESTERN SIBERIA

NOSOVA Maria Vladimirovna — *Ph.D., JSC TomskNIPIneft, 634027 Russia, Tomsk, Mira Ave., 72, nsmvsh@mail.ru*

SEREDINA Valentina Petrovna — *D.Sc., National Research Tomsk State University, 634050, Russia, Tomsk, Lenin Ave., 36, seredina_v@mail.ru*

STOVBUNIK Sergey Anatolyevich — *JSC TomskNIPIneft, 634027, Russia, Tomsk, Mira Ave., 72, StovbunikSA@tomsknipi.ru*

Keywords:
heavy metals
mobile forms
oil pollution
geoaccumulation coefficient
total pollution index
reclamation methods
environmental impact

Summary: The article considers the content of mobile forms of heavy metals (HM) in oil-contaminated soils of the middle taiga subzone of Western Siberia. The studies were conducted for the upper soil horizons (0–20 cm) in various zones of anthropogenic impact (epicenter, impact zone, zone boundary) and in the background areas. The analysis results showed a significant excess of HM concentrations over the maximum permissible values (MPC) established by SanPiN 1.2.3685–21, as well as over background levels in oil-contaminated soils. The content of mobile forms of HM in the anthropogenic impact zone decreases in the following order: V > Mn > Ni > Cu > Pb > Zn. In the course of the work, correlations between the content of mobile forms of HM, organic carbon (Corg) and petroleum products (PP) were calculated, and the geo-accumulation coefficient (Igeo) and the total index of soil pollution (Zc) were determined. It was established that Zc values decrease naturally with distance from the pollution epicenter. All the studied zones are in the pollution range that requires monitoring and measures to reduce the anthropogenic impact. The elements Zn, Mn and V demonstrate consistently high Igeo and Zc values, which is associated with their increased technological activity. The revealed patterns emphasize the need to develop and implement comprehensive environmental protection measures to restore the ecological state of contaminated soils.

Reviewer: V. I. Kulagina
Reviewer: V. V. Vapirov

Received on: 22 December 2025 **Published on:** 22 March 2025

References

Adriano D. C. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. 2nd Edition. New York: Springer, 2001. 867 p.

Alloway B. J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Dordrecht: Springer, 2013. 614 p.

Best available technologies. Reclamation of lands and land plots contaminated with oil and oil products. M.: Standartinform, 2017. 32 p.

Devyatova T. A. Gorbunova N. S. Gorbunova Yu. S. Gafar H. G. Distribution of metals and benzo(a) pyrene in oil-contaminated soils of the city of Qayyara (Iraq), AgroEkoInfo: Elektronnyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal. 2022. No. 1. DOI: https://doi.org/10.51419/202121116.

Du C. W., Yu Y. J. Distribution of heavy metals in the soils of the mining area in Western Liaoning Province, International Journal of Environmental Research. 2012. P. 31–33.

Environmental protection. Lands. General requirements for the reclamation of disturbed lands. M.: Standartinform, 2020. 24 p.

Forstner U., Muler G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact, Geojournal. 1981. Vol. 5. R. 417–432.

Gennadiev A. N. Oil and the environment, Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2016. No. 6. P. 30–39.

Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. M.: Rospotrebnadzor, 2021. 192 p.

Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. (4th ed.). Boca Raton: CRC Press, 2011. 520 p.

Man J., Zeng L., Luo J., Gao W., Yao Y. Application of the deep learning algorithm to identify the spatial distribution of heavy metals at contaminated sites, ACS EST Engg. 2022. Vol. 2 (2). R. 158–168. DOI: https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00224

McBride M. B. Reactions controlling heavy metal solubility in soils, Advances in Soil Science. 1989. Vol. 10. P. 1–57.

Methodology for measuring the proportion of petroleum products in soil samples by the fluorimetric method using a Fluorat-02 liquid analyzer. M.: Federal'noe upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayuschey sredy, 1998. 31 p.

Nature protection. Soils. Methods for determining the content of pollutants. M.: Gosudarstvennyy komitet SSSR, 1984. 15 p.

Olujimi O. O., Fatoki O. S., Oputu O., Opeolu B. O. Heavy metals in environment: Distribution and their influence on environmental pollution, Environmental Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21, No. 13. P. 7981–7988.

Orlov D. S. Sadovnikova L. K. Lozanovskaya I. N. Ecology and biosphere protection under chemical pollution, Pod obsch. red. D. P. Orlova. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Vysshaya shkola, 2002. 334 p.

Ruan X., Ge S., Jiao Z., Zhan W., Wang Y., Bioaccumulation and risk assessment of potential toxic elements in the soil-vegetable system as influenced by historical wastewater irrigation, Agric. Water Manag. 2023. Vol. 279. R. 108197. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023

Seredina V. P. Andreeva T. A. Alekseeva T. P. Burmistrova T. I. Tereschenko N. N. Oil-polluted soils: properties and reclamation. Tomsk: Izd-vo TPU, 2006. 270 p.

Shishov L. L. Tonkonogov V. D. Lebedeva I. I. Gerasimova M. I. Classification and diagnostics of soils in Russia. Smolensk: Oykumena, 2004. 342 p.

Smith S. R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge, Environment International. 2009. Vol. 35, No. 1. R. 142–156.

Soils. Methods for the determination of organic matter. M.: Gosudarstvennyy komitet SSSR, 1992. 7 p.

Tozser D., Sipos B., Tothmeresz B., Simon E. Heavy Metal Pollution of Soil in Vienna, Austria Dina Bibi, Water Air Soil Pollut. 2023. Vol. 234 (232). P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1007/s11270-023-06244-5

Vodyanickiy Yu. N. Vasil'ev A. A. Lobanova E. S. Contamination of Perm city soils by heavy metals and metalloids, Agrohimiya. 2009. No. 4. P. 60–68.

Wang J., Zheng Y. A., Wang A. Effect of kapok fiber treated with various solvents on oil absorbency, Industrial Crops and Products. 2012. Vol. 40 (1). P. 178–184.

World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, World Soil Resources Reports. Rome: FAO, 2022. No. 106. P. 181.

Yang H., Huang K., Zhang K., Weng Q., Zhang H., Wang F. Predicting heavy metal adsorption on soil with machine learning and mapping global distribution of soil adsorption capacities, Environ. Sci. Technol. 2021. Vol. 55 (21). P. 14316–14328. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02479

Yang Z., Dong C., Chen C., Sheu Y., Kao C. Using polyglutamic acid as soil-washing agent to remediate heavy metal-contaminated soils, Environ. Sci. Pollut. 2017. Vol. 25. P. 5231–5242. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-017-9235-7

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК УДК 591.9(4-013); 597.6/.9

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ ЗЕМНОВОДНЫХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

РАВКИН Юрий Соломонович — *доктор биологических наук, Институт систематики и экологии животных СО РАН, 630091, Новосибирск-91, ул. Фрунзе, 11, yravkin@bk.ru*

ЦЫБУЛИН Сергей Михайлович — *доктор биологических наук, Институт систематики и экологии животных СО РАН, 630091, Новосибирск-91, ул. Фрунзе, 11, tcsm_tomsk@mail.ru*

ЧЕСНОКОВА Светлана Витальевна — *кандидат биологических наук, Институт систематики и экологии животных СО РАН, 630091, Новосибирск-91, ул. Фрунзе, 11, tchsvet@mail.ru*

ЛЯЛИНА Мария Игоревна — *Институт систематики и экологии животных СО РАН, 630091, Новосибирск-91, ул. Фрунзе, 11, lyalinangs@yandex.ru*

Ключевые слова:
Амфибии
Западная Сибирь
Алтай
Салаир и Кузнецкий Алатау
население земноводных
распределение
факторы среды
природные режимы
численность
динамика
кластерный и регрессионный анализ

Аннотация: Представлены результаты анализа и последующего обобщения на региональном уровне многолетних данных по населению земноводных всей Западной Сибири, включая Западно-Сибирскую равнину, Кузнецко-Салаирскую горную область и российскую часть Алтая. Исходные материалы собраны за период с 1970 по 2022 г. при учете земноводных в 1623 местообитаниях с помощью канавок и заборчиков с ловчими цилиндрами. На основе собранных данных оценена численность земноводных в этом обширном регионе, описаны распределение видов на уровне групп ландшафтов и особенности пространственно-временной динамики их обилия. С использованием методов кластерного анализа в сочетании с экспертной кластеризацией данных выполнена классификация сообществ земноводных, взятая за основу при разработке легенды представленной в статье карты населения земноводных Западной Сибири. Показано, что значительный прирост объема анализируемых материалов не только расширяет перспективы для эколого-зоогеографических обобщений и сопоставлений, но и неизбежно приводит к нарастанию затруднений в предметной интерпретации результатов факторной кластеризации данных. Рассмотрены вероятные причины этих затруднений и способы их преодоления. Основная цель проведенного исследования заключалась в выявлении главных трендов пространственной изменчивости населения земноводных и оценке их связи с неоднородностью среды, а информация о численности животных служила основанием для ее достижения.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Г. А. Лада

Получена: 18 декабря 2024 года

Подписана к печати: 25 марта 2025 года

Введение

Статья посвящена пространственной неоднородности населения земноводных Западной Сибири – обширного природно-экономического региона, к которому относят Западно-Сибирскую равнину и прилежащую с юго-востока часть Алтае-Саянской горной страны с Кузнецко-Салаирской горной областью и российской частью Алтайской горной области (Западная Сибирь, 1963). Рассмотрена изменчивость плотности и видового богатства населения земноводных этой территории, а также дана оценка численности и охарактеризовано распределение всех видов, отмеченных во время проведения учетов.

Приведенная информация имеет не только познавательное, теоретическое, но и прикладное значение, что обусловлено возможностью ее использования при планировании и выполнении мероприятий по сохранению биоразнообразия и мониторинге популяций земноводных, а также при проведении экологической экспертизы проектов, связанных с использованием природных ресурсов региона. Как известно, решение подобных задач подразумевает необходимость отслеживания изменений численности животных в пространстве и во времени, что требует очень больших трудозатрат из-за высокого разнообразия местообитаний и огромных площадей, на которых такие работы следует проводить. Представленные сведения могут быть взяты за основу при проведении подобных работ, что значительно снизит их трудоемкость.

Исследования, результаты которых взяты за основу для нашей статьи, выполнены в рамках направления, получившего название «Факторная зоогеография» (Равкин, Ливанов, 2008). Основная специфика этого направления обусловлена переходом из реального хорологического пространства в типологическое многомерное факторное пространство (в его математическом понимании) при описании и статистическом анализе данных. Главная цель исследования заключалась в выявлении основных трендов в пространственной изменчивости населения земноводных и коррелятивных связей с ведущими факторами среды. Информация о численности земноводных служила основанием для достижения этой цели.

Материалы

Все сведения по обилию земноводных взяты из банка данных Лаборатории зоологического мониторинга ИСиЭЖ СО РАН. Они собраны в результате совместных усилий 60 специалистов в период с 1970 по 1973 и с 1975 по 2022 г., т. е. за 52 года. За это время с помощью канавок и/или заборчиков с ловчими цилиндрами, открытыми, как правило, весь сезон с середины июля до конца августа, выполнен количественный учет земноводных. Суммарно отработано около 33700 цилиндро-суток (ц/с), при этом обследовано 1623 местообитания (биотопа), по своему масштабу и рангу примерно соответствующих таким широко используемым в геоботанике и ландшафтоведении классификационным единицам, как «растительная формация» и «ландшафтное урочище». В полученной выборке преобладают однолетние данные по обилию земноводных, поскольку бóльшая часть биотопов обследована в каждом месте однократно. Все показатели обилия, выраженные количеством особей на 100 ц/с, пересчитаны и на 1 км^2 (Равкин, Ливанов, 2008). Бóльшая часть и предварительный анализ результатов учета земноводных опубликованы (Равкин, Лукьянова, 1976; Борисович и др., 2002; Равкин и др., 2003а, б, в, 2005, 2008, 2020; Цыбулин и др., 2007, 2013; Эпова и др., 2013; Куранова, Ярцев, 2020; часть ссылок см. в перечисленных публикациях). В данной статье впервые представлены итоговые результаты обобщения на региональном уровне – по населению земноводных всей территории Западной Сибири, включая не только равнинную, но и горную часть этого региона. Для этого привлечены все собранные к настоящему времени материалы (рис. 1).

Методы

Анализ материалов включал поэтапную кластеризацию всей совокупности обследованных сообществ с использованием программы факторной классификации – качественного аналога метода главных компонент (Трофимов, 1976; Равкин, Ливанов, 2008). При этом объединение классифицируемых объектов (пространственных вариантов населения) в группы (типы и подтипы населения) осуществлялось вне зависимости от их местоположения, исключительно по степени сходства-различия между собой, оцениваемого коэффициентом Жаккара (Jaccard, 1902) для количественных признаков (Наумов, 1964). Помимо факторной классификации для кластеризации дополнительно использовали метод К-средних (Миркин, 2011). При этом из состава населения были

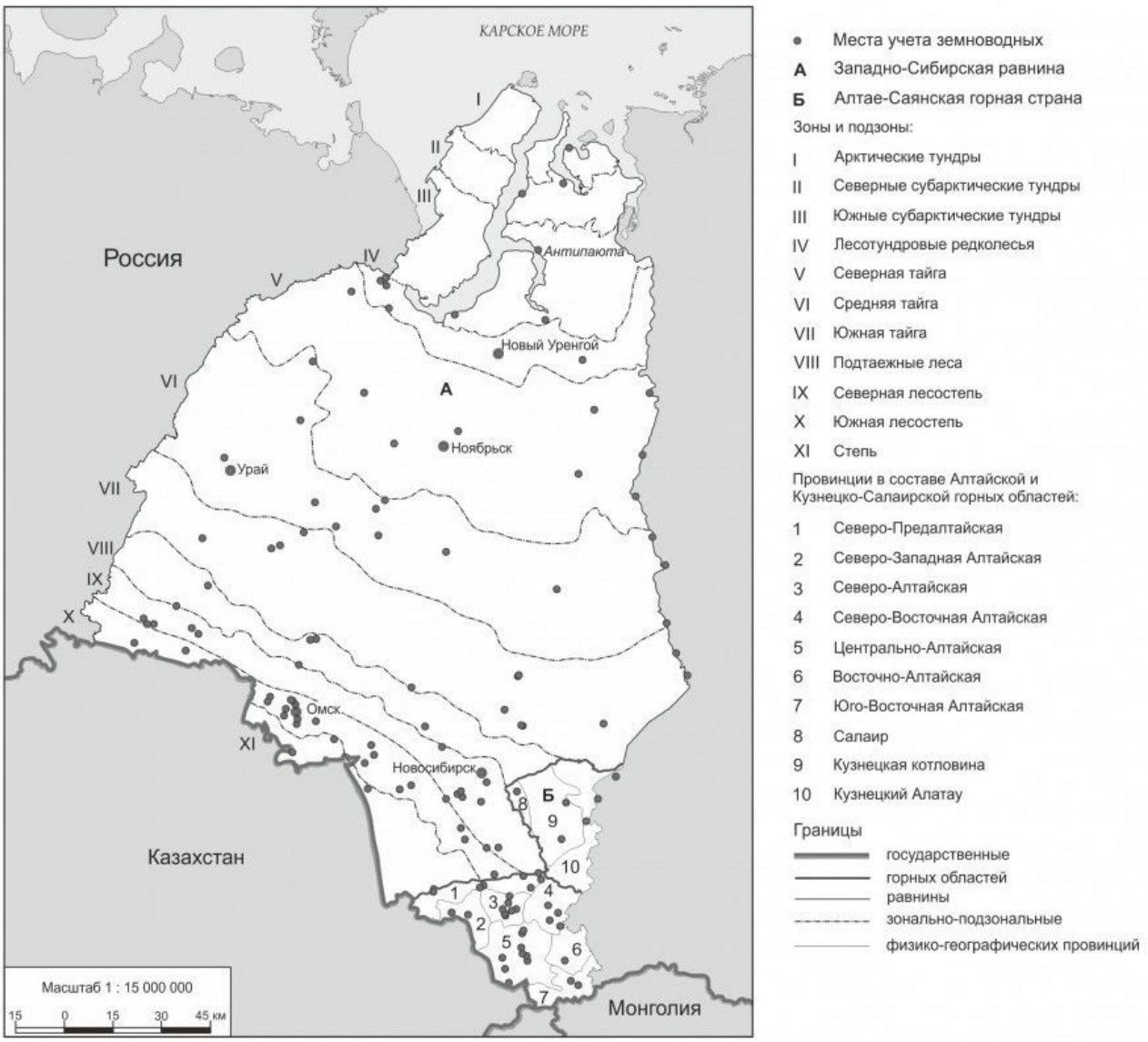


Рис. 1. Места проведения учетов земноводных на территории Западной Сибири
Fig. 1. Amphibian accounting sites in Western Siberia

исключены сеголетки, поскольку их обилие сильно зависит от близости ловчих канавок и заборчиков к локальным водоемам выплода, не отображаемым в масштабе использованных нами карт.

Информативность классификаций, структурных графов и коррелятивных связей между изменчивостью населения земноводных и факторами внешней среды оценивалась с помощью качественной линейной аппроксимации матриц связи (Куперштох и др., 1978) – качественного аналога регрессионной модели. Показателем информативности служила доля исходной дисперсии (квадрат отклонения от среднего по всей матрице) коэффициентов сходства, учтенная отдельно каждым таксоном классификации и всей их совокупностью.

В процессе анализа возникли затруднения при интерпретации получаемых разбиений, что во многом связано со значительно возросшим объемом используемых материалов. Такая проблема неоднократно встречалась нам и ранее при работе с большими выборками. В классической статистике считается, что с накоплением анализируемых данных надежность результатов расчета возрастает. Мы же столкнулись с противоположным явлением, когда с увеличением объема материала увеличивалась ошибка выборочности (Равкин и др., 2022; 2023а, б). Это обусловлено тем, что по мере увеличения объема данных в выборке постепенно накапливается количество промежуточных сообществ, иллюстрирующих континуальность изменений. Это, в свою очередь, ос-

ложняет, а иногда и вовсе препятствует предметному объяснению состава групп, выделенных при кластерном анализе. Вторая причина затруднений при обобщении большого объема данных заключается в несовершенстве алгоритма используемых программ, в частности из-за наличия программных ограничений на количество анализируемых проб. Помимо этого, в выборке, несомненно, накапливаются погрешности и отличия, связанные с особенностями методики учета и описания местообитаний при использовании материалов, собранных нашими предшественниками.

Следует также упомянуть о проблеме с интерпретацией так называемых нулевых проб, т. е. местообитаний, где земноводных во время учета не обнаружили. Наличие таких «пустых» проб может быть обусловлено либо очень малой вероятностью встречи земноводных при низкой численности, либо с их реальным отсутствием во время проведения учета из-за экстремальности условий среды обитания. При этом зачастую неясно, каким следует считать сходство местообитаний, в которых земноводные во время учета не обнаружены: стопроцентным или же нулевым. При нулевом варианте сходства эти пробы образуют веер абсолютно не сходных между собой одиночных кластеров, хотя, руководствуясь экспертным мнением, часть из них следует объединять в одну группу местообитаний, заведомо непригодных для обитания исследуемых животных.

Наличие нулевых показателей обилия не только не позволяет применять стандартные методы оценки достоверности различий между средними вариантами населения, но и может исказить сами различия. Это обусловлено дополнительным сходством, возникающим между выборками, содержащими большое количество нулевых значений обилия. Чтобы избежать подобных искажений, варианты населения с нулевыми значениями обилия, как правило, исключают из расчетов. Однако необходимо учитывать, что в случае заведомой непригодности условий среды для обитания земноводных нулевые значения обилия это только подтверждают, и результаты учета в таких местах необходимо использовать в общем анализе материалов. Поэтому нами нули были исключены из расчетов с соответствующим уменьшением объема выборки только при оценке достоверности различий в распределении подобных видов и кластеризации сообществ. Во всех прочих расчетах к каждому варианту населения добавляли «фиктивный вид» с обилием 0.0001. Это делалось для того, чтобы все нулевые пробы стали на 100 % похожими и объединились в один кластер, в соответствии с умозрительными представлениями о причинах сходства этих вариантов населения.

Перечисленные выше недостатки иногда удается преодолеть, усреднив исходные показатели обилия по группам растительных формаций, выделенным в монографии (Ильина и др., 1985), с пояснительным текстом к карте (Растительность Западно-Сибирской равнины, 1976) в масштабе 1:1500000. В качестве примера можно привести группу формаций «Среднетаежные елово-кедровые леса и производные сообщества на их месте», объединяющую 7 выделов карты растительности под номерами 72–79. Именно такой подход мы использовали при анализе собранных материалов, однако ни одно из кластерных разбиений не удалось удовлетворительно интерпретировать. Поэтому был применен новый подход – с «экспертной кластеризацией», выполненной абсолютно умозрительно, но с учетом наличия хорошо интерпретируемых кластеров, полученных во всех разбиениях на предыдущих этапах анализа.

При анализе пространственно-временной динамики населения использованные материалы разделены сначала на два равных временных отрезка по 26 лет, с количеством проб 925 и 698, а затем таким образом, чтобы число проб в подвыборках различалось как можно меньше. В результате чего получилось 798 и 825 проб (соответственно с 1970 по 1989 г. и с 1990 по 2022 г.). Оценка достоверности различий выполнена по t-критерию Стьюдента с поправками Бонферрони и Бенджамини – Хохберга на множественность сравнений (Наркевич и др., 2020). По критерию Стьюдента различия достоверны, если вероятность случайного получения оценки по этому показателю не превышает 5 % (≤0.05). Поправку Бонферрони считают при учете множественности сравнений наиболее жесткой, а Бенджамини – Хохберга – наименее консервативной. Для каждой поправки различия достоверны, если скорректированная оценка достоверности ≤0.05.

Доверительные интервалы приведены по Е. С. Равкину и Н. Г. Челинцеву (1990) в несимметричном варианте. Вычисления произведены в основном с помощью пакетов PAST4 (Hammer et al., 2001) и Jacobi4 (Polunin

et al., 2019). Относительная ошибка приведена как показатель надежности рассчитанных значений, а доверительные интервалы указаны только при описании временной динамики численности, поскольку по распределению достоверность различий не обсуждается.

Для оценки численности земноводных показатели их обилия умножены на площади местообитаний, рассчитанные по упоминавшейся выше карте «Растительность Западно-Сибирской равнины» и электронному варианту ландшафтной карты в масштабе 1:1 000 000 (Геоинформационная система Алтае-Саянского экорегиона, 2001).

Балльные оценки обилия приведены в границах, рекомендованных А. П. Кузякиным (1962), с добавлением верхних и нижних градаций (табл. 1).

Таблица 1. Балльные оценки обилия видов земноводных

Градация обилия	Число особей на единицу пересчета
Чрезвычайно многочисленные	1000 и более
Весьма многочисленные	100–999
Многочисленные	10–99
Обычные	1–9
Редкие	0.1–0.9
Очень редкие	0.01–0.09
Чрезвычайно редкие	менее 0.01

По литературным данным, в Западной Сибири обитает 11 видов земноводных (Kuranova et al., 2016), включая выделенные на основании сравнительно недавних молекулярно-генетических исследований три вида зеленых жаб и два вида озерных лягушек (Simonov et al., 2022). В данной статье эти виды рассматриваются как комплексы генетически близких форм – комплекс *Bufotes viridis* (Laurenti, 1768) и комплекс *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771). Поскольку за время сбора материалов представления об объеме видов существенно изменились, на основании собранных данных невозможно судить о распределении и численности отдельных видов, входящих в состав каждого комплекса. Кроме того, за 52 года проведения учетных работ на обследованной территории нами ни разу не встречена травяная лягушка *Rana temporaria* Linnaeus, 1758. Таким образом, в статье представлена информация о двух видовых комплексах и 6 видах земноводных, видовые и родовые названия которых даны по Е. А. Дунаеву и В. Ф. Орловой (2017).

Результаты

Распределение

Сибирский углозуб *Salamandrella keyserlingii* Dybowski in Dybowski et Godlewski, 1870 на равнине предпочитает пойменные ландшафты долин крупных рек и их притоков (в среднем за лето 721 особь/км^2). В полтора раза меньшие показатели его обилия отмечены на низинных и переходных (эвтрофных и мезотрофных) болотах вне пойм, и почти втрое меньшие – во внепойменных естественных и сельскохозяйственных суходольных ландшафтах. На верховых (олиготрофных) болотах углозуба в 14 раз меньше, чем на низинных и переходных болотах. По сравнению с верховыми болотами даже в поселках и застроенных садах средний уровень его обилия несколько выше (табл. 2).

Таким образом, по принятой шкале обилия углозуб на равнине характеризуется как весьма многочисленный вид в поймах, на переходных и низинных болотах, а также на суходолах, исключая селитебные территории. На верховых болотах, в поселках и застроенных садах он многочислен, а в городах ни разу не встречен. В горной части региона углозуб многочислен в среднем по предгорьям, включая как собственно предгорные ландшафты, так и мелкосопочные, горно-долинные, а также межгорно-котловинные, расположенные среди предгорий, на том же уровне абсолютных высот. В каких-либо местообитаниях за пределами этого высотного уровня его не встречали.

Таблица 2. Среднее обилие земноводных по группам равнинных и горных ландшафтов Западной Сибири, особей/км^2

Группа ландшафтов	Сибирский углозуб	Обыкновенный тритон	Чесночница	Серая жаба	Зеленая жаба	Озерная лягушка	Сибирская лягушка	Остромордая лягушка	Всего
Внепойменные суходолы (кроме застроенных)	208	32	89	1452	10	1.8	32	4203	6028
Поймы	721	45	1579	504	0	195	1156	26520	30720
Болота внепойменные низинные и переходные	488	286	79	4438	4	0	712	27243	33251
Болота верховые	35	4	0	7985	0	0	5	5926	13956
Поселки и застроенные сады	47	2	1006	1185	0	0	82	3970	6291
Города	0	0	0	0	0	0	0	1192	1192
В среднем по равнинной части региона	272	54	344	1964	6	25	241	9293	12200
Доля от общего обилия в равнинной части региона, %	2	0.4	2.8	16	0.1	0.2	2	76	100
Высокогорья	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Среднегорья	0	0	0	50	0	0	0	202	253
Низкогорья	0	10	0	2866	0.3	3	0	1751	4629
Предгорья	12	0	0	526	0	124	0	8120	8782
В среднем по горной части региона	2	4	0	1215	0.1	26	0	2341	3588
Доля от общего обилия в горной части региона, %	0.06	0.1	0	34	0.003	0.7	0	65	100

Обыкновенный тритон *Lissotriton vulgaris* (Linnaeus, 1758) многочислен на суходолах, в поймах, на внепойменных низинных и переходных болотах. На верховых болотах, в поселках и застроенных садах он обычен, а в городах его не встречали. В горной части региона тритон отмечен только в низкогорьях, т. е. в условной группе ландшафтов (низкогорных, горно-долинных, мелкосопочных и межгорно-котловинных), занимающих абсолютные высоты до 1000 м. В среднем по группе ландшафтов низкогорного яруса он характеризуется как многочисленный вид.

Обыкновенная чесночница *Pelobates fuscus* (Laurenti, 1768) найдена только в западной приуральской части равнины – в Тоболо-Ишимской лесостепи и степи. Наибольший уровень ее обилия зарегистрирован в поймах, где она чрезвычайно многочисленна даже в среднем, в пересчете на всю площадь пойменных ландшафтов в пределах Западно-Сибирской равнины. Как весьма многочисленный вид со средним обилием всего лишь в 1.6 раза меньшим, чем в поймах, она характерна для поселков и застроенных садов. На внепойменных суходолах, а также на низинных и переходных болотах чесночница многочисленна, а на очень редко встречающихся в Тоболо-Ишимской лесостепи и незначительных по

площади участках реликтовых верховых болот не обнаружена, так же как и в городах.

Обыкновенная серая жаба *Bufo bufo* (Linnaeus, 1758) чрезвычайно многочисленна в большинстве рассматриваемых групп равнинных ландшафтов, многочисленна в поймах и не встречена в городах. При этом ее обилие неуклонно сокращается по направлению от верховых болот к внепойменным низинным и переходным (почти вдвое) и далее – к суходолам (примерно втрое), поселкам и застроенным садам (в 1.2 раза), а затем – в поймах (в 2.3 раза). В горах серая жаба чрезвычайно многочисленна в группе ландшафтов низкогорного высотного яруса. В предгорьях средний уровень ее обилия почти вчетверо ниже, здесь она весьма многочисленна. В среднегорьях, на абсолютных высотах от 1000 до 2000 м, серая жаба многочисленна, несмотря на резкое сокращение ее обилия в 57 раз, а в высокогорьях (более 2000 м над уровнем моря) при проведении учета она не обнаружена.

Зеленые жабы комплекса *Bufotes viridis* (Laurenti, 1768) в равнинной части региона встречаются в Тоболо-Ишимской (Курганская область) и Приобской лесостепи (Новосибирск и его окрестности). При этом во время учетов в Курганской области в 1981–1985 гг. зеленые жабы не были обнаружены, несмотря на широкий охват территории (материалы В. П. Старикова, а также В. Н. и Т. К. Блиновых в Банке данных ИСиЭЖ СО РАН, далее – БД). Тем не менее в литературе имеются сведения о находках не менее 100 особей зеленой жабы во многих районах Курганской области, на основании чего ее относят к категории редких видов на северной границе ареала (Стариков, 1986, 2002; Ищенко, 2012; Simonov et al., 2022). По-видимому, это свидетельствует об активном расселении в северном направлении зеленых жаб, обитающих в степной зоне, в пределах примыкающей с юга Кустанайской области Казахстана. Так, по результатам учетов, проведенных В. Н. и Т. К. Блиновыми в 1986 г. на трех степных участках в Кустанайской области (материалы БД), в подзоне северной степи, в 50 км к югу от границы с Курганской областью (с. Аксуат), зеленые жабы не обнаружены. На втором ключевом участке в 160 км южнее Аксуата (с. Новонежинка), в подзоне средней степи, они найдены в большом количестве на тростниково-осоковых болотах (120 особей/км^2), в степных местообитаниях (210–420) и крупных поселках (1500 особей/км^2). На третьем участке, расположенном в 100 км к югу от второго, в подзоне южной степи (Наурзумский заповедник), зеленые жабы встречались почти повсеместно, за исключением песчано-ковыльных целинных степей, с очень высоким обилием в пределах от 2000 особей/км^2 в сухих сосновых островных лесах до 94000 особей/км на тростниково-рогозовых болотах (займищах).

Локальная новосибирская популяция, обнаруженная в 1984 г. в северной лесостепи Приобья (Золотаренко, 1985), существует до настоящего времени и, по-видимому, процветает, поскольку значительно расширилась в своем распространении. По данным учетов 2003–2004 гг., показатели обилия зеленых жаб достигали на внепойменных суходолах 7029 тыс. особей/км^2, а на внепойменных болотах – 437 особей/км^2.

В горной части региона зеленая жаба зарегистрирована нами как редкий вид, обнаруженный только в пределах низкогорий. Но, судя по литературным данным, этих жаб неоднократно находили и в среднегорьях (Яковлев, 1999; Litvinchuk et al., 2010).

Озерные лягушки комплекса *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771) в равниной части региона широко распространены по долинам Оби, Иртыша и крупных притоков этих рек. К настоящему времени по долине Оби они расселились от Алтая до Новосибирска и далее, по-видимому, до Томска (Kuranova et al., 2016). По долине Иртыша обстоятельно прослежено их расселение от Усть-Каменогорска до Павлодара (Каптенкина и др., 2022) и далее до границы с Россией. В 2002 г. эти лягушки были отмечены в пойме Иртыша в Омске (личное сообщение С. А. Соловьёва). По результатам проведенных учетов они обычны на внепойменных суходолах и весьма многочисленны в пойменных ландшафтах. Даже в целом по равнинной части региона средний уровень их обилия достигает 25 особей/км^2. В горной части региона они приурочены преимущественно к пойменным долинам, при этом обычны в пределах низкогорий и многочисленны в предгорьях. Средний уровень их обилия на горной территории примерно такой же, как и на равнине, – 26 особей/км^2.

Сибирская лягушка *Rana amurensis* Boulenger, 1886 чрезвычайно многочисленна только в поймах равнинных рек и весьма многочисленна на внепойменных низинных и переходных болотах. На суходолах, в поселках и застроенных садах она многочисленна, а на верховых болотах обычна. Не обнаружена *R. amurensis* лишь в городах на

равнине, а также в горной части региона.

Остромордая лягушка *Rana arvalis* Nilsson, 1842 чрезвычайно многочисленна как в среднем по территории Западно-Сибирской равнины, так и во всех рассматриваемых группах ландшафтов. При этом наиболее велики показатели ее обилия на внепойменных низинных и переходных болотах, а также в поймах рек. Далее прослеживается сокращение среднего уровня ее обилия примерно в 5–6 раз на верховых болотах и на суходолах, включая поселки и застроенные сады, а затем еще почти вчетверо – в городах. В горной части региона остромордая лягушка чрезвычайно многочисленна в среднем по группам ландшафтов от предгорного до низкогорного уровня и многочисленна в среднегорьях. При этом с подъемом в низкогорья ее обилие сокращается вчетверо, при переходе к среднегорьям – еще примерно в 9 раз.

Таким образом, на равнине в пределах от степной зоны вплоть до подзональной полосы южных субарктических тундр максимальные показатели суммарного обилия земноводных характерны для внепойменных низинных и переходных болот, а также пойменных долин крупных рек, где средняя плотность населения превышает 30 тысяч особей/км^2. Кроме того, чрезвычайно многочисленны земноводные на верховых болотах, хотя средний уровень их суммарного обилия здесь вдвое ниже, чем на прочих заболоченных территориях. По сравнению с этими, очевидно, оптимальными для земноводных ландшафтами, в 2–6 раз менее плотно заселены внепойменные суходолы, поселки, застроенные сады и особенно города (в 12–28 раз). В целом на Западно-Сибирской равнине больше всего остромордой лягушки. По суммарному обилию всех земноводных на ее долю приходится 76 %. На втором месте по этому показателю – серая жаба (16 %). Второстепенны по долевому участию в населении – чесночница (3 %), сибирский углозуб и сибирская лягушка (по 2 %). На последних местах – зеленые жабы, озерные лягушки и обыкновенный тритон (0.1–0.4 %).

В горной части региона, как и на равнине, больше всего остромордой лягушки и серой жабы (в среднем 2341 и 1215 особей/км^2), составляющих по обилию соответственно 65 и 34 % населения земноводных, так что на долю всех остальных вместе взятых видов земноводных приходится менее 1 %. Остромордая лягушка явно предпочитает ландшафты предгорного высотного уровня (8120 особи/км^2), где чаще всего встречаются, особенно в межгорных котловинах, низинные и переходные болота, а также заболоченные участки пойменных долин. В низкогорьях средний уровень ее обилия уменьшается почти в 5 раз, а в среднегорьях отмечено более резкое сокращение – еще в 9 раз. Серой жабы больше всего в низкогорьях (2866 особей/км^2), в 5 раз меньше в предгорьях (526) и сравнительно мало в среднегорьях (50 особей/км^2).

Пространственная неоднородность населения

По итогам анализа всех имеющихся материалов учета составлена классификация сообществ земноводных Западной Сибири, которая включает три типа населения. При этом первые два типа выделяются однозначно по результатам кластеризации, а вот формирование третьего типа населения и его разбиение на подтипы выполнено экспертно, поскольку результаты кластерного разбиения были неоднозначны и плохо интерпретировались.

Первый тип населения – **полярно-высокогорный** – объединяет те местообитания, где земноводные не встречены из-за экстремальности условий существования. Это все высокогорные ландшафты, полярные пустыни и все равнинные тундры, за исключением южных субарктических.

Второй – **лесотундровый** – тип населения включает сообщества южных субарктических тундр, лесотундры и темнохвойных лесов в северной и средней тайге, а также в среднегорьях. Во всех перечисленных местообитаниях складываются пессимальные условия для обитания земноводных, что отражено невысокими показателями суммарного обилия и видового богатства. Здесь встречено всего 3 вида – остромордая лягушка, серая жаба и сибирский углозуб, а плотность населения земноводных не превышает 4 особей/100 ц/с.

Третий – **температный** – тип населения представлен сообществами земноводных, населяющих местообитания с субоптимальными и оптимальными условиями существования. К нему отнесена группировка из всех прочих сообществ, не вошедших в первые два типа, дополнительно разделенная на 4 подтипа в соответствии со степенью сходства включенных в их состав вариантов населения.

Информативность классификации, рассчитанная по исходным данным, почти нулевая (0.06 %), а по усредненным показателям обилия с использованием и нулевых значений – 2 % (коэффициент множественной корреляции 0.12). Информативность структурных представлений по средним показателям обилия на 1 км^2 равна 8 % дисперсии на матрице коэффициентов сходства. Из выявленных факторов среды, коррелирующих с неоднородностью сообществ земноводных, наиболее значимо расстояние до водоемов выплода, учитывающее 18 % дисперсии сходства. Это связано с обилием сеголеток, которые рассредоточиваются после выхода на сушу, и обилие их уменьшается по мере удаления от мест выплода. Влияние теплообеспеченности, по сравнению с удаленностью от водоемов выплода, в 1.2 раза меньше. Еще меньше степень корреляции с увлажнением (в 2.6 раза). Связь с типом растительности, макрорельефом (равнина – горы) и составом лесообразующих пород невелика (1–5 % дисперсии) и минимальна с застроенностью территории (0.4 %). Последнее связано в основном с незначительной площадью и количеством селитебных местообитаний в выборке. Всего этими факторами можно объяснить 29 % сходства (множественный коэффициент корреляции 0.54). Суммарная коррелятивная связь выявленных факторов и структурных представлений с пространственной неоднородностью населения равна соответственно 31 % и 0.56.

Составленная классификация использована для построения графа, отображающего (на уровне тенденций) связь пространственной изменчивости населения земноводных с ведущими (структурообразующими) факторами среды (рис. 2).

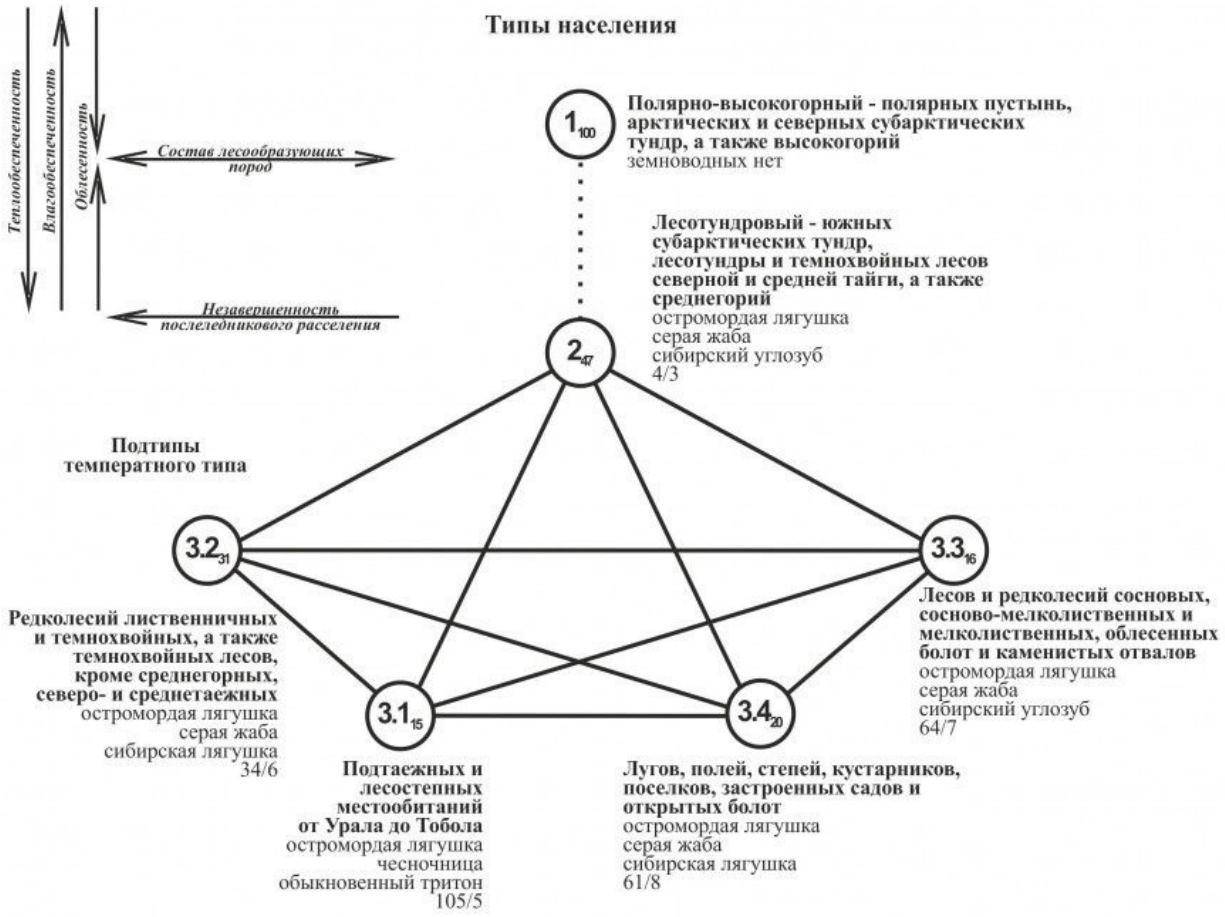


Рис. 2. Граф сходства населения земноводных Западной Сибири (3.2–3.4 – без подтаежных и лесостепных местообитаний от Урала до Тобола)

Fig. 2. Graph of the similarity of the amphibian population of Western Siberia (3.2–3.4 – excluding subtaiga and forest-steppe habitats from the Urals to Tobol)

Крупные цифры внутри кружков соответствуют номерам типов и подтипов населения земноводных. Мелкими цифрами в виде подстрочного знака показана средняя величина внутригруппового сходства (в процентах) вошедших в таксон проб. Рядом с кружками приведено название таксона классификации (см. текст), перечислены вошедшие в него группы сообществ, лидирующие по обилию виды и указаны суммарная плотность населения земноводных в количестве особей на 100 ц/с, а также число встреченных видов. Сплошными линиями, соединяющими кружки, показаны все значимые связи (>16 % сходства) между типами / подтипами населения. Нулевое сходство обозначено пунктирной линией. Стрелками в левом верхнем углу рисунка показаны факторы среды, коррелирующие с векторами изменения населения земноводных.

В целом, структура территориальных различий в населении земноводных, на наш взгляд, в значительной степени связана с изменением гидротермического режима (на усредненном уровне: зонально-подзональном для равнины и высотно-поясном для гор), определяющего степень благоприятности условий среды. Для обобщения и визуализации в реальном географическом пространстве представления о пространственной дифференциации населения земноводных, сложившегося в результате анализа данных в многомерном факторном пространстве, составлена соответствующая карта (рис. 3). В качестве легенды к ней также использована изложенная выше классификация населения земноводных.

На карте видны три широтные полосы, занятые вышеописанными типами населения земноводных. Самая обширная первая полоса с температным типом населения объединяет все равнинные территории с наиболее благоприятными для земноводных условиями среды: степную и лесостепную зоны, а также подзону южной тайги. По открытым болотам и поймам крупных рек этот тип населения проникает вплоть до южных субарктических тундр. Вторая полоса с лесотундровым типом населения охватывает южные субарктические тундры, лесотундровые редколесья, а также темнохвойные леса северной и средней тайги, где складываются пессимальные условия для обитания земноводных. Самая северная третья полоса включает полярные пустыни, арктические и северные субарктические тундры, где постоянное население земноводных отсутствует из-за экстремальности условий обитания.

В горах, где наблюдается высотно-ярусная дифференциация населения земноводных, температный тип занимает предгорно-низкогорный ярус с проникновением в среднегорья преимущественно по речным долинам. Распространение лесотундрового типа населения ограничено среднегорьями, тогда как в высокогорьях постоянное население земноводных отсутствует.

Численность и динамика плотности населения земноводных

Суммарная численность земноводных Западной Сибири составляет, по нашим расчетам, порядка 24 млрд особей. Подавляющее большинство земноводных обитает на равнине (97 %), при этом почти половина из них (44 %) занимает территорию средней тайги (табл. 3).

Мы сопоставили обилие земноводных в южной тайге Прииртышья и Приобья по трем временным отрезкам: 1 – 1970, 1971 гг.; 2 – 1990, 1991; 3 – 2005, 2006, 2012 и 2013 гг. Судя по данным метеослужбы г. Томска, расположенного в южной тайге, во второй и третий периоды температура воздуха в летнее время была выше, чем в первый отрезок, на 1 °С (14 °С в первый и по 15 °С во второй и третий периоды). Количество осадков было ниже соответственно на 11 и 9 мм (72; 56 и 63 мм), т. е. уменьшилось в 1.2 раза. Под Новосибирском, в Шлюзовском бору на границе лесостепи и подтаежных лесов, в 2016–2018 гг. при сходной теплообеспеченности и при увеличении увлажнения (в среднем на 13 мм) обилие земноводных в целом за два последних года возросло (Равкин и др., 2020).

Если допустить, что снижение количества осадков меняет обилие земноводных в той же степени, то плотность их населения в южной тайге по аналогии должна была уменьшиться в 1.4 и 1.3 раза. То есть увеличение летних осадков приводит к возрастанию обилия остромордой лягушки и углозуба, а снижение количества осадков – к уменьшению их численности, в основном за счет сеголеток. По-видимому, это связано с сокращением площади водоемов выплода, а иногда и с пересыханием части из них.

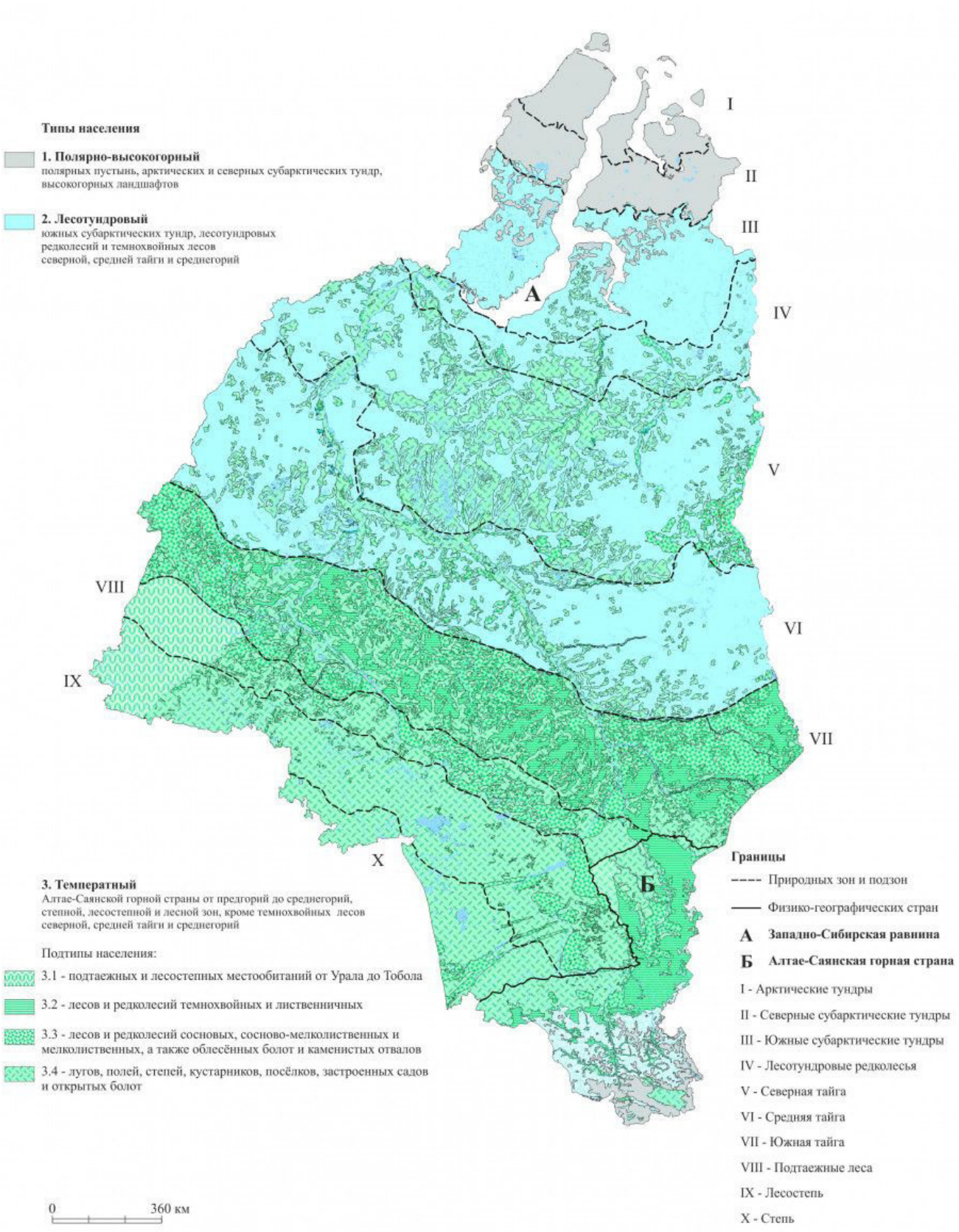


Рис. 3. Население земноводных равнинных и горных территорий Западной Сибири в пределах России (характеристики населения приведены на рис. 2)

Fig. 3. Amphibian population of lowland and mountainous territories of Western Siberia within Russia (population characteristics are shown in Fig. 2)

Таблица 3. Среднее обилие и численность земноводных в Западной Сибири

Зона, подзона (на равнине), высотный уровень группы ландшафтов (в горах)	Особей/км^2	Всего, млн особей
Полярные пустыни, арктические и северные субарктические тундры	0	0
Южные субарктические тундры	13	2
Лесотундра	227	31
Северная тайга	2111	1133
Средняя тайга	1838	10507
Южная тайга	15348	5994
Подтаежные леса	21032	3239
Лесостепь	7679	1984
Степная зона	5920	455
Высокогорья	0	0
Среднегорья	253	13
Низкогорья	4629	366
Предгорья	8782	362
В среднем по равнинной части региона	10092	23345
В среднем по горной части региона	3588	741
В среднем по Западной Сибири	9530	24086

В среднем по Западной Сибири снижение плотности населения земноводных во втором из трех вариантов счета снизилось на 38 %, а в третьем варианте возросло на 9 %. Такое несоответствие, по-видимому, связано с неупорядоченным по годам, природно-географическим зонам и подзонам сбором данных, поскольку материал целенаправленно собирали в первую очередь для решения зоогеографических задач. Попытка избавиться от этого недостатка для увеличения сравнимости не привела к улучшению результата. Надеясь на это, мы сначала рассчитали средневзвешенные показатели с учетом числа проб по годам (табл. 4). Не привел к лучшей сравнимости и переход от количественной к балльной оценке объема летних осадков как основного показателя влагообеспеченности. Для этого существенно меньшими считали значения, вошедшие в последнюю третью или их четвертую часть. Результаты оценки влияния количества осадков были по-прежнему противоречивыми. Например, в южной тайге, при абсолютной сравнимости данных за три периода, с уменьшением количества осадков отмечено достоверное монотонное сокращение обилия общего количества земноводных и остромордой лягушки (Равкин и др., 2020). По всей Западной Сибири снижение обилия тоже было статистически достоверным (табл. 5–7), но аналогичных изменений количества осадков при этом не отмечено. Тем не менее, на наш взгляд, дело все-таки в динамике количества летних осадков.

Для выявления многолетней динамики населения земноводных Западной Сибири все материалы сначала были разделены на два временных отрезка примерно поровну по числу лет: с 1970 по 1996 г. и с 1997 по 2022 г. Затем тоже на два периода, но таким образом, чтобы число анализируемых проб в каждом из отрезков было примерно одинаковым – с 1970 по 1989 г. и с 1990 по 2022 г. Данные по обилию были взяты только по территории, где земноводные обнаружены в сравнительно большом количестве, т. е. исключая полярные острова, тундровую и лесотундровую зоны, а также высокогорья. В итоге остались только пробы по лесной, лесостепной и степной зонам, а также аналогичным высотным поясам в горах. В двух случаях формально достоверное снижение обилия при допущении нормальности распределения, а также по Бонферрони и Бенджамини Бенджамини – Хохберга Хохбергу отмечено у сибирского углозуба, остромордой и сибирской лягушек. В третьем варианте счета формально были достоверны отличия по тем же видам и озерной лягушке. Показатели обилия остромордой лягушки во второй временной отрезок были в 2.7 раза меньше, чем в первый и третий отрезки. Эти отличия достоверны по всем критериям при расчетах как с сеголетками, так и без них. Материалы по чесночнице, сибирскому углозубу и сибирской лягушке по предметным соображениям следует считать

Таблица 4. Количество проб и среднее обилие земноводных по годам в Западной Сибири (без полярных островов, тундр, лесотундры и высокогорий)

Год	Проб	Особей/км^2							
		Сибирский углозуб	Обыкновенный тритон	Обыкновенная чесночница	Зеленая жаба	Серая жаба	Озерная лягушка	Остромордая лягушка	Сибирская лягушка
1970	27	84	0	0	0	59	0	36611	1183
1971	12	2697	0	0	0	17278	0	25356	304
1972	14	261	0	0	0	2116	0	17454	2373
1973	10	420	0	0	0	0	0	11018	0
1975	6	0	0	0	0	13936	0	10254	0
1976	29	0.1	0	0	0	0	0	6319	0
1977	92	54	0	0	0	648	0	6866	0
1978	41	22	36	0	0	696	0	11465	0
1979	19	1970	0	0	0	698	0	9706	789
1980	42	472	0	0	0	425	0	5267	0
1981	66	1016	0	201	0	6346	6	21967	351
1982	42	898	1056	1714	0	570	0	12652	0
1983	48	198	21	442	0	33	0	10082	185
1984	67	6	0	3560	0	2124	0	18076	1046
1985	35	138	0	1653	0	7716	0	5764	0
1986	33	105	27	0	0	3303	0	16905	60
1987	31	0	0	0	0	2510	0	4909	0
1988	35	5	7	0	1.5	2096	0	2228	0
1989	40	0	0	0	0	0	0	797	14
1990	23	741	0	0	0	3879	0	6919	2113
1991	14	839	24	0	0	5381	0	11587	1429
1992	22	791	481	0	0	3802	0	9805	14
1993	26	378	0	0	0	311	0	8082	0
1994	21	187	0	0	0	1334	0	2426	0
1995	15	0	0	0	0	173	0	5157	0
1996	25	19	0	0	0	318	0	2360	0
1997	21	0	0	0	0	449	0	222	0
1998	45	0	0	0	0	682	0	2053	0
1999	29	0	0	0	0	286	0	505	0
2000	38	0	0	0	0	425	769	2529	0
2001	28	0	0	0	0	563	0	818	0
2002	8	0	0	0	0	803	0	1928	0
2003	17	199	0	0	26	474	0	6083	0
2004	24	61	0	0	293	733	0	1494	6
2005	56	139	0	0	0	354	0	3363	0
2006	32	94	172	0	0	790	0	7903	547
2007	33	20	11	0	0	900	0	8389	191
2008	33	0	0	0	0	461	0	1802	0
2009	40	0	0	0	0	502	0	1620	0
2010	37	122	0	0	0	251	0	4460	0
2011	19	0	0	8	0	808	0	1286	0
2012	32	175	0	0	0	5412	0	6981	14
2013	30	82	0	0	0	9785	0	11154	0
2014	31	0	0	0	0	3715	0	893	0
2015	26	0	0	0	0	362	187	5804	0
2016	20	0	14	0	0	499	0	2231	0
2017	7	0	0	0	0	682	0	3777	0
2018	10	0	26	0	0	3232	0	12848	0
2019	9	0	0	0	0	423	0	2197	0
2020	9	0	0	0	0	832	0	1063	0
2021	16	31	0	0	0	393	0	3250	0
2022	13	10	0	0	0	417	0	589	0

Таблица 5. Среднелетнее обилие земноводных (особей/км^2) в Западной Сибири по временным отрезкам за 1970–1989 и 1990–2022 гг. (лесная, лесостепная, степная зоны Западно-Сибирской равнины и соответствующие высотные пояса Алтае-Саянской горной страны)

	1 вариант		2 вариант	
Вид	1970–1996	1997–2022	1970–1989	1990–2022
Сибирский углозуб	300	42	287	104
Обыкновенный тритон	61	9	60	20
Обыкновенная чесночница	717	0.2	868	0.2
Зеленая жаба	201	11	243	9
Серая жаба	1918	1305	1953	1392
Озерная лягушка	0.6	49	1	39
Остромордая лягушка	9642	3526	10500	3921
Сибирская лягушка	270	35	241	108
Всего	13109	4977	14152	5593
Количество проб	966	698	798	866

Таблица 6. Достоверность различий по среднелетнему обилию земноводных в Западной Сибири в 1970–1989 и 1990–2022 гг. (по формальным и предметным критериям)

	Критерий			
Вид	ttest	при допущении нормальности распределения	Бонферрони	Бенджамини – Хохберга
Сибирский углозуб	2.52	0.01	0.11	0.03
Обыкновенный тритон	1.00	0.32	2.86	0.4
Обыкновенная чесночница	4.72	0.000003	0.00002	0.000008
Зеленая жаба	1.85	0.06	0.57	0.1
Серая жаба	0.98	0.33	2.95	0.3
Озерная лягушка	1.83	0.07	0.61	0.1
Остромордая лягушка	6.27	0.0000000005	0.000000004	0.000000002
Сибирская лягушка	1.49	0.14	1.22	0.2
Всего	6.51	0.0000000001	0.0000000009	0.0000000009

Примечание. В табл. 6 и 7 жирным шрифтом показаны достоверные отличия.

Таблица 7. Достоверность различий обилия земноводных в Западной Сибири в 1970–1996 и 1997–2022 гг. (в среднем за лето)

	Критерий			
Вид	ttest	при допущении нормальности распределения	Бонферрони	Бенджамини – Хохберга
Сибирский углозуб	3.509045	0.00046171	0.00369368	0.00092342
Обыкновенный тритон	1.275195	0.20241858	1.61934866	0.20241858
Обыкновенная чесночница	3.844877	0.00012516	0.00100131	0.00033377
Зеленая жаба	1.484607	0.13783767	1.10270137	0.15752877
Серая жаба	1.05902	0.28974452	2.31795618	0.25755069
Озерная лягушка	2.255846	0.02420992	0.19367939	0.0322799
Остромордая лягушка	5.746196	0.00000001	0.00000009	0.00000004
Сибирская лягушка	2.608553	0.00917416	0.07339329	0.01467866
Всего	6.096177	0.000000001	0.00000001	0.00000001

«дефектными». По чесночнице – поскольку она встречается только на западе региона, до Ишима, а эта территория была обследована лишь в первый отрезок (с 1981 по 1986 г.). Численность озерных лягушек, впервые отмеченных нами при учете земноводных в лугово-степных низкогорьях Северного Алтая в 1981 г., постепенно нарастала по мере их продвижения по долине Оби в северном направлении, поэтому неудивительно, что средний уровень их обилия во второй период оказался более высоким. Сибирская лягушка встречается только в поймах крупных рек. К северу ее становится меньше. В этом же направлении по годам поочередно нами были проведены учеты земноводных, что, возможно, и увеличило степень корреляции ее обилия с зональной теплообеспеченностью. В Западной Сибири от северной тайги до Ледовитого океана сибирская лягушка не встречена. Поэтому данные, собранные нами по этому виду, видимо, непригодны для расчета динамики численности по отдельным годам. То же самое можно сказать об обилии сибирского углозуба, которое уменьшается к северу. Кроме того, очень высокое обилие этого вида прослежено только один раз в южнотаежной пойме Иртыша, где ловчая канавка была расположена около водоема выплода.

Итак, и по формальным, и по предметным соображениям можно говорить о достоверности различий только для остромордой лягушки. Уменьшение ее численности, по-видимому, связано со снижением количества осадков в летний период. Статистически недостоверное, но существенное снижение обилия отмечено, кроме того, у серой жабы – достаточно многочисленного вида.

Заключение

Максимальное обилие земноводных на Западно-Сибирской равнине свойственно внепойменным низинным и переходным болотам. В поймах крупных рек оно немного ниже из-за отрицательного влияния половодий. Кроме того, чрезвычайно многочисленны земноводные и на верховых болотах, хотя средний уровень их обилия здесь как минимум вдвое ниже, чем на прочих заболоченных территориях в связи с обеднением минерального питания фитоценозов и кормности. В 5–6 раз меньше земноводных на суходолах, в поселках, застроенных садах и в 28 раз меньше в городах.

Больше всего на Западно-Сибирской равнине остромордой лягушки. На ее долю приходится 65 % численности всех земноводных. На втором месте – серая жаба (34 %). В горах численно преобладают эти же два вида. Остромордая лягушка предпочитает здесь ландшафты предгорного уровня высот, особенно пойменные речные долины, где сравнительно много заболоченных участков. В низкогорьях обилие этой лягушки уменьшается пятикратно, а в среднегорьях – еще в 8 раз, сокращаясь до минимального уровня (202 особи/км^2). Описанный тренд вполне соответствует давно сложившемуся представлению об уменьшении обилия земноводных и большинства других животных по мере подъема в горы из-за закономерного уменьшения температуры воздуха, тем самым без всяких расчетов наглядно подтверждая наличие коррелятивной связи между плотностью населения и теплообеспеченностью территории. Серой жабы больше всего в низкогорьях, в 5 раз меньше в предгорьях и в 57 раз меньше в среднегорьях. Таким образом, связь с теплообеспеченностью в зависимости от высоты местности у серой жабы менее выражена по сравнению с остромордой лягушкой. Суммарная связь выявленных факторов и структурных представлений по земноводным с пространственной неоднородностью их населения объясняет 31 % дисперсии коэффициентов сходства, коэффициент множественной корреляции – 0.56.

Суммарная численность земноводных в Западной Сибири достигает, по нашим расчетам, примерно 24 млрд особей, при этом 97 % их населения занимает равнинную часть региона. Больше всего амфибий обитает в лесной зоне, в подзоне средней тайги, где сосредоточена почти половина (44 %) населения земноводных Западной Сибири.

По формальным (полученным статистически) и предметным (умозрительным) соображениям можно говорить о достоверности межгодовых отличий в обилии по выделенным периодам только у остромордой лягушки. Уменьшение ее численности связано со снижением количества осадков в летний период. Существенное, хотя и статистически недостоверное снижение обилия отмечено, кроме того, у серой жабы – достаточно многочисленного вида.

Библиография

Борисович О. Б., Цыбулин С. М., Торопов К. В., Фомин Б. Н., Граждан К. В., Богомолова И. Н. Земноводные и пресмыкающиеся равнинных и предгорно-низкогорных ландшафтов Верхнего Приобья // Сибирский экологический журнал. 2002. Т. 9, № 4. С. 425–440.

Геоинформационная система Алтае-Саянского экорегиона. М.: ИГЕМ РАН – WWFRussia, 2001.

Дунаев Е. А., Орлова В. Ф. Земноводные и пресмыкающиеся России: Атлас-определитель. М.: Фитон XXI, 2017. 328 с.

Западная Сибирь. М.*:* Изд-во АН СССР, 1963. 488 с.

Золотаренко Г. С. О нахождении зеленой жабы в окрестностях Новосибирска // Вопросы герпетологии: Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции. Л.: Наука, 1985. С. 80–81.

Ильина И. С., Лапшина Е. И., Лавренко Н. Н., Мельцер Л. И., Романова Е. А., Богоявленский Б. А., Махно В. Д. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. 251 с.

Ищенко В. Г. Зеленая жаба // Красная книга Курганской области. Изд. 2-е. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2012. С. 93.

Каптёнкина А. Г., Дуйсебаева Т. Н., Ахмеденов К. М., Хромов В. А., Крайнюк В. Н., Саржанов Ф., Стариков С. В., Тарасовская Н. Е., Тимошенко А. Ю., Титов С. В. Ареал озерных лягушек (комплекс *Pelophylax ridibundus*, Amphibia, Ranidae) // Труды Зоологического института РАН. 2022. Т. 326, № 3. С. 211–238.

Кузякин А. П. Зоогеография СССР // Ученые записки Московского областного педагогического института им. Н. К. Крупской. 1962. Т. 59. С. 3–182. (Биогеография. Вып. 1).

Куперштох В. Л., Трофимов В. А., Равкин Ю. С. Пространственная организация населения птиц // Равкин Ю. С. Птицы лесной зоны Приобья. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. С. 253–269.

Куранова В. Н., Ярцев В. В. Биоразнообразие Томского Приобья. Земноводные и пресмыкающиеся. Томск: Издательский дом Томского гос. ун-та, 2020. 148 с.

Миркин Б. Г. Методы кластер-анализа для поддержки принятия решений: Обзор WP/7/2011/03. М.: Изд. дом НИУ ВШЭ, 2011. 88 с.

Наумов Р. Л. Птицы в очагах клещевого энцефалита Красноярского края: : Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1964. 19 с.

Наркевич А. Н., Виноградов К. А., Гржибовский А. М. Многочисленные сравнения в биомедицинских исследованиях: проблема и способы решения // Экология человека. 2020. № 10. С. 54–64.

Равкин Е. С., Челинцев Н. Г. Методические рекомендации по комплексному маршрутному учету птиц. М.: ВНИИприрода, 1990. 33 с.

Равкин Ю. С., Вартапетов Л. Г., Юдкин В. А., Покровская И. В., Богомолова И. Н., Цыбулин С. М., Блинов В. Н., Жуков В. С., Добротворский А. К., Блинова Т. К., Стариков В. П., Ануфриев В. М., Торопов К. В., Соловьёв С. А., Тертицкий Г. М., Шор Е. Л. Пространственно-типологическая структура населения земноводных Западно-Сибирской равнины // Сибирский экологический журнал. 2003а. № 5. С. 603–610.

Равкин Ю. С., Ефимов В. М., Кокорина И. П., Чеснокова С. В., Лялина М. И. Пространственно-временная неоднородность населения пресмыкающихся Западной Сибири // Зоологический журнал. 2023б. Т. 102, № 9. С. 1046–1058.

Равкин Ю. С., Куранова В. Н., Цыбулин С. М., Богомолова И. Н., Юдкин В. А., Торопов К. В., Булахова Н. А., Борисович О. Б., Панов В. В., Добротворский А. К. Численность, распределение и пространственно-типологическая неоднородность населения земноводных и пресмыкающихся в Томской и Новосибирской областях // Амфибии и рептилии в Западной Сибири (сохранение биоразнообразия проблемы экологической этики и экологического образования). Новосибирск: ООО «Ревик-К», 2003б. С. 20–32.

Равкин Ю. С., Ливанов С. Г. Факторная зоогеография. Новосибирск: Наука, 2008. 205 с.

Равкин Ю. С., Лукьянова И. В. География позвоночных южной тайги Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1976. 450 с.

Равкин Ю. С., Одинцев О. А., Богомолова И. Н. Особенности изучения пространственно-типологической изменчивости населения отдельных групп видов птиц и их распределения (на примере врановых) // Сибирский экологический журнал. 2023а. № 1. С. 25-37.

Равкин Ю. С., Цыбулин С. М., Ананин А. А., Ивлиев В. Г., Железнова Т. К., Вартапетов Л. Г., Юдкин В. А., Жуков В. С., Преображенская Е. С., Стишов М. С., Торопов К. В., Равкин Е. С., Богомолова И. Н., Чеснокова С. В., Лялина М. И. Эколого-географическая организация и структура летнего населения птиц Северной Евразии // Журнал общей биологии. 2022. Т. 83, № 4. С. 302–320.

Равкин Ю. С., Цыбулин С. М., Ливанов С. Г., Малков П. Ю., Торопов К. В., Малков Н. П., Грабовский М. А., Швецов Ю. Г., Дубатолов В. В., Малков Ю. П., Бондаренко А. В., Вартапетов Л. Г., Митрофанов О. Б., Вознийчук О. П., Борисович О. Б. Особенности биоразнообразия Российского Алтая на примере модельных групп животных // Успехи современной биологии. 2003в. Т. 123, №

4. С. 409–420.
Равкин Ю. С., Цыбулин С. М., Ливанов С. Г., Торопов К. В., Куранова В. Н., Стариков В. П., Чеснокова С. В. Картографический анализ населения земноводных, пресмыкающихся и птиц Западно-Сибирской равнины и Алтая // Сибирский экологический журнал. 2008. Т. 15, № 5. С. 745–750.
Равкин Ю. С., Цыбулин С. М., Лялина М. И. К оценке качества экстраполяционного прогноза численности наземных позвоночных по ландшафтным аналогам (на примере Шлюзовского лесоболотного комплекса «Сказочный») // Сибирский экологический журнал. 2005. Т. 12, № 3. С. 427–433.
Растительность Западно-Сибирской равнины: Карты / Спец. содерж. разраб. Ин-т географии Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР по общ. руковод. акад. В. Б. Сочавы; Сост. и подгот. к печати ф-кой № 4 ГУГК в 1975 г.; Ред. В. Я. Михайленко. 1:1 500 000. М.: ГУГК при СМ СССР, 1976.
Стариков В. П. Кадастровая сводка по земноводным Курганской области // Всесоюзное совещание по проблеме кадастра и учета животного мира. Ч. 2. М., 1986. С. 435–436.
Стариков В. П. Зеленая жаба // Красная книга Курганской области. Курган: Зауралье, 2002. С. 113–114.
Трофимов В. А. Модели и методы качественного факторного анализа матрицы связи // Проблемы анализа дискретной информации. Ч. 2. Новосибирск, 1976. С. 24–36.
Цыбулин С. М., Равкин Ю. С., Жимулёв И. Ф., Панов В. В., Вартапетов Л. Г., Жуков В. С., Богомолова И. Н., Николаева О. Н. Динамика численности и пространственная неоднородность сообществ. Позвоночные // Динамика экосистем Новосибирского Академгородка. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. С. 309–318.
Цыбулин С. М., Равкин Ю. С., Панов В. В., Бабуева Р. В. Животный мир. Позвоночные // Природа Академгородка: 50 лет спустя. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. С. 166–177.
Эпова Л. А., Куранова В. Н., Бабина С. Г. Видовое разнообразие, биотопическое распределение земноводных и пресмыкающихся заповедника «Кузнецкий Алатау» в градиенте высотной поясности (Юго-восток Западной Сибири) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 4 (24). С. 77–97.
Яковлев В. А. Кадастр земноводных и пресмыкающихся Республики Алтай // Животный мир Алтае-Саянской горной страны. Горно-Алтайск: РИО «Универ-Принт» ГАГУ, 1999. С. 175–214.
Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4, № 1. P. 1–9.
Jaccard P. Lois de distribution florale dans la zone alpine // Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles. 1902. Vol. 38, № 144. P. 69–130.
Kuranova V. N., Yakovlev V. A., Simonov E. P., Ischenko V.G., Yartsev V. V., Bogomolova I. N. Diversity, distribution and nature conservation status of Western Siberia Amphibia // Principy ekologii. 2016. Vol. 5, № 3. P. 77.
Litvinchuk S. N., Kazakov V. I., Pasynkova R. A., Borkin L. J., Kuranova V. N., Rosanov J. M. Tetraploid green toad species (*Bufo pewzowi*) from the Altay Mountains: the first record for Russia // Russian Journal of Herpetology. 2010. Vol. 17, № 4. P. 290–298.
Polunin D., Shtaiger I., Efimov V. JACOBI4 software for multivariate analysis of biological data // bioRxiv. 2019. С. 803684.
Simonov E., Kuranova V. N., Lisachov A., Yartsev V. V., Bogomolova I. N. Database of Amphibia distribution in West Siberia (Russia) // Biodiversity Data Journal. 2022. 10: e82436. DOI: 10.3897/BDJ.10.e82436

Благодарности

Исследования, послужившие основой для написания данной статьи, проведены в основном по программе ФНИ государственных академий на 2021–2025 гг. (проект FWGS-2021-0002).

SPATIALLY-TEMPORAL HETEROGENEITY OF AMPHIBIAN POPULATION OF WESTERN SIBERIA

RAVKIN Yury Solomonovich — *DSc, Institute of Taxonomy and Ecology of Animals (ISEA) SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk-91, Frunze St., 11, yravkin@bk.ru*

TSYBULIN Sergey Mikhailovich — *DSc, Institute of Taxonomy and Ecology of Animals (ISEA) SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk-91, Frunze St., 11, tcsm_tomsk@mail.ru*

CHESNOKOVA Svetlana Vitalyevna — *PhD, Institut of Taxonomy and Ecology of Animals (ISEA) SB RAS, 630091,Russia, Novosibirsk-91, Frunze St., 11, tchsvet@mail.ru*

LYALINA Maria Igorevna — *Institut of Taxonomy and Ecology of Animals (ISEA) SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk-91, Frunze St., 11, lyalinangs@yandex.ru*

Keywords:
Amphibia
Western Siberia
Altai
Salair and Kuznetsk Alatau
amphibian population
distribution
environmental factors
natural regimes
abundance
dynamics
cluster and regression analysis

Summary: The article presents the results of the analysis and subsequent generalization at the regional level of long-term data on the amphibian population of the entire Western Siberia, including the West Siberian Plain, the Kuznetsk-Salair Mountain Region and the Russian part of Altai. The initial materials were collected for the period from 1970 to 2022 during the amphibian survey in 1623 habitats using ditches and fences with trap cylinders. Based on the collected data, the number of amphibians in this vast region was estimated, the distribution of species at the level of landscape groups and the features of the spatially- temporal dynamics of their abundance were described. Using the methods of cluster analysis in combination with expert data clustering, the classification of amphibian communities was carried out, which was taken as a basis for the development of the legend of the amphibian population map of Western Siberia presented in the article. The main objective of the study was to identify the main trends in the spatial variability of the amphibian population and assessment of their relationship to environmental heterogeneity. The animal population data served as a basis for achieving this goal.

Reviewer: G. A. Lada

Received on: 18 Decamber 2024 **Published on:** 25 March 2025

References

Borisovich O. B. Cybulin S. M. Toropov K. V. Fomin B. N. Grazhdan K. V. Bogomolova I. N. Amphibians and reptiles of the plains and foothill-low-mountain landscapes of the Upper Ob region, Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 2002. T. 9, No. 4. P. 425–440.

Cybulin S. M. Ravkin Yu. S. Panov V. V. Babueva R. V. The animal world. Vertebrates, Priroda Akademgorodka: 50 let spustya. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2007. P. 166–177.

Cybulin S. M. Ravkin Yu. S. Panov V. V. Vartapetov L. G. Zhukov V. S. Bogomolova I. N. Nikolaeva O. N. Population dynamics and spatial heterogeneity of communities. Vertebrates, Dinamika ekosistem Novosibirskogo Akademgorodka. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2013. P. 309–318.

Dunaev E. A. Orlova V. F. Amphibians and reptiles of Russia: Atlas-determinantM.: Fiton XXI, 2017. 328 p.

Duysebaeva T. N. Ahmedenov K. M. Hromov V. A. Kraynyuk V. N. Sarzhanov F. Starikov S. V. Tarasovskaya N. E. Timoshenko A. Yu. Titov S. V. Lake frog habitat (complex Pelophylax ridibundus, Amphibia, Ranidae)// Trudy Zoologicheskogo instituta RAN. 2022. T. 326, No. 3. P. 211–238.

Epova L. A. Kuranova V. N. Babina S. G. Species diversity, biotopic distribution of amphibians and reptiles of the Kuznetsky Alatau Nature Reserve in the gradient of the altitude zone (South-East of Western Siberia), Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2013. No. 4 (24). P. 77–97.

Geoinformational system of the Altai-Sayan ecoregionM.: IGEM RAN – WWFRussia, 2001.

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis, Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4, No. 1. P. 1–9.

Il'ina I. S. Lapshina E. I. Lavrenko N. N. Mel'cer L. I. Romanova E. A. Bogoyavlenskiy B. A. Mahno V. D. Vegetation cover of the West Siberian PlainNovosibirsk: Nauka, 1985. 251 p.

Ischenko V. G. Green toad, Krasnaya kniga Kurganskoy oblasti. Izd. 2-e. Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gop. un-ta, 2012. P. 93.

Jaccard P. Lois de distribution florale dans la zone alpine, Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles. 1902. Vol. 38, No. 144. P. 69–130.

Kupershtoh V. L. Trofimov V. A. Ravkin Yu. S. Spatial organization of the bird population, Ravkin Yu. P. Pticy lesnoy zony Priob'ya. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1978. P. 253–269.

Kuranova V. N. Yarcev V. V. Biodiversity of Tomsk Ob region. Amphibians and reptilesTomsk: Izdatel'skiy dom Tomskogo gop. un-ta, 2020. 148 p.

Kuranova V. N., Yakovlev V. A., Simonov E. P., Ischenko V.G., Yartsev V. V., Bogomolova I. N. Diversity, distribution and nature conservation status of Western Siberia Amphibia, Principy ekologii. 2016. Vol. 5, No. 3. P. 77.

Kuzyakin A. P. Zoogeography of the USSR, Uchenye zapiski Moskovskogo oblastnogo pedagogicheskogo instituta im. N. K. Krupskoy. 1962. T. 59. P. 3–182. (Biogeografiya. Vyp. 1).

Litvinchuk S. N., Kazakov V. I., Pasynkova R. A., Borkin L. J., Kuranova V. N., Rosanov J. M. Tetraploid green toad species (Bufo pewzowi) from the Altay Mountains: the first record for Russia, Russian Journal of Herpetology. 2010. Vol. 17, No. 4. P. 290–298.

Mirkin B. G. Cluster analysis methods for decision support: review WP/7/2011/03M.: Izd. dom NIU VShE, 2011. 88 p.

Narkevich A. N. Vinogradov K. A. Grzhibovskiy A. M. Multiple comparisons in biomedical research: the problem and solutions, Ekologiya cheloveka. 2020. No. 10. P. 54–64.

Naumov R. L. Birds in the foci of tick-born encephalitis in the Krasnoyarsk Territory: Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. M., 1964. 19 p.

Polunin D., Shtaiger I., Efimov V. JACOBI4 software for multivariate analysis of biological data, bioRxiv. 2019. P. 803684.

Ravkin E. S. Chelincev N. G. Methodological recommendations on integrated route accounting of birds.M.: VNIIpriroda, 1990. 33 p.

Ravkin Yu. P., Cybulin P. M., Lyalina M. I. K ocenke kachestva ekstrapolyacionnogo prognoza chislennosti nazemnyh pozvonochnyh po landshaftnym analogam (na primere Shlyuzovskogo lesobolotnogo kompleksa «Skazochnyy») [To the assessment of the quality of the extrapolation forecast of the number of terrestrial vertebrates by landscape analogues (using the example of the Shluzovsky forest-swamp complex «Skazochny»), Unikal'nyy pamyatnik prirody Shlyuzovskoy lesobolotnyy kompleks «Skazochnyy». Novosibirsk, 2020. P. 43–65.

Ravkin Yu. S. Cybulin S. M. Ananin A. A. Ivliev V. G. Zheleznova T. K. Vartapetov L. G. Yudkin V. A. Zhukov V. S. Preobrazhenskaya E. S. Stishov M. S. Toropov K. V. Ravkin E. S. Bogomolova I. N. Chesnokova S. V. Lyalina M. I. Ecological and geographical organization and structure of the summer bird population of Northern Eurasia, Zhurnal obschey biologii. 2022. T. 83, No. 4. P. 302–320.

Ravkin Yu. S. Cybulin S. M. Livanov S. G. Malkov P. Yu. Toropov K. V. Malkov N. P. Grabovskiy M. A. Shvecov Yu. G. Dubatolov V. V. Malkov Yu. P. Bondarenko A. V. Vartapetov L. G. Mitrofanov O. B. Vozniychuk O. P. Borisovich O. B. Features of the biodiversity of the Russian Altai on the example of model groups of animals, Uspehi sovremennoy biologii. 2003v. T. 123, No. 4. P. 409–420.

Ravkin Yu. S. Cybulin S. M. Livanov S. G. Toropov K. V. Kuranova V. N. Starikov V. P. Chesnokova S. V. Cartographic analysis of the amphibian, reptile, and bird populations of the West Siberian Plain and Altai, Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 2008. T. 15, No. 5. P. 745–750.

Ravkin Yu. S. Efimov V. M. Kokorina I. P. Chesnokova S. V. Lyalina M. I. Spatially-temporal heterogeneity of the reptile population of Western Siberia, Zoologicheskiy zhurnal. 2023b. T. 102, No. 9. P. 1046–1058.

Ravkin Yu. S. Kuranova V. N. Cybulin S. M. Bogomolova I. N. Yudkin V. A. Toropov K. V. Bulahova N. A. Borisovich O. B. Panov V. V. Dobrotvorskiy A. K. The number, distribution, and spatial and typological heterogeneity of amphibian and reptile populations in the Tomsk and Novosibirsk regions, Amfibii i reptilii v Zapadnoy Sibiri (sohranenie bioraznoobraziya problemy ekologicheskoy etiki i ekologicheskogo obrazovaniya). Novosibirsk: OOO «Revik-K», 2003b. P. 20–32.

Ravkin Yu. S. Livanov S. G. Factror zoogeographyNovosibirsk: Nauka, 2008. 205 p.

Ravkin Yu. S. Luk'yanova I. V. Geography of vertebrates of the southern taiga of Western Siberia.Novosibirsk: Nauka, 1976. 450 p.

Ravkin Yu. S. Odincev O. A. Bogomolova I. N. Features of studying the spatial and typological variability of the population of individual groups of bird species and their distribution (using the example of vranovs), Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 2023a. No. 1. P. 25-37.

Ravkin Yu. S. Vartapetov L. G. Yudkin V. A. Pokrovskaya I. V. Bogomolova I. N. Cybulin S. M. Blinov V. N.

Zhukov V. S. Dobrotvorskiy A. K. Blinova T. K. Starikov V. P. Anufriev V. M. Toropov K. V. Tertickiy G. M. Shor E. L. Spatial and typological structure of the amphibian population of the West Siberian Plain, Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 2003a. No. 5. P. 603–610.

Ravkin Yu. S. Yudkin V. A. Panov V. V. Starikov V. P. Vartapetov L. G. Cybulin S. M. Toropov K. V. Kuranova V. N. Blinov V. N. Pokrovskaya I. V. Zhukov V. S. Bogomolova I. N. Blinova T. K. Shor E. L. Anufriev V. M. Tertickiy G. M. Bahina E. V. Borisovich O. B. Features of mapping and identification of the spatial and typological structure of the amphibian population (using the example of Western Siberia), Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 2005. T. 12, No. 3. P. 427–433.

Simonov E., Kuranova V. N., Lisachov A., Yartsev V. V., Bogomolova I. N. Database of Amphibia distribution in West Siberia (Russia), Biodiversity Data Journal. 2022. 10: e82436. DOI: 10.3897/BDJ.10.e82436

Starikov V. P. Cadastral summary of amphibians of the Kurgan region, Vsesoyuznoe soveschanie po probleme kadastra i ucheta zhivotnogo mira. Ch. 2. M., 1986. P. 435–436.

Starikov V. P. Green toad, Krasnaya kniga Kurganskoy oblasti. Kurgan: Zaural'e, 2002. P. 113–114.

Trofimov V. A. Models and methods of qualitative factor analysis of the relationship matrix, Problemy analiza diskretnoy informacii. Ch. 2. Novosibirsk, 1976. P. 24–36.

Vegetation of the West Siberian Plain: Maps, Spec. soderzh. razrab. In-t geografii Sibiri i Dal'nego Vostoka SO AN SSSR po obsch. rukovod. akad. V. B. Sochavy; Sost. i podgot. k pechati f-koy No. 4 GUGK v 1975 g.; Red. V. Ya. Mihaylenko. 1:1 500 000. M.: GUGK pri SM SSSR, 1976.

Western SiberiaM.: Izd-vo AN SSSR, 1963. 488 p.

Yakovlev V. A. Cadastre of amphibians and reptiles of the Altai Republic, Zhivotnyy mir Altae-Sayanskoy gornoy strany. Gorno-Altaysk: RIO «Univer-Print» GAGU, 1999. P. 175–214.

Zolotarenko G. S. Finding a green toad in the vicinity of Novosibirsk, Voprosy gerpetologii: Tezisy dokladov VI Vsesoyuznoy konferencii. L.: Nauka, 1985. P. 80–81.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 551.526.6; 551.588.2

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

РАКИТИН Тихон Дмитриевич

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

Ключевые слова:
Японское море
береговая зона
ландшафтно-биономическое районирование
морфоструктуры
космический мониторинг
сезоны
многолетняя изменчивость
температура

Аннотация: Исследована изменчивость температурного режима поверхностных вод в береговой зоне и на шельфе в северо-западной части Японского моря. Градиент температуры ограничивается морфоструктурными районами, где главной фундаментальной единицей считается морской ландшафт. В береговой зоне в исследуемой части моря наблюдения за изменчивостью температуры в поверхностном слое проводились и продолжают вестить сотрудниками ТОИ им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Тихоокеанского филиала ВНИРО, ИВЭП ДВО РАН и др., но сбор данных осуществляется нерегулярно и in situ, исследователи не учитывают ландшафтный фактор. Актуальность данной статьи заключается в комплексном подходе при помощи метода ландшафтно-экологического районирования и данных космического мониторинга. Типизация берегов в северо-западной части Японского моря позволяет отмечать районы с разной температурой поверхности воды, а дистанционное зондирование океана со спутника помогает определять их пространственно-временное распределение с 2003 по 2022 г. На сегодняшний день нельзя с уверенностью сказать, что есть подобный и подробный алгоритм обработки спутниковых данных с использованием программных обеспечений Surfer, SeaDAS и ArcGIS. В дальнейшем полученные данные будут использоваться для изучения влияния температуры на динамику продуктивности фитопланктона. Обработанные данные позволят показать вероятность изменчивости климата региона и динамику биологической продуктивности в морской экосистеме в пределах береговой зоны моря.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 12 февраля 2025 года **Подписана к печати**: 02 апреля 2025 года

Введение

В Японском море наблюдается сезонное движение водных масс. С севера Татарского пролива поступают холодные воды с Западно-Приморским течением вдоль материка и острова Сахалин. Тёплые воды приходят с Цусимским течением, которое проходит вдоль островов Хонсю и Хоккайдо и через пролив Лаперуза из Жёлтого моря. Температура водных масс определяет климатическое состояние вод и сезонное цветение фитопланктона, от которого зависит биопродуктивность приморской экосистемы (Гидрометеорология и гидрохимия морей, 2003).

Ландшафтно-экологическое (биономическое) районирование береговой зоны и шельфа, методология которого предложена К. М. Петровым (1989), характеризует природные факторы морской среды, включая пространственное распределение температур и биоценозов в береговой зоне моря. Метод автора теоретизирован в следующих

работах, посвященных изучению подводных ландшафтов (Петров, 2004, 2020) и Японского моря (Петров, Поздеев, 1992; Петров, 2004, 2020). Принципы теории районирования основаны на трех системных единицах: вертикальной, зональной и азональной поясности.

Вертикальная поясность. У морского берега с глубиной изменяются характер рельефа и грунта материковой отмели, инсоляция и качественный состав биоценозов, поэтому шельф принято разделять на три пояса: верхний (внутренний шельф), средний и нижний (внешний шельф). За объект исследований взят внутренний шельф – береговая зона (БЗ) моря. Согласно К. М. Петрову (2020, 2023) и Э. Дж. Соутворду (Soutward, 1965), *внутренний шельф,* или БЗ, подразделяется на супралитораль (зону заплеска), литораль (верхнюю, среднюю, нижнюю) – приливно-отливную зону и сублитораль, последняя делится на этажи и ступени. Литораль и сублитораль подвержены сезонной изменчивости температур и солнечной радиации, перемешиванию водных масс и ледовитости, которые ускоряют или замедляют динамику биоценозов, особенно развитие фитопланктона и макрофитов.

Зональная поясность. В зональном аспекте северо-западную часть Японского моря охватывают две природные зоны — бореальная и неморальная (Зенкевич, 1962). Северная часть моря, включая дельту реки Амур, северный Сахалин и южное Приморье, а также перешеек Поясок на Сахалине, попадает в бореальную зону с температурным диапазоном от 0 до 5 градусов в феврале и от 15 до 20 градусов в августе. В качестве индикаторов, указывающих на принадлежность к этой зоне, выступают холоднолюбивые диатомовые водоросли Deatomea и фукусовые водоросли Fucus.

В южной части моря (акватория южной части Перешейка Поясок и Южного Сахалина) проходит неморальная зона, где февральские температуры 5–10 °С, а августовские 20–25 °С. Биоиндикаторы представлены теплолюбивыми динофитовыми – Dinophyta и ассоциациями – Sargassum pallidum, S. miyabei и Corallina pilulifera (Петров и др., 2004; Петров, 2020).

Азональная поясность. Крупные береговые морфоструктуры – материковая Сихотэ-Алинская горная цепь и островные Западно-Сахалинские горы – формируют рельеф берегов, но ведущая роль принадлежит дифференцированным новейшим и современным тектоническим движениям. Внутренняя геодинамика выстраивает форму морского бассейна от побережья до бровки шельфа, переходящего к береговому склону и подножью (Xu, 2001; Sanzhong et al., 2022). К. М. Петров (2020, 2022) также отмечает, что морские ландшафты принято типизировать на поперечные и продольные.

Орбитальные метеорологические спутники глобально и круглосуточно регистрируют данные по температуре поверхности воды ($ТПВ_{спут}$) и продуктивности фитопланктона. Они детектируются на многоканальные спектрорадиометры, установленные на спутниках: Aqua/Terra (NASA), Sentinel 3A/3B (ESA), SuomiNPP (NOAA), NOAA-20 (NOAA/NASA) и т. п. (Ракитин, 2022). В данной статье используются значения с полярно-орбитального спутника MODIS-Aqua, изображения и показатели которого можно получить на официальном сайте космического агентства National Aeronautics and Space Administration (NASA, 2024).

Следует отметить, что $ТПВ_{спут}$ может отличаться от судовых наблюдений за температурой из-за присутствия в верхних слоях воды взвесей (Суетин и др., 2002), которые повышают погрешность в спектральном диапазоне 429–710 нм (Viktor, 2011). В рамках статьи для улучшения качества дешифрирования космических снимков (КС) используется авторский алгоритм из адаптируемых программ (SeaDAS, ArcGIS), описательного и статистического анализа многолетних (2003–2022 гг.) рядов $ТПВ_{спут}$ за каждый сезон. Они показывают многолетнюю динамику температуры в исследуемой части моря и сезон, в который она более существенна. Практическая ценность исследования заключается в том, что оно позволяет оценить долгосрочные перспективы изменения климата в регионе. В дальнейшем эти данные могут быть использованы для выявления зависимости продуктивности фитопланктона от температурных колебаний.

Цель работы – проанализировать многолетнюю и сезонную изменчивость температуры поверхности воды в ландшафтно-биономических районах береговой зоны в северо-западной части Японского моря.

Материалы

Объектом исследования является береговая зона в северо-западной части Японского моря. В БЗ построены и выделены ландшафтно-биономические районы (рис. 1), для которых отбирались спутниковые данные ТПВ.

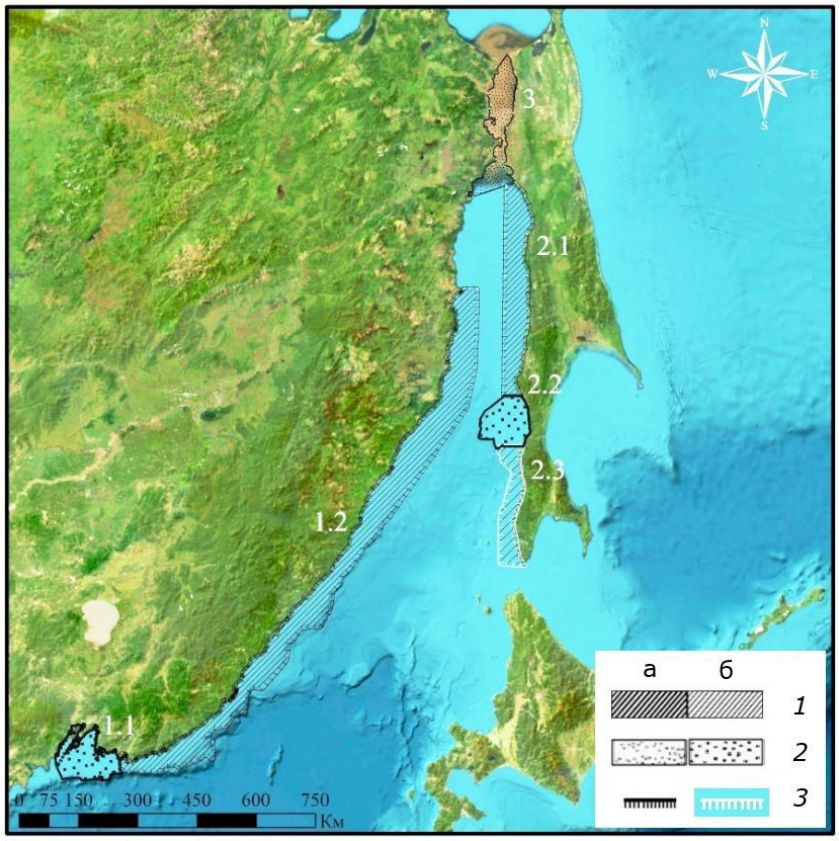


Рис. 1. Границы областей и районов в северо-западной части Японского моря. Масштаб 1:2500000. Подготовлено автором в ArcGISPro. Условные обозначения: I. Сихотэ-Алинская область, районы: 1.1. Южно-приморский, 1.2. Центрально-приморский; II. Островная Сахалинская область, районы: 2.1. Северный, 2.2. Перешеек Поясок, 2.3. Южный; III. Область северной части Татарского пролива. Обозначения: 1 – участки интенсивного (а) и замедленного (б) поднятия земной коры, 2 – участки опускания земной коры (а - аккумулятивные берега с широким песчаным пляжем, б - подводно-береговой склон аккумулятивного типа), 3 – абразионные участки с активным клифом (а, черны цвет), с мертвым клифом (б, белый цвет)

Fig. 1. The boundaries of regions and districts in the northwestern part of the Sea of Japan. Chart scale 1:12500000. Prepared by the author in ArcGISPro. Symbols: I. Sikhote-Alin region, districts: 1.1. Southern-Primorskiy, 1.2. Central-Primorskiy; II. Sakhalin Island region, districts: 2.1. Northern, 2.2. Isthmus Belt, 2.3. Southern; III. The area of the northern part of the Tatar Strait. Designations: 1 – areas of intensive (a) and slow (b) crustal uplift, 2 – areas of crustal subsidence (a - accumulative shores with a wide sandy beach, b - underwater coastal slope accumulative type), 3 - abrasive areas with active cliff (a, black), with death cliff (b, white color)

На рис. 1 районы типизируются в зависимости от морской глубины и ширины шельфа. К. М. Петров отмечает, что морские берега делятся на два типа – поперечные и продольные. У поперечных приморских берегов оси складок направлены перпендикулярно береговой линии. К примеру, в Южно-Приморском районе Сихотэ-Алинской области складка склона хребта поперечного типа. Для такого типа берега характерны: система мысов, островов, высокие берега, замедленная тектоническая депрессия, чередование абразионно-ингрессионных и абразионно-бухтовых берегов с аккумулятивными пляжами, четвертичные отложения на дне залива Петра Великого (Медведев, 1961), шельф широкий до 100 км (рис. 2).

У продольных берегов оси складок идут по направлению берега. Возьмем в качестве примера Южный район Сахалинской области с выходящей складкой Западно-Сахалинского хребта. Такому типу свойственны: высокие продольные берега с преимущественно активным клифом на севере, однако на юге он мертвый без процессов абразии, подводно-береговой склон приглубый до 40–60 м, замедленное тектоническое поднятие, берег окаймлен поясом скал, шельф узкий до 10 км (рис. 3).

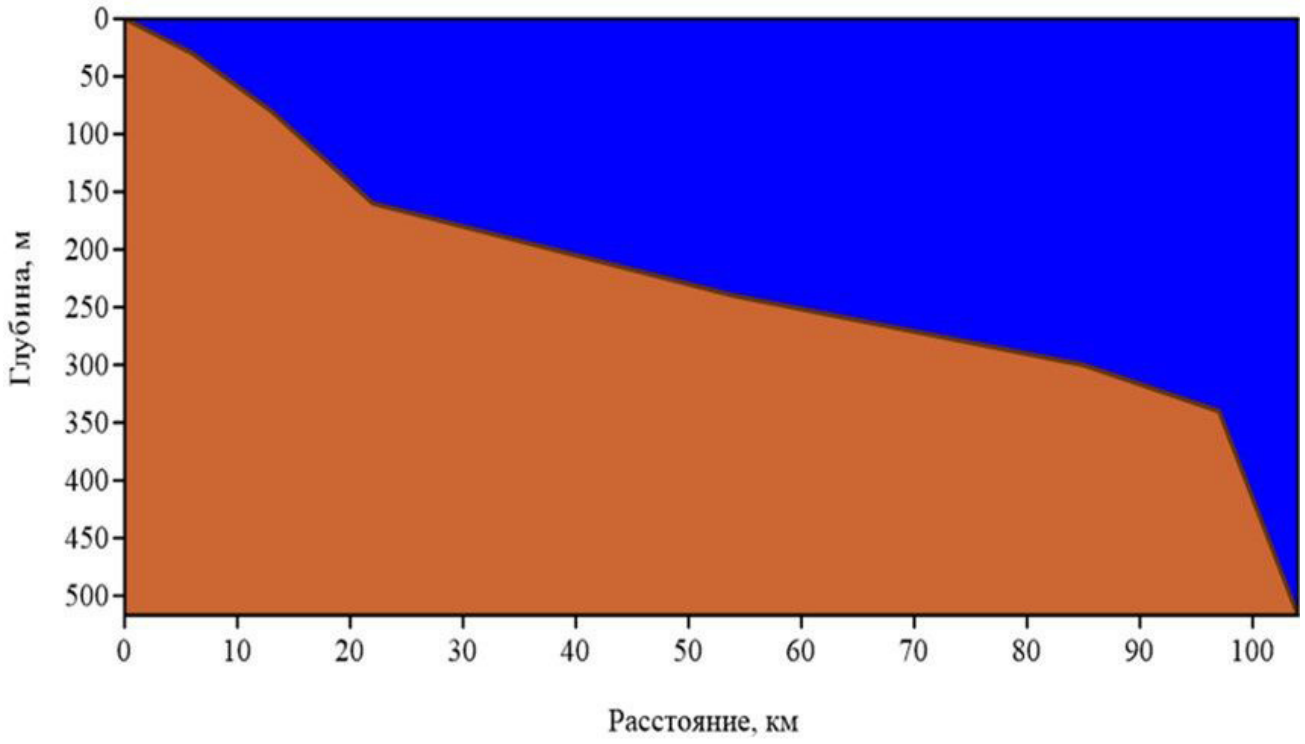


Рис. 2. Батиметрический профиль залива Петра Великого в южном Приморье. Составлено автором в Surfer по данным морской навигационной карты 1966 г.

Fig. 2. Bathymetric profile of Peter the Great Bay in southern Primorje. Compiled by the author in Surfer with based on the data of the 1966 marine navigation map

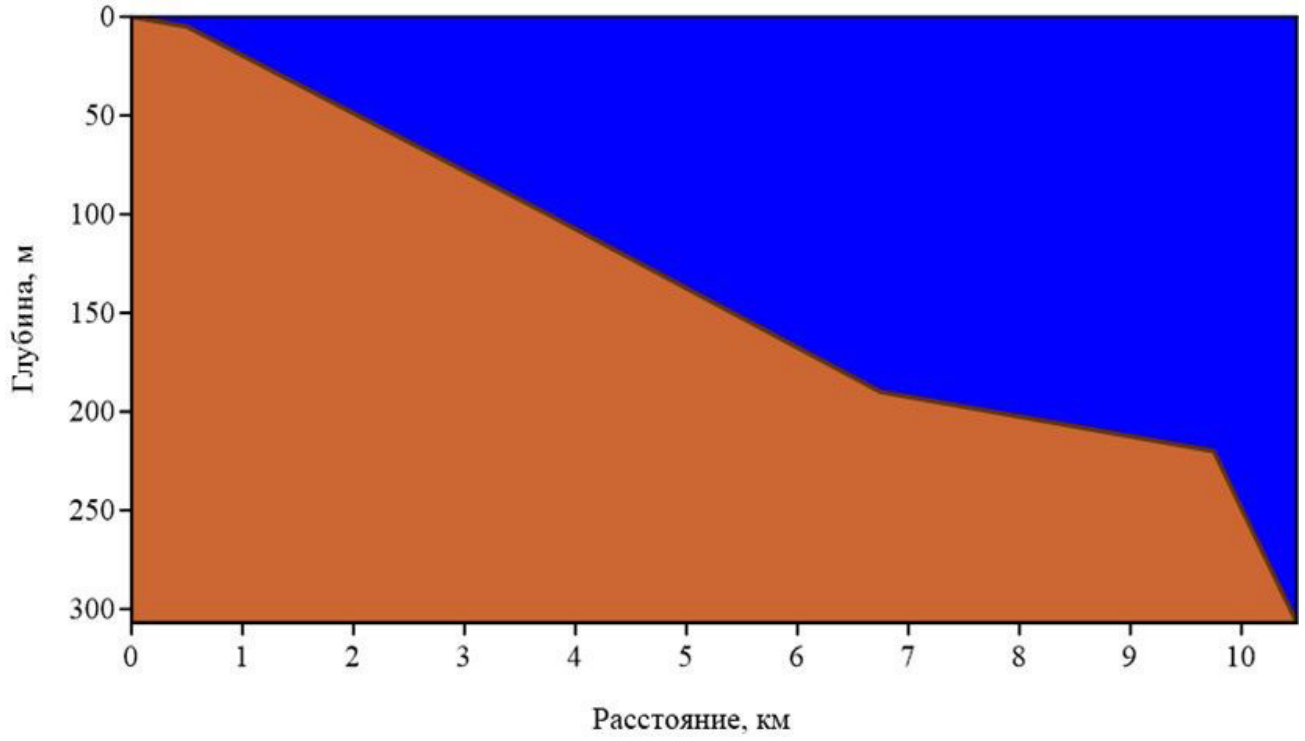


Рис. 3. Батиметрический профиль шельфа на юге Западно-Сахалинских гор. Составлено автором в Surfer по данным морской навигационной карты 1969 г.

Fig. 3. Bathymetric profile of the shelf in the south of the West Sakhalin Mountains. Compiled by the author in Surfer based on the data of the 1969 marine navigation map

Спутниковые радиометрические снимки $ТПВ_{спут}$ (°С) со сканера MODIS демонстрируют не только температуру, но и океанологические условия на море за каждый сезон (рис. 4).

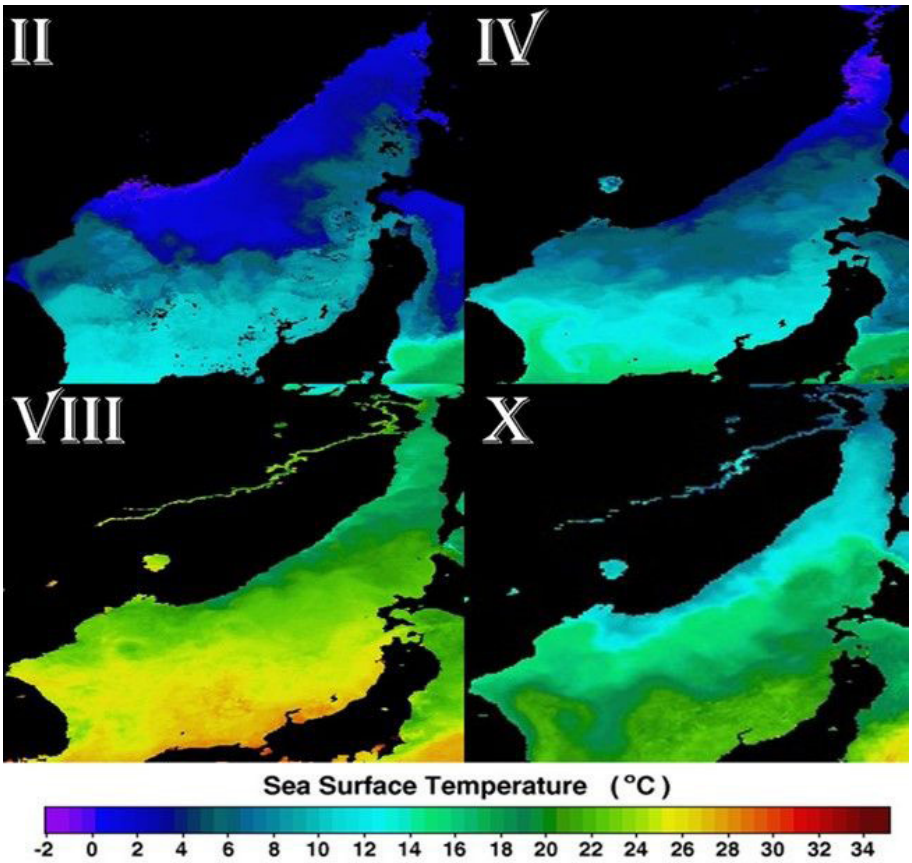


Рис. 4. Космические изображения температуры поверхности Японского моря. Данные, полученные датчиком MODIS с полярно-орбитального спутника «Aqua», 2022 г. (NASA, 2024). Сезоны: II – зима (февраль), IV – весна (апрель), VIII – лето (август), X – осень (октябрь)

Fig. 4. Satellite images of the surface temperature of the Sea of Japan. Data received by the MODIS sensor from the polar-orbiting satellite "Aqua", 2022 (NASA, 2024). Seasons: II – winter (February), IV – spring (April), VIII – summer (August), X – Autumn (October)

Анализируя изображения, можно увидеть, что в береговой зоне на северо-западе моря поверхностные воды зимой показывают температуру в среднем 1.5 °С (синий цвет и его оттенки, 0–2 °С), в это же время залив Петра Великого и север Татарского пролива практически полностью покрыты сплошным льдом (черный цвет). Этим же цветом обозначается дрейфующий лед, отображенный в мелких или зернистых точках. Весной $ТПВ_{спут}$ становится в среднем 4.0 °С (синие и темно-зеленые тона, 2.0 °С и 4.0–6.0 °С), и припайный лед остается только в северной части пролива. Летом палитра цвета меняется в сторону теплых тонов (16.0–20.0 °С), и в береговой зоне средняя $ТПВ_{спут}$ равна 16.5 °С. Осенью в светло-голубых тонах (10.0–14.0 °С) температура показывает средние значения 12.5 °С.

Методы

Ландшафтно-биономическое районирование северо-западной части Японского моря базируется на мофроструктурной основе с кратким указанием комплекса экологических условий. Для этого на цифровой карте в ArcGIS были обозначены области и районы в БЗ (см. рис. 1). Для определения батиметрического профиля шельфа были отобраны две морские навигационные карты масштаба 1:500000 1966 и 1969 гг., оцифрованные в Surfer.

Космический мониторинг проведен с полярно-орбитального спутника MODIS-Aqua. Спутниковые изображения в количестве 480 файлов получены в форматах jpg, NetCDF по заданным стандартным параметрам (уровень обработки L3, временное осреднение по месяцам, пространственное разрешение 4 км) за 20 лет (2003–2022 гг.). КС обработаны в SeaDAS, далее расчитывались и анализировались данные по статистическим коэффициентам в Excel и были построены многолетние сезонные (2003–2022 гг.) ряды $ТПВ_{спут}$

с указанием среднего квадратичного отклонения (СКО, σ). Статистическая значимость трендов оценивалась с помощью уровня значимости p-value: если p-value ≥0.10 (статистическая вероятность меньше 90 %), то тренд незначимый, и наоборот, если p-value ≤0.10 (статистическая вероятность больше 90 %), то тренд значимый. Гидрометеорологическая характеристика северо-западной части Японского моря дается по: Моря и океаны. Волнение (2024) и Гидрометеорология и гидрохимия морей. Японское море… (2003, 2004).

Результаты

Южно-приморский район. В БЗ возникают суточные приливы до 0.5 м. В теплый период года прогрев и освещенность зоны повышают активность развития сообществ фитопланктона и макрофитов. С конца ноября залив Петра Великого покрыт сплошным льдом, а его стаивание происходит в начале апреля. Район относится к холодно-бореальной зоне, где существенную роль в динамике температуры оказывают холодное Западно-Приморское и западная ветвь теплого Цусимского течения. Биоиндикаторами зоны служат диатомовые – Deatomea и фукусовые – Fucus водоросли. Многолетняя и сезонная изменчивость $ТПВ_{спут}$ представлена на рис. 5.

В Южно-приморском районе получен положительный статистически значимый тренд (p-value = 0.000). *Зимняя* $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 1.25 °C; σ = 0.31 °C) была наименьшей (0.83 °C) в 2003, 2006 и 2008 гг., а в дальнейшем показала рост до 2.00 °C в 2022 г. *Весной* тренд статистически не значим (p-value = 0.102). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 4.75 °C; σ = 0.28 °C) снижается до 4.33 °C в 2010 г., а после увеличивается до 5.50 °C в 2022 г. *Летом* не обнаружена статистическая значимость тренда (p-value = 0.823), а $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 18.01 °C; σ = 0.40 °C) показывает ее медленное увеличение. *Осенний* статистический тренд незначим так же, как и летом (p-value = 0.137), а $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 13.11 °C; σ = 0.43 °C) незначительно растет.

Центрально-приморский район. В БЗ действуют суточные приливы до 0.7 м. Гидрометеорологические условия, зональность и виды биоиндикаторов практически однотипны Южно-приморскому району, а температура указана на рис. 6.

В Центрально-приморском районе установлено, что *зимний* положительный статистический тренд незначим (p-value = 0.772), а $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 1.56 °C; σ = 0.20 °C) понижается до 1.17 °C в 2008 г. и продолжает непрерывный рост, достигая 2.00 °C в 2013 г. *Весенний* тренд статистически не значим (p-value = 0.270), но $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 4.39 °C; σ = 0.27 °C) снижается до 3.83 °C в 2006 г., а затем продолжает свой рост. *Летний* тренд показывает положительную статистическую значимость (p-value = 0.061). По $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 18.90 °C; σ = 0.52 °C) видно, что она убывает до 18.00 °C в 2004 г., и линия графика возрастает до 20.50 °C в 2016 г. *Осенний* тренд вывел сезонную положительную статистическую значимость (p-value = 0.000), а кривая графика $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 13.06 °C; σ = 0.61 °C) повышается без весомых значений.

Таким образом, оба района Сихотэ-Алинской области отличаются изменчивостью температуры и p-value. В Южно-приморском районе зимняя $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 1.25 °C) сравнительно ниже, чем в Центрально-приморском (ср. знач. = 1.56 °C), однако статистическая положительная значимость (p-value = 0.000) присутствует, в отличие от второго района (p-value = 0.772). В Центрально-приморском районе весенняя температура (ср. знач. = 4.39 °C) отличается изменчивостью относительно первого района (ср. знач. = 4.75 °C), тем не менее в обоих случаях регрессионный анализ статистически незначимый. В первом районе летняя температура не показывает наблюдаемый прирост и отсутствует статистическая значимость (p-value = 0.823), а во втором заметно увеличивается температура (ср. знач. = 18.90 °C) с 2004 г. и есть положительная статистическая значимость тренда (p-value = 0.061). В Южно-приморском районе температуры незаметно растут и тренд незначимый, а в Центрально-приморском есть заметное повышение температуры с положительной статистической значимостью (p-value = 0.000).

Северный район. Здесь волнение вод выше, чем в остальных районах, они могут достигать 2 м. Неглубокие воды до 30–40 м активно прогреваются, поэтому вегетация фитопланктона и фитобентоса протекает успешно. Район сосредоточен в холодно-бореальной зоне. Зимой воды района покрыты льдом. В пелагиали процветают холодолюбивые диатомовые водоросли, а в литорали – фукусовые (*Fucus evanescens, Pelvetia wrightii*) водоросли. Изменчивость $ТПВ_{спут}$ представлена на рис. 7.

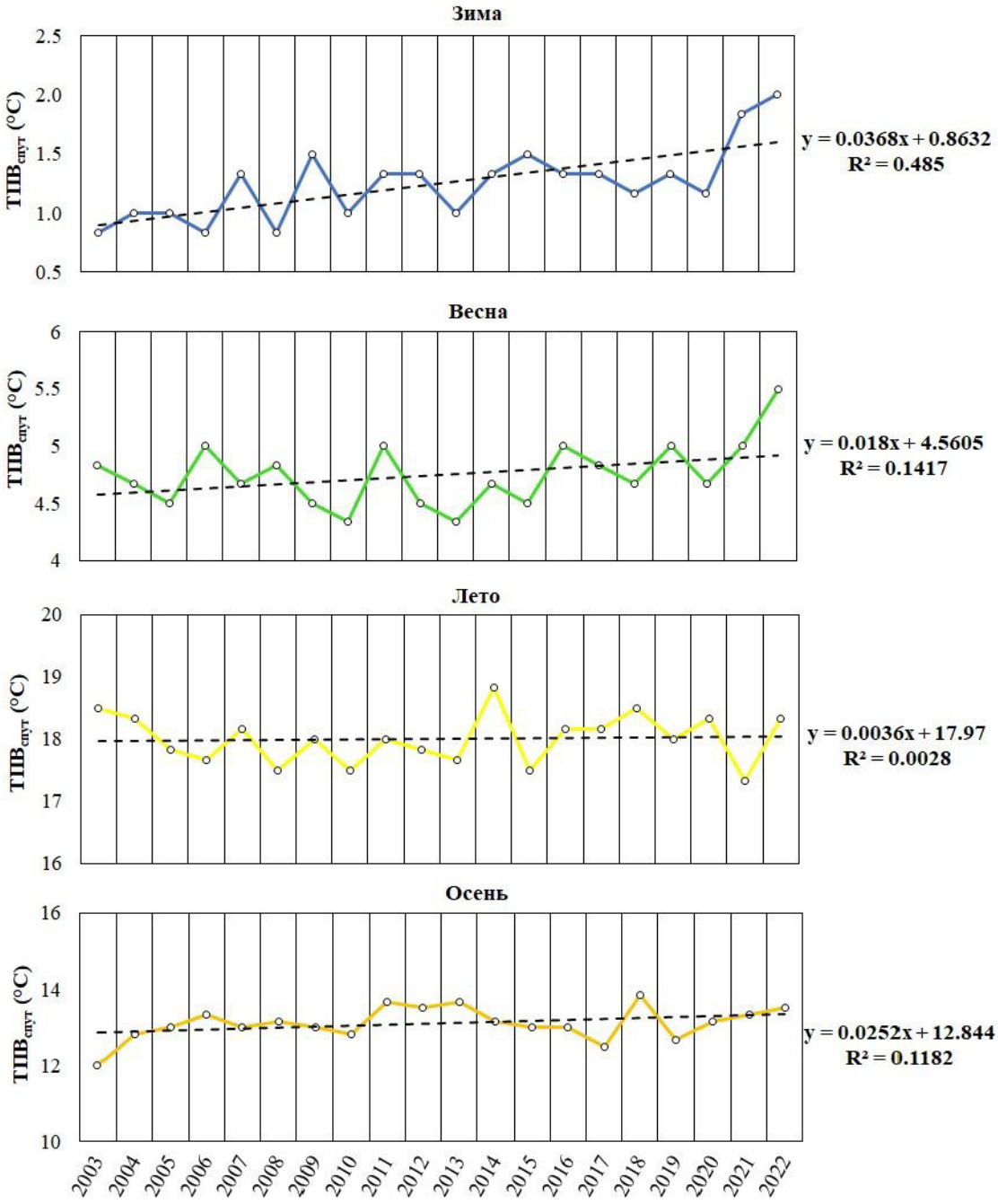


Рис. 5. Южно-приморский район Сихотэ-Алинской области. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) $ТПВ_{спут}$ за каждый сезон

Fig. 5. Southern-Primorsky district of the Sikhote-Alin region. Long-term series (2003–2022) SST_{sat} for each season

Зимние данные не получены, т. к. воды скованы сплошным льдом, а сенсор спутника не настроен на детектирование ледяного ландшафта и суши. Анализ *весенней* регрессии продемонстрировал статистическую незначимость (p-value = 0.294). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 1.65 °C; σ = 0.34 °C) показывает снижение до 0.84 °C в 2004 г., а затем линия графика неуклонно продолжает увеличиваться, поднимаясь до 2.17 °C в 2014 и 2017 гг. *Летом* получен статистически значимый тренд (p-value = 0.009). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 13.93 °C; σ = 0.66°C) демонстрирует уменьшение до 12.83 °C в 2003 г. и увеличение до 15.67 °C в 2014 г. *Осенний* тренд не имеет статистической значимости (p-value = 0.202). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 9.97 °C; σ = 0.56 °C) сначала понизилась (9.00 °C), а затем повысилась (11.67 °C) в 2004 и 2012 гг.

В районе *2.2. Перешеек Поясок* суточные

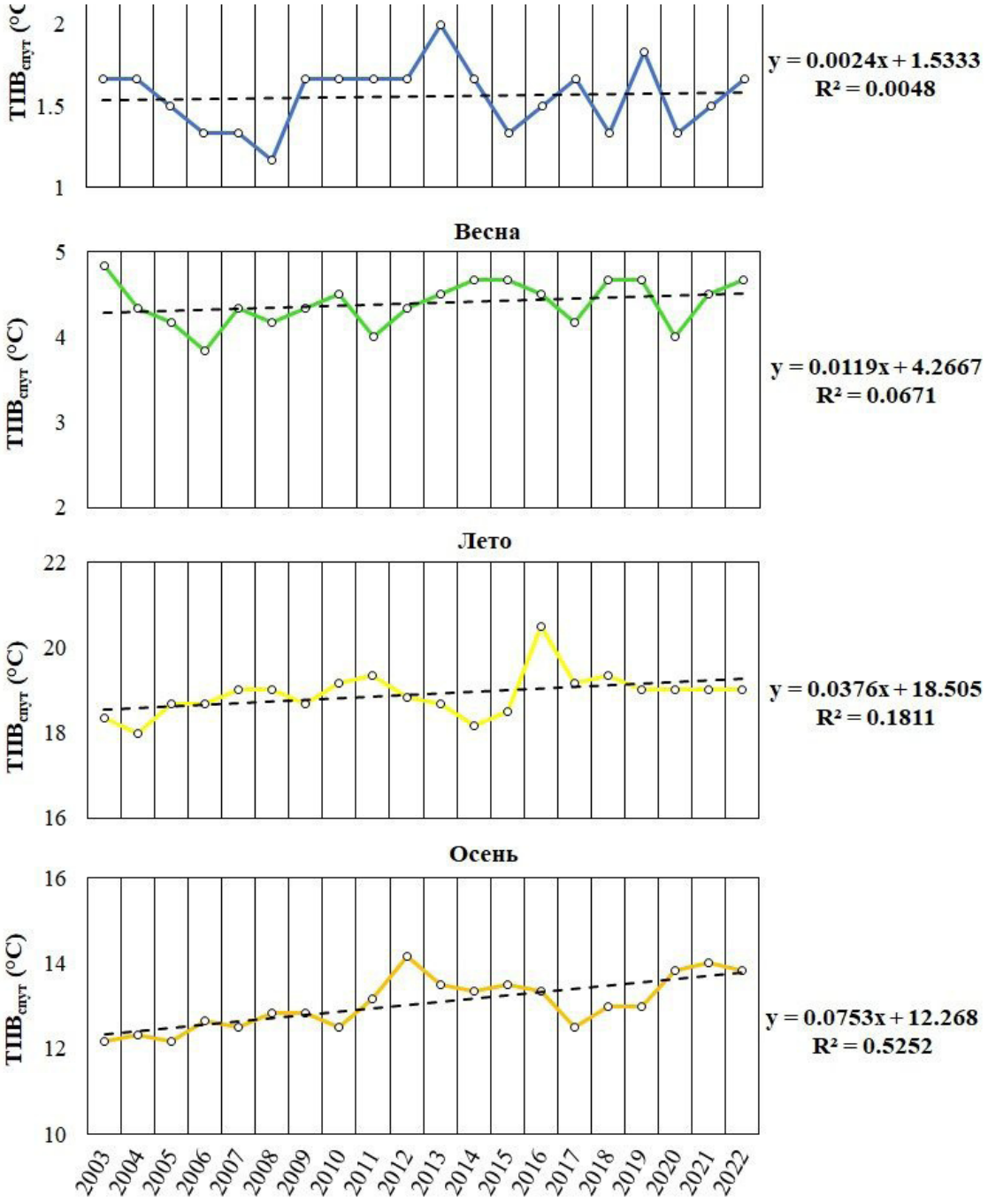


Рис. 6. Центрально-приморский район Сихотэ-Алинской области. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) ТПВспут за каждый сезон

Fig. 6. Central Primorsky area of the Sikhote-Alin region. Long-term series (2003–2022) SSTsat for each season

приливы достигают 1 м. Неглубокая материковая отмель интенсивно прогревается благодаря солнечной радиации, сказываясь на вегетации высших и низших водорослей. Зимой воды замерзают. Район разделен на две биогеографические зоны: по южной границе проходит холоднобореальная, а на севере – неморальная (Зенкевич, 1962). В холоднобореальной зоне воды населены биоиндикаторами, соответствующими Центрально-приморскому и Северному районам, а в неморальной цветут динофлагелляты – Dinoflagellata и сообщества макробентоса Corallina pilulifera. Далее рассмотрим изменчивость $ТПВ_{спут}$ (рис. 8).

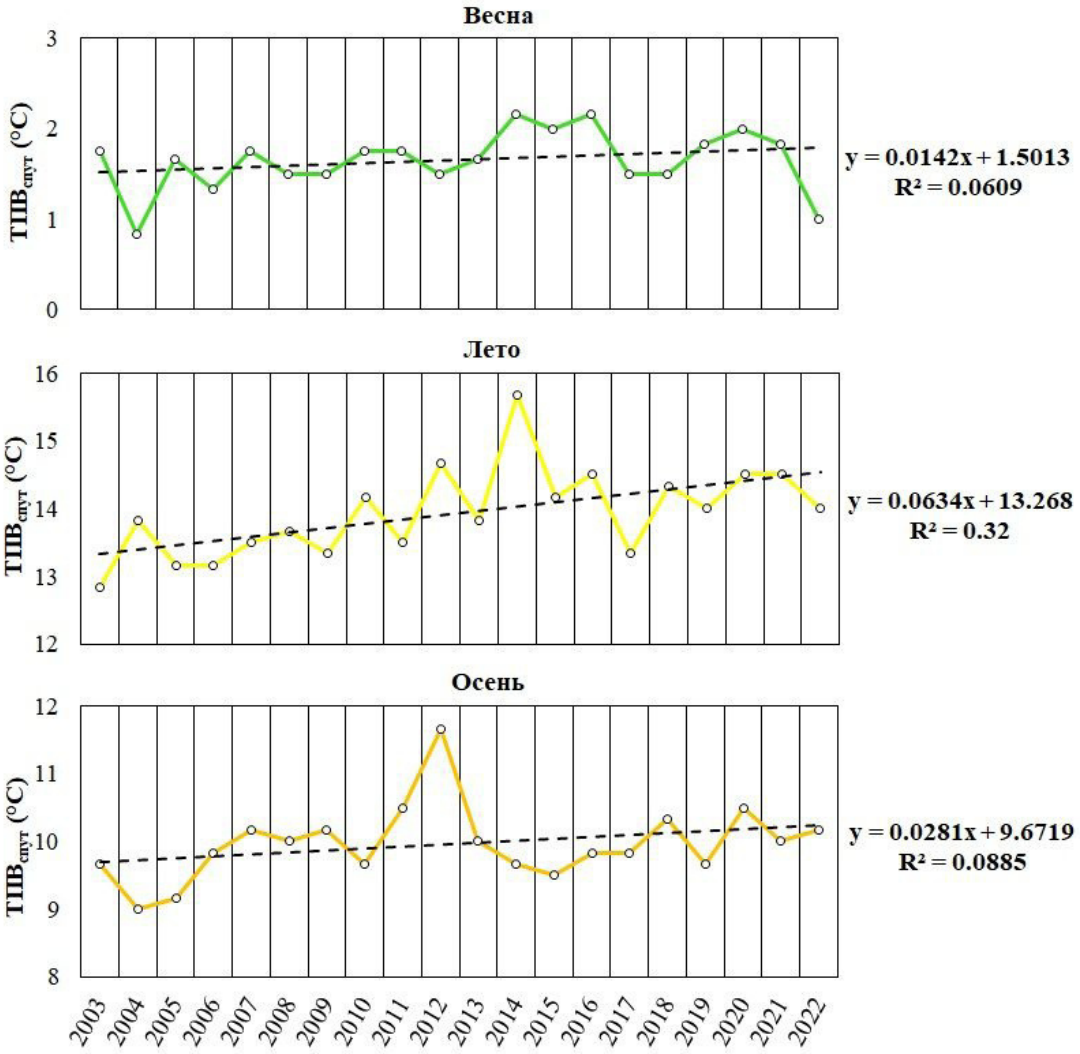


Рис. 7. Северный район островной Сахалинской области. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) $ТПВ_{спут}$ за каждый сезон

Fig. 7. The Northern district of the Sakhalin Island region. Long-term series (2003–2022) SST_{sat} for each season

Зимние данные отсутствуют по той же причине (см. Северный район). *Весной* был получен статистически незначимый тренд (p-value = 0.173). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 2.46 °C; σ = 0.22 °C) доходят до 2.00 °C в 2004 г. и возрастают до 3.00 °C в 2021 г., незначительно продолжая расти. Полученный *летний* возрастающий тренд статистически значимый (p-value = 0.051). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 14.17 °C; σ = 0.38 °C) начинаются со сниженного значения 13.67 °C в 2003 г. и доходящего до 15.17 °C в 2006 и 2013 гг. Регрессионный анализ показал положительную статистическую значимость *осеннего* тренда (p-value = 0.002). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 10.59 °C; σ = 0.21 °C) оказались растущими без явного перехода к снижению или повышению.

Южный район. Характерны суточные приливы, которые возрастают до 1 м. Как и в Северном районе, воды неглубокие, способствуют интенсивной инсоляции водной растительности. В зимнее время поверхностные воды не замерзают за счет теплого Цусимского течения. Район располагается в неморальной зоне. Водоросли представлены преимущественно классом динофитовых – Dinophyta, фитобентосом – Sargassum pallidum, S. miyabei и плотными сообществами Corallina pilulifera. Многолетняя и сезонная изменчивость температуры отображена на рис. 9.

Зимний тренд нисходящий статистически значимый (p-value = 0.055). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 2.02 °C; σ = 0.35 °C) убывает до 1.67 °C в 2006 г. и показывает неравномерную динамику. *Весенний* тренд статистически незначимый (p-value = 0.855), $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 3.80 °C; σ = 0.27 °C) показывает не существенное, но наблюдаемое снижение. *Летний* тренд статистически незначим (p-value =

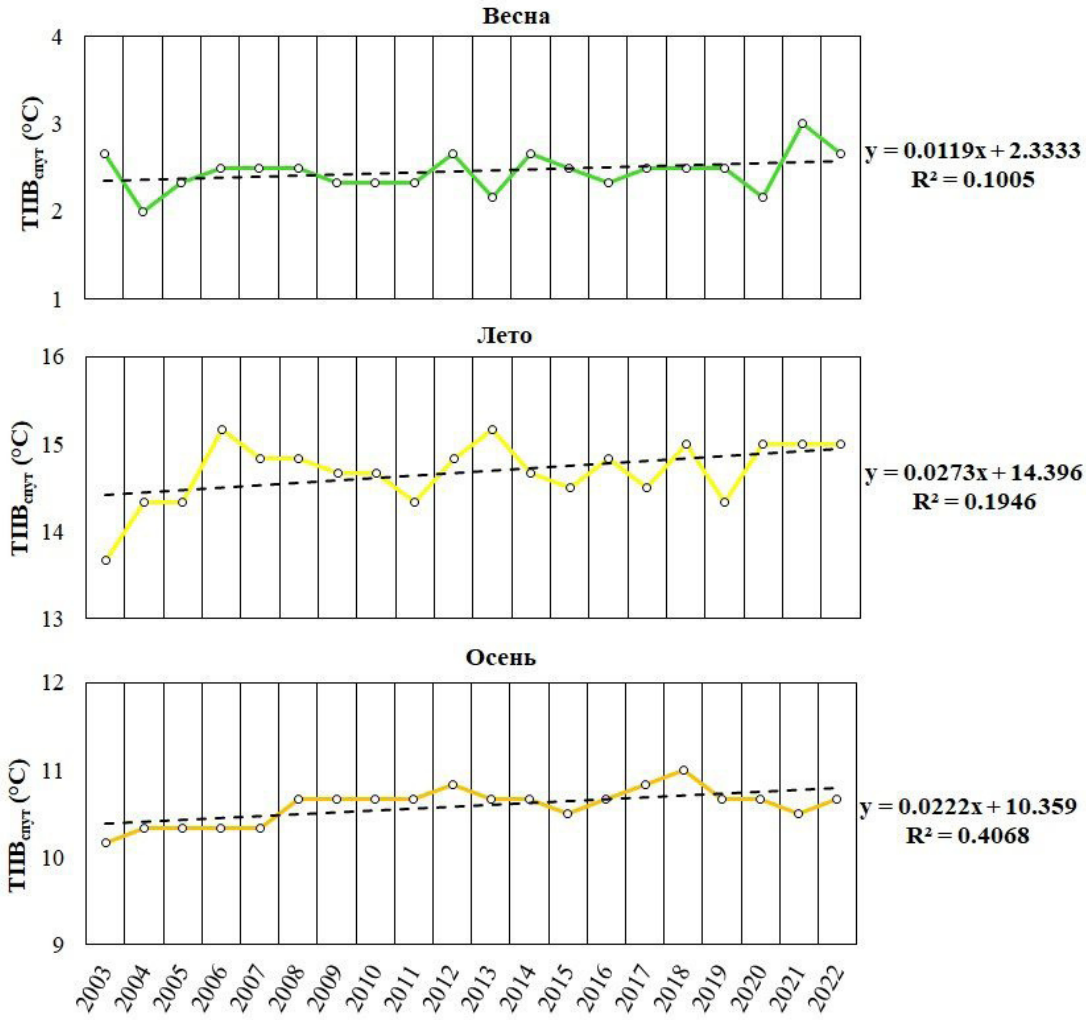


Рис. 8. Район Перешеек Поясок островной Сахалинской области. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) $ТПВ_{спут}$ за каждый сезон

Fig. 8. Isthmus Belt area of the Sakhalin Island Region. Long-term series (2003–2022) SST_{sat} for each season

0.642). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 14.68 °C; σ = 0.44 °C) снижающаяся, и это заметно с 2014 г., когда она достигла 13.33 °C. *Осенний* тренд получился статистически незначимым (p-value = 0.861). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 11.53 °C; σ = 0.34 °C) показывает краткосрочные снижения до 11.00 °C в 2003 и 2015 гг. и дальнейшие незначительные повышения.

Таким образом, в трех районах Сахалинской области прослеживается многолетняя изменчивость $ТПВ_{спут}$ и p-value. Зимние значения не рассматриваются во всех районах, за исключением Южного района, где отмечается понижение температуры и нисходящий значимый тренд (p-value = 0.055). В Южном районе весной $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 3.80 °C) больше, в то время как в Северном районе (ср. знач. = 1.65 °C) и в районе Перешеек Поясок (ср. знач. = 2.46 °C) изменчивость ниже, а статистический тренд незначимый в трех районах (p-value = 0.294; p-value = 0.173; p-value = 0.855). Летом аналогичный порядок $ТПВ_{спут}$ в Южном (ср. знач. = 14.68 °C), в Перешейке Поясок (ср. знач. = 14.17 °C) и в Северном (ср. знач. = 13.93 °C) районах, но положительная статистическая значимость тренда присутствует в Северном районе (p-value = 0.009) и в Перешейке Поясок (p-value = 0.051) без Южного района (p-value = 0.642). Осенью изменчивость $ТПВ_{спут}$ варьируется следующим образом: в Южном районе $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 11.53 °C) проявляется лучше, но с отсутствием статистической значимости (p-value = 0.861), а в районе Перешеек Поясок (ср. знач. = 10.59 °C) – средняя и со статистической значимостью (p-value = 0.002), ниже всего демонстрируется в Северном районе $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 9.97 °C) без статистической значимости (p-value = 0.202).

В *области северной части Татарского пролива* действуют полусуточные приливы 2.8 м. Летом благодаря циклонам, прихо-

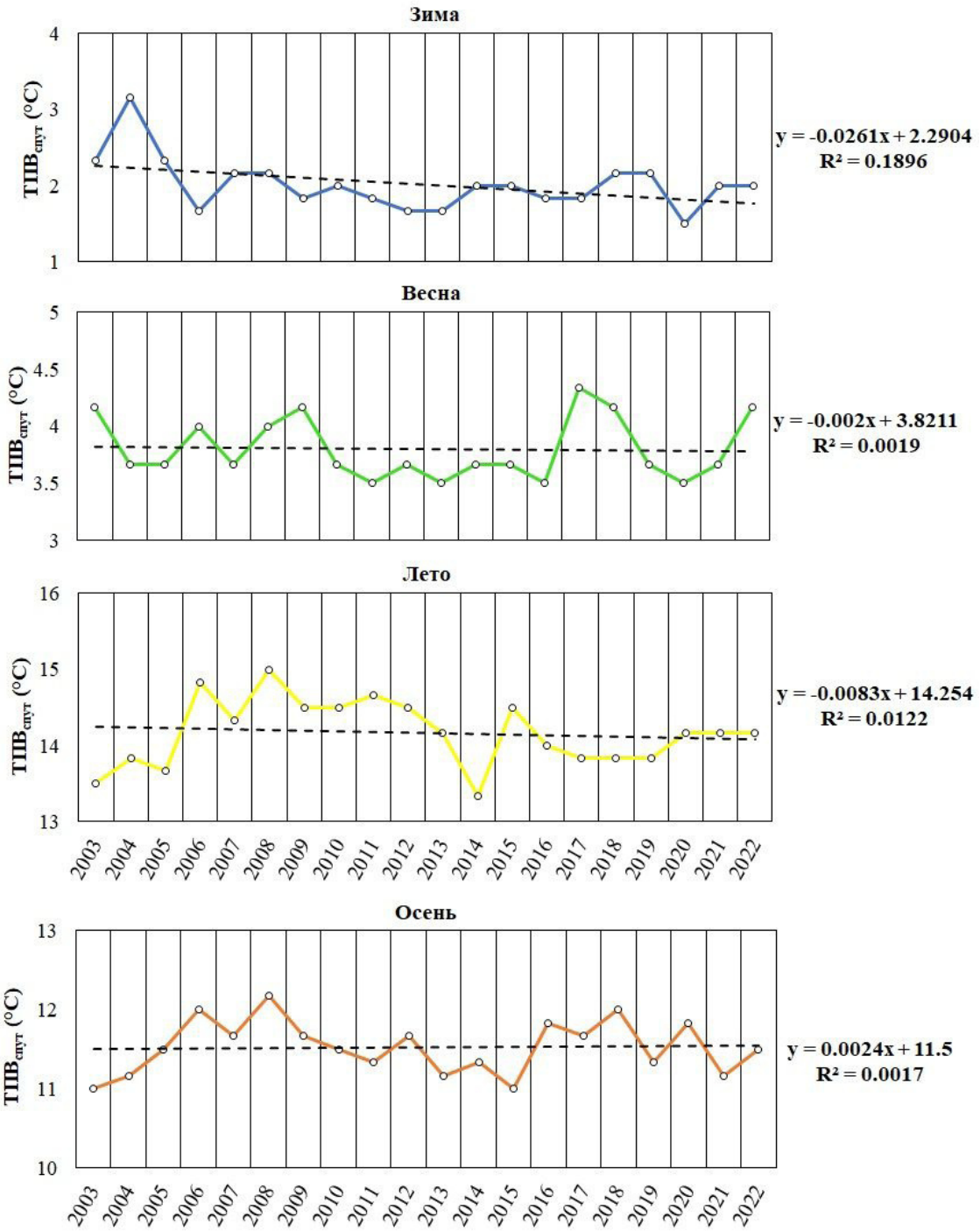


Рис. 9. Южный район Сахалинской области. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) $ТПВ_{спут}$ за каждый сезон
Fig. 9. The Southern district of the Sakhalin region. Long-term series (2003–2022) SST_{sat} for each season

дящим с летними муссонами, наблюдается сильное волнение, и в узкой части пролива высота волн может достигать 3.1 м. Зимой пролив полностью покрыт льдом, освобождается от него в начале мая. Мелководные окраины материка неглубокие до 6 м, и воды интенсивно прогреваются в теплое время года. Пролив входит в бореальную зону, в которой циркулирует холодное течение Шренка. Биоиндикаторы представлены подводными зарослями морских трав. На рис. 10 дана изменчивость $ТПВ_{спут}$.

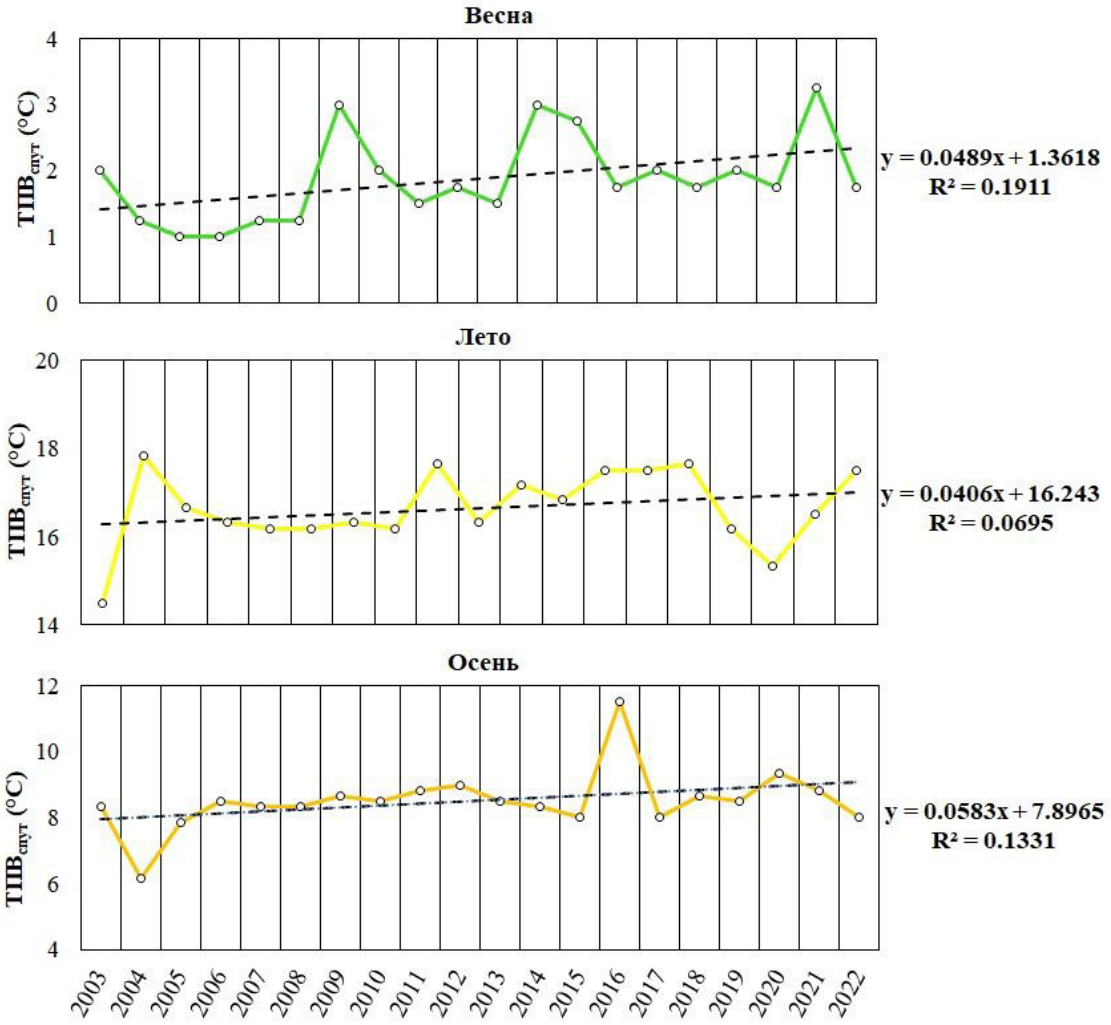


Рис. 10. Область северной части Татарского пролива. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) $ТПВ_{спут}$ за каждый сезон

Fig. 10. The area of the northern part of the Tatar Strait. Long-term series (2003–2022) SST_{sat} for each season

З*имние* значения не указаны из-за покрова льда. Регрессионный анализ показал *весеннюю* положительную статистическую значимость тренда (p-value = 0.053). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 1.88 °C; σ = 0.66 °C) снижается до 1.00 °C в 2005–2006 гг. и увеличивается до 3.25 °C в 2021 г. *Летом* тренд статистически незначимый (p-value = 0.167), но $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 16.69 °C; σ = 0.87 °C) сначала снижена (14.50 °C в 2003 г.), а затем становится повышенной (17.83 °C в 2004 г.). *Осенью* статистическая значимость тренда отсутствует (p-value = 0.113), а $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 8.51 °C; σ = 0.95 °C) повышается с 7.83 °C в 2005 г. до 9.33 °C в 2020 г., зафиксированы скачки температуры с пиковыми низкими 6.17 °C в 2004 г. и 11.50 °C в 2016 г.

Таким образом, в северной части Татарского пролива в 2003–2022 гг. летние значения $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 16.69 °C) самые высокие, но они, как и другие сезонные показатели, завышены, поскольку с мая по середину октября р. Амур становится полноводной из-за мощных тайфунов, заносимых восточными ветрами с Тихого океана. Обильные осадки вызывают летне-осенние половодья и паводки, которые выносят минеральную взвесь в мелководья. Эти спутниковые данные требуют доработки, но майские и октябрьские температуры предопределяют гидрометеорологические явления в вершине северной части Японского моря.

Обсуждение

С 2003 по 2022 г. сезонные $ТПВ_{спут}$ постепенно изменяются по районам в северо-западной части Японского моря. Для проверки этой изменчивости был проведен дополнительный подсчет значений по коэффициентам вариации (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение районов по коэффициентам вариации (%) $ТПВ_{спут}$ по сезонам

Сезон	Южно-приморский район	Центрально-приморский район	Северный район	Перешеек Поясок	Южный район	Татарский пролив
Зима	25.04	12.78	–	–	17.56	–
Весна	5.97	6.19	20.57	9.04	7.20	35.28
Лето	2.24	2.77	4.76	2.49	3.12	5.19
Осень	3.31	4.71	5.60	1.94	2.94	11.11

Из табл. 1 видно, что коэффициент вариации обладает разбросом и связан с сезонной изменчивостью $ТПВ_{спут}$. Столбики показывают уменьшение с зимы по осень коэффициентов, кроме области северной части Татарского пролива. С этим можно связать геологические особенности районов и океанологические условия в них, которые влияют на снижение или рост температуры. В основной части текста описываются морфоструктурные формы рельефа с продольными или поперечными берегами, а также приливно-отливные явления и сезонная изменчивость температуры. Затем рассматриваются эти три аспекта в контексте различных регионов.

В Южно-приморском районе Сихотэ-Алинской области поперечный берег испытывает тектоническую депрессию, которая создает обилие аккумулятивного материала на дне залива Петра Великого и широкий шельф. В береговой зоне этого типа температуры подвергаются продолжительной осенне-зимней конвекции. В континентальной отмели до бровки шельфа прибрежные течения возникают от циклонов с юга и антициклонов с севера (Супранович, Якунин, 1976), перераспределяя водную массу в толще и вместе с тем температуру. Коэффициент вариации (25.04 %) значительный среди всех районов за зиму, а в остальных сезонах вариационный ряд обладает однородностью значений, кроме этого, весной и летом коэффициенты 5.97 и 2.24 % являются наименьшими по районам, что говорит о точности значений температуры. В Центрально-приморском районе той же области пролегает продольный поднимающийся берег, сопровождающий холодное Западно-Приморское течение, здесь немалую роль играют также осенние апвеллинги, вызванные муссонами с востока. Разброс в ряде $ТПВ_{спут}$ средний и низкий, демонстрирующий однородность ряда.

В районах Сахалинской области преобладают продольные берега с замедленным геологическим поднятием. В Северном районе с ноября по середину апреля воды покрыты льдом, а с наступлением майского тепла р. Амур и ее притоки приносят теплоемкие воды, которые после летних тайфунов становятся половодьями и паводками, повышающими уровень воды в Амурском проливе. В акватории проявляются весенние апвеллинги, которые возникают из-за неоднородности тепла после протаивания льда в конце марта и продолжаются в апреле. Осенью с северо-запада подступают циклонические завихрения, которые выталкивают потоки воды с лимана в сторону данного района. Летний (4.76 %) и осенний (5.60 %) разброс $ТПВ_{спут}$ показывает однородность ее ряда, кроме весны (20.57 %), где она более значительна. Район Перешеек Поясок обладает поперечным типом берега с тектонической депрессией. Холодное Западно-Сахалинское и теплое Цусимское течения формируют межсезонную конвекцию вод за счет припайного и дрейфующего льда с севера в холодное время года, а прогретые воды Цусимского течения – в теплое. Летние муссонные ветра, приходящие с юга, орошают водную массу, что делает ее более распресненной, а осенью циклонические водные массы с севера снижают ее температуру. Разброс значений в ряде коэффициентов за весну (9.04 %) и лето (2.49 %) снижает превышение разброса, а коэффициент за осень (1.94 %) наименьший во всех районах. Южному району свойственны неглубокие морские воды из-за высоких поднимающихся берегов, шельф узкий. Конвергенция вод здесь протекает быстро, а зимой воды никогда не замерзают, кроме 2003–2005 гг., когда за март и начало апреля на КС были обнаружены льды. Только зимой коэффициент вариации (17.56 %) показывает средненизкий разброс $ТПВ_{спут}$.

Область северной части Татарского пролива является самой мелководной. Ее окраина – это мелководный желоб, заполняемый мощными водными стоками р. Амур, которые становятся полноводными благодаря приходу мощных тайфунов с Тихого океана. Зимой пролив покрыт льдом. В Амурском

лимане спутниковые данные в большинстве своем искажены, поскольку концентрация минеральной взвеси замутняет воду. Коэффициенты вариации устроены так, что весенний (35.28 %) разброс велик относительно всех районов и он же показателен в статистических расчетах. В остальные сезоны коэффициенты демонстрируют лучшую однородность.

Заключение

Космический мониторинг сезонной изменчивости температуры поверхности воды за многолетний (2003–2022 гг.) период претерпевает современную адаптацию к нестандартным научным задачам. Ко всему этому добавляется ландшафтно-биономическое районирование – теоретический метод профессора К. М. Петрова. Его методика помогает ограничить исследуемые районы в береговой зоне северо-западной части Японского моря. Эти районы становятся затем полигонами на цифровой карте в ArcGIS, их батиметрические профили оцифровываются в Surfer и рассчитываются в SeaDAS и Excel.

Комплексный способ может предопределять изменчивость температуры поверхности воды и уровень формирования биопродуктивности морских экосистем, а также описывать экологические факторы и условия каждого района. Было установлено, что во всех районах происходит медленное увеличение температур за каждый сезон на протяжении 20 лет. Многосторонний статистический анализ помогает определить приближенные значения, делая их более точными, в выделенных районах.

В наши дни экспериментальные методы применяются как практические инструменты для долгосрочного прогнозирования изменений температуры в регионе. Благодаря спутниковым данным о концентрации хлорофилла-а в фитопланктоне можно было бы изучить его связь с $ТПВ_{спут}$ и использовать эти знания для прогнозирования продуктивности морских экосистем в прибрежной зоне.

Библиография

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Японское море: гидрометеорологические условия / А. С. Васильева, Ф. С. Терзиева, А. Н. Косарева. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. Т. 8, вып. 1. 392 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Японское море: гидрохимические условия и океанографические основы формирования биологической продуктивности / Ф. С. Терзиева, П. Я. Тищенко. СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. Т. 8, вып. 2. 264 с.

Зенкевич Л. А. Биология морей СССР . М.: Наука, 1962. 741 с.

ДВНИГМИ. Гидрологические характеристики. Колебания уровня. Приливные явления URL: http://pacificinfo.ru/data/cdrom/10/html/7.htm (дата обращения: 06.05.2024).

Медведев В. С. Исследования по динамике и морфологии берегов залива Петра Великого в Японском море . Владивосток, 1961. Т. 8.

Моря и океаны. Японское море . URL: http://oceangid.blogspot.com/2013/04/japonskoemore.html?m=1&ysclid=l1brskzuvz (дата обращения: 23.04.2024).

Петров К. М. Подводные ландшафты: теория, методы, исследования . Л.: Наука, 1989. 125 с.

Петров К. М., Поздеев В. Б. Подводные ландшафты и фитобентос у берегов Южного Сахалина . Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1992. 128 с.

Петров К. М. Биономия океана . СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2004. 242 с.

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

Петров К. М. Морская экология: экосистемы и подводные ландшафты: Учебное пособие для бакалавров . Самара: Ай Пир Медиа, 2023. 172 с.

Ракитин Т. Д. Сезонные и региональные особенности продуктивности фитопланктона в северной части Японского моря // Морские исследования и образование – MARESEDU-2022: Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции. Тверь: ПолиПРЕСС, 2022. С. 50–53.

Суетин В. С., Суслин В., Королева С. Н., Кучерявый А. А. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море летом 1998 года по данным спутникового прибора SeaWiFS // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 6. С. 44–54.

Супранович Т. И., Якунин Л. П. Гидрология залива Петра Великого . Владивосток: ДВО АНСССР, 1976. № 22. 199 с. (Труды ДВНИГМИ. Вып. 22).

Soutward A. J. Life on the sea-shore. Heinemann Educ., 1965. 148 p.

NASA. OceanColorWEB. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/aqua/ (дата посещения: 23.04.2024).

Sanzhong L., Weiwei D., Xiaoyu G., et al. Pacific-Asian Tectonics: Preface // Earth-Science Reviews. 2022. Vol. 226. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103946

Victor K. Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview // Journal of Coastal Research. 2011. Vol. 27 (1). P. 2–17. DOI: 10.2307/25790484

Xu Z. H. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region // Acta Seimol. Sin. 2001. No 14. P. 524–533. DOI: 10.1007/BF02718059

Благодарности

Автор выражает благодарность почетному профессору Санкт-Петербургского государственного университета, д. г. н. Кириллу Михайловичу Петрову за справедливые замечания и моральную поддержку, а также рецензентам за их внимательность.

VARIABILITY OF WATER SURFACE TEMPERATURE IN THE COASTAL ZONE OF THE NORTHWESTERN PART OF THE SEA OF JAPAN

RAKITIN Tikhon Dmitrievich

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

Keywords:
Sea of Japan
coastal zone
landscape-bionomic zoning
morphostructures
space monitoring
seasons
long-term variability
temperature

Summary: The variability of the temperature regime of surface waters was studied in the coastal zone and on the shelf in the northwestern part of the Sea of Japan. The temperature gradient is limited by morphostructural areas, where the main fundamental unit is considered to be the seascape. In the coastal zone in the studied part of the sea, observations of temperature variability in the surface layer were carried out, and continue to be carried out by specialists from: V.I.Ilyichev Institute of Technical Sciences of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Pacific Branch of VNIRO, IVEP Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, etc., but the data collection is carried out irregularly and in situ, and researchers do not take into account the landscape factor. The importance of this article lies in an integrated approach using the method of landscape and ecological zoning and space monitoring data. Coastal typing in the northwestern part of the Sea of Japan makes it possible to mark areas with different water surface temperatures, and remote sensing of the ocean from a satellite helps to mark their spatial and temporal distribution from 2003 to 2022. To date, it is impossible to say with certainty that there is a similar and detailed algorithm for processing satellite data using Surfer, SeaDAS and ArcGIS software. In the future, the obtained data will be used to study its effect on the dynamics of phytoplankton productivity. The processed data will allow us to show the probability of climate variability in the region and the dynamics of biological productivity in the marine ecosystem within the coastal zone of the sea.

Received on: 12 February 2025 **Published on:** 02 April 2025

References

Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. The Sea of Japan: hydrochemical conditions and oceanographic foundations of the formation of biological productivity, F. P. Terzieva, P. Ya. Tischenko. SPb.: Gidrometeoizdat, 2004. T. 8, vyp. 2. 264 p.

Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. The Sea of Japan: hydrometeorological conditions, A. P. Vasil'eva, F. P. Terzieva, A. N. Kosareva. SPb.: Gidrometeoizdat, 2003. T. 8, vyp. 1. 392 p.

MI. Hydrological characteristics. Fluctuations in the level. Tidal phenomena.URL: http://pacificinfo.ru/data/cdrom/10/html/7.htm (data obrascheniya: 06.05.2024).

Medvedev V. S. Research on the dynamics and morphology of the shores of Peter the Great Bay in the Sea of Japan. Vladivostok, 1961. T. 8.

NASA. OceanColorWEB. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/aqua/ (data poseschenіya: 23.04.2024).

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. Bionomy of the ocean. SPb.: Izd-vo SPb. un-ta, 2004. 242 p.

Petrov K. M. Marine ecology: Ecosystems and underwater landscapes: study guide for bachelors. Samara: Ay Pir Media, 2023. 172 c.

Petrov K. M. Principles of bionomic zoning of the coastline and the shelf of the World Ocean, Okeanologiya. M.: IO RAN, 2020. T. 60, No. 3. P. 381–392. DOI: 10.31857/S0030157420030089

Petrov K. M. Underwater landscapes: theory, methods, research. L.: Nauka, 1989. 125 p.

Rakitin T. D. Seasonal and regional characteristics of phytoplankton productivity in the northern part of the Sea of Japan, Morskie issledovaniya i obrazovanie – MARESEDU-2022: Sbornik tezisov dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Tver': PoliPRESS, 2022. P. 50–53.

Sanzhong L., Weiwei D., Xiaoyu G., et al. Pacific-Asian Tectonics: Preface, Earth-Science Reviews. 2022. Vol. 226. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103946

Seas and oceans. The Sea of Japan. URL: http://oceangid.blogspot.com/2013/04/japonskoemore.html?m=1&ysclid=l1brskzuvz (data obrascheniya: 23.04.2024).
Soutward A. J. Life on the sea-shore. Heinemann Educ., 1965. 148 p.
Suetin V. S. Suslin V. Koroleva S. N. Kucheryavyy A. A. Estimation of the variability of optical properties of water in the Black Sea in the summer of 1998 using this SeaWiFS satellite instrument, Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal. 2002. No. 6. P. 44–54.
Supranovich T. I. Yakunin L. P. Hydrology of Peter the Great Bay. Vladivostok: DVO ANSSR, 1976. No. 22. 199 p. (Trudy DVNIGMI. Vyp. 22).
Victor K. Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview, Journal of Coastal Research. 2011. Vol. 27 (1). P. 2–17. DOI: 10.2307/25790484
Xu Z. H. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region, Acta Seimol. Sin. 2001. No 14. P. 524–533. DOI: 10.1007/BF02718059
Zenkevich L. A. Biology of the seas of the USSR. M.: Nauka, 1962. 741 p.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 598.132.4:591.111.1

ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ИММУННЫХ РЕАКЦИЙ И ИНДЕКСОВ ОРГАНОВ ОЗЕРНЫХ ЛЯГУШЕК, *PELOPHYLAX RIDIBUNDUS* (AMPHIBIA: RANIDAE), ЗАРАЖЕННЫХ ГЕМОПАРАЗИТАМИ

РОМАНОВА Елена Борисовна — *доктор биологических наук, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603022, Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, romanova@ibbm.unn.ru*

ПЛОТНИКОВА Валерия Дмитриевна — *Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603022, Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, psyche_medea@mail.ru*

ГОРЕЛОВ Роман Андреевич — *кандидат биологических наук, Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Россия, Россия, 445003, Тольятти, Комзина, 10, gorelov.roman@mail.ru*

БАКИЕВ Андрей Геннадьевич — *кандидат биологических наук, Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Россия, Россия, 445003, Тольятти, Комзина, 10, herpetology@list.ru*

Ключевые слова:
земноводные
гемопаразиты
лейкоцитарные индексы
формула крови
индексы органов
циркулирующие иммунные комплексы

Аннотация: Проведена сравнительная оценка гемопаразитарной нагрузки, функционирования иммунной системы и морфофизиологических показателей самцов (13 особей) и самок (11 особей) *Pelophylax ridibundus* из Астраханской области России. В крови озерных лягушек (14 особей: 9 самок и 5 самцов) идентифицированы гемопаразиты, относящиеся к трем родам: Dactylosoma, Hepatozoon и Trypanosoma. Наиболее часто встречались гамонты Dactylosoma sp. (у 14 особей), гаметоциты Hepatozoon sp. обнаружены у 7 особей, внеклеточная форма Trypanosoma sp. у 5 особей. Доля инфицированных эритроцитов, экстенсивность инвазии и индекс обилия гемопаразитов у самок значимо выше по сравнению с самцами. Лейкоцитарные профили инфицированных самцов и самок не различались; межполовые различия выявлены у здоровых особей. Самки имели более высокий кровно-клеточный показатель и индекс сдвига лейкоцитов на фоне пониженного значения лимфоцитарно-гранулоцитарного индекса. Инфицированные самцы отличались от здоровых низким значением ядерного сдвига нейтрофилов за счет повышения в крови сегментоядерных нейтрофилов. Зараженность гемопаразитами коррелировала со снижением общего числа эритроцитов, возрастанием

доли миелоцитов, увеличением индекса интоксикации организма, уровня крупных иммунных комплексов и снижением индекса укрупнения (отношение крупных к мелким иммунным комплексам). Локализация в эритроцитах гаметоцитов Hepatozoon sp. коррелировала с увеличением индекса сердца, печени и гонад озерных лягушек. Выявлена отрицательная корреляция между содержанием в эритроцитах гамонтов Dactylosoma sp. и снижением индекса сердца у всех инфицированных особей, а также между наличием в кровотоке Trypanosoma sp. и снижением индекса почек. Полученные результаты иллюстрируют развитие воспалительной реакции и нарушение иммунорегуляции организма озерных лягушек при инфицировании гемопаразитами.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: С. М. Ляпков
Рецензент: В. Л. Вершинин

Получена: 11 марта 2025 года **Подписана к печати**: 02 апреля 2025 года

Введение

Земноводные являются наиболее уязвимой группой позвоночных, страдающей от масштабного сокращения видового разнообразия (Stuart et al., 2004; Beebee, Griffiths, 2005). Такое сокращение может быть связано с рядом факторов, начиная от антропогенного разрушения и загрязнения среды обитания, изменения климата до воздействия спектра различных патогенов (вирусов, бактерий, простейших, гельминтов). Амфибии являются хозяевами самых разных гемопаразитов (Малышева, 2009; Readel, Goldberg, 2010; Du Preez, Carruthers, 2009; Netherlands et al., 2015), включая внутриэритроцитарные (Davies, Johnston, 2000; Davis et al., 2009; Sailasuta et al., 2011; Netherlands et al., 2014a, b; Rajabi et al., 2017; Pavľáková et al., 2024) и внеклеточные (Baker, 2008; Acosta et al., 2013) виды. Внутриклеточные паразиты крови представляют собой наиболее распространенную и изученную группу кокцидий (Apicomplexa: Adeleorina) (Davies, Johnston, 2000). В настоящее время гемопаразитов разделяют на четыре семейства: Dactylosomatidae, Haemogregarinidae, Hepatozoidae и Karyolysidae. Часто встречающихся у бесхвостых амфибий внеклеточных гемопаразитов рода *Trypanosoma*, которые отличаются большим полиморфизмом (Leal et al., 2009), относят к классу кинетопластид (Kinetoplastida или Kinetoplastea). Жизненные циклы этих паразитов сложны, включают переносчиков (двукрылых, пиявок), которые являются важными компонентами водных экосистем (Ferreira et al., 2015; Bjelić-Čabrilo et al., 2009).

В литературе встречаются отдельные работы, посвященные морфологии эритроцитов амфибий при инвазии гемопаразитами (Гаибова, Мамедова, 2010; Peskova et al., 2018); практически не исследованы реакции адаптивного иммунитета и до конца не ясны последствия инфицирования для системы крови амфибий. С учетом вышеизложенного целью данного исследования являлась сравнительная оценка гемопаразитарной нагрузки, функционирования иммунной системы и морфофизиологических показателей самцов и самок озерной лягушки *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771), добытых в Нижнем Поволжье.

Материалы

Озерные лягушки (*n* = 24, 13 самцов и 11 самок) собраны с помощью сети в прибрежной зоне р. Берекет (окрестности пос. Степной, Красноярский район, Астраханская обл., 46.672874º N, 48.237771º E) 30.08.2024 г. Течение в реке слабое, грунт состоит из песка с глинами.

Методы

Массу тела лягушек определяли на электронных лабораторных весах серии Highland (HCB 123, фирма ADAM Equipment Co., Ltd), предел допускаемой погрешности ±0.01 г. Кровь брали из сердца с помощью инсулинового шприца с фиксированной иглой объемом 1 мл. Готовили тонкие мазки крови, высушивали на воздухе, фиксировали в абсолютном спирте и окрашивали красителем Гимза в течение 20 мин (Меньшиков и др., 1987). Проводили определение и учет внутриэритроцитарных паразитов на 500 эритроцитов с помощью светового микроскопа Meiji Techno (Япония) серии MT 4000 с иммерсией (ув. ×1500). Рассчитывали экстенсивности инвазии, E (%) – количество особей вида, зараженных гемопаразитами, по отношению ко всему числу исследованных особей; среднюю интенсивность инвазии, I (отн. ед.) – количество паразитов, приходящихся в

среднем на одну зараженную особь; индекс обилия, ИО (отн. ед.) – количество гемопаразитов, приходящихся на одну особь.

По окрашенным препаратам определяли лейкоцитарную формулу крови и рассчитывали интегральные лейкоцитарные индексы: кровно-клеточный, ККП; реактивный ответ нейтрофилов, РОН; лимфоцитарно-гранулоцитарный, ИЛГ; отношение нейтрофилов к лимфоцитам, ИСНЛ; отношение лимфоцитов к эозинофилам, ИСЛЭ; отношение нейтрофилов к эозинофилам, ИСНЭ; сдвиг лейкоцитов, ИСЛ; ядерный сдвиг нейтрофилов, ИЯСН и интоксикации, ЛИИ. В сыворотке крови оценивали содержание циркулирующих иммунных комплексов (ед. опт. плотности / 10 мл сыворотки) методом селективной преципитации на спектрофотометре СФ-2000 (ООО «ОКБ Спектр», Россия) при длине волны 200, 280, 350 и 450 нм, в растворе полиэтиленгликоля (ПЭГ) (Гриневич, Алферов, 1981; Khokhlova et al., 2004). Определяли крупные (ПЭГ, 3.75 %) и мелкие (ПЭГ, 7.0 %) иммунные комплексы и их отношение (индекс укрупнения). Индексы внутренних органов (сердце, печень, селезенка, почки, гонады) лягушек (отношение массы органа к массе тела) вычисляли в промилле (‰) (Ивантер и др., 1985), для этого у обездвиженных животных выделяли органы и взвешивали на торсионных весах Waga Torsyjna – WT с ценой деления 0.1 мг (погрешность измерения ±0.03 мг).

С учетом вида распределения центральные тенденции и рассеяние изученных показателей описывали медианой (Me) и интерквартильным размахом (IQR) (значения 25-го и 75-го процентилей). Для оценки силы и значимости влияния факторов (пол, зараженность гемопаразитами) применяли многомерный дисперсионный анализ с использованием лямбды Уилкса (λWilks) в качестве критериальной статистики. Анализ данных проводили непараметрическими критериями: Краскела – Уоллиса (при множественном сравнении групп по одному признаку), Данна (множественный критерий при попарном сравнении групп), *z*-критерий (для сравнения долей), гамма (*γ*) – корреляции (для анализа взаимосвязи). За величину уровня статистической значимости принимали $\alpha = 0.05$. Расчеты реализовывали с помощью пакета программ Statistica 8 (StatSoft Inc., OK, USA).

Результаты

Жизненный цикл гемопаразитов состоит из основных четырех стадий: мерогония и гамогония у позвоночного хозяина, а также оплодотворение и спорогония у беспозвоночного хозяина (комара или пиявки). На основе морфологии внутриэритроцитарных гаметоцитов, имеющих различную форму, в мазках крови *P. ridibundus* были идентифицированы гемопаразиты, относящиеся к трем родам *Hepatozoon*, *Dactylosoma* и *Trypanosoma*. Из 24 особей *P. ridibundus* гемопаразиты выявлены у 14, при этом *Dactylosoma* sp. обнаружены у всех инфицированных особей (100 %), *Hepatozoon* sp. встречался у 7 особей (50 %), а *Trypanosoma* sp. – у 5 (35.71 %) инфицированных особей (табл. 1).

Таблица 1. Распределение гемопаразитов родов *Hepatozoon*, *Dactylosoma* и *Trypanosoma* sp. у исследованных особей *P. ridibundus*

Пол	*Hepatozoon* sp.	*Dactylosoma* sp.	*Trypanosoma* sp.
♂	-	+	-
♀	+	+	+
♀	+	+	+
♀	-	+	+
♀	-	+	-
♀	-	+	-
♂	+	+	-
♀	+	+	-
♂	-	+	+
♀	-	+	+
♀	+	+	-
♂	+	+	-
♀	+	+	-
♂	-	+	-

Выявлено одновременно наличие гемопаразитов трех родов у двух самок (14.28 %); представителей двух родов – у 8 особей: 3 самцов и 5 самок (57.14 %) и у четырех особей, 2 самцов и 2 самок, обнаружен только один вид (21.42 % от всей выборки) гемопаразита.

Высокий процент экстенсивности инвазии (81.8 %) и индекса обилия (5.90 отн. ед.) свидетельствовал о предпочтительном поражении самок, для которых и доля инфицированных эритроцитов в периферической крови была значимо выше по сравнению с самцами (z = 3.09, p = 0.001) (табл. 2). При этом количество паразитов, приходящееся в среднем на одну зараженную особь у самцов и самок (интенсивность инвазии), не различалось.

Таблица 2. Зараженность озерных лягушек внутриклеточными гемопаразитами

Пол	Число зараженных особей	Число паразитов на 500 эритроцитов	Доля клеток с паразитами	E, %	I, отн. ед.	ИО, отн. ед.
Самки (n = 11)	9	65	0.13	81.80	7.22	5.90
Самцы (n = 13)	5	34	0.068	38.46	6.8	2.61
Всего (n = 24)	14	99	0.198	58.33	7.07	4.12

Факторный дисперсионный анализ показал значимое влияние фактора «пол» (λWilks = 0.0021, p < 0.001), фактора «зараженность лягушек» (λWilks = 0.09, p = 0.0002), а также значимое взаимодействие этих факторов (λWilks = 0.0005, p < 0.001) на совокупность изученных иммуногематологических и морфофизиологических показателей лягушек.

Межполовые различия лейкоцитарного профиля отмечены у здоровых особей. Так, самки имели более высокое значение кровно-клеточного показателя, КПП и индекса сдвига лейкоцитов, ИСЛ, а также пониженное значение лимфоцитарно-гранулоцитарного индекса ИЛГ за счет изменения соотношения гранулоцитов в периферической крови (табл. 3).

Таблица 3. Лейкоцитарный профиль крови (Me / IQR) здоровых и инфицированных озерных лягушек

Показатель, %	Самцы		Самки		Статистические показатели
	Здоровые (n = 8)	Инфицированные (n = 5)	Здоровые (n = 2)	Инфицированные (n = 9)	
	1	2	3	4	
Миелоциты	7.5/4.0	6.0/4.0	14.0/16.0	7.2/2.0	H = 1.29, p = 0.73
Юные нейтрофилы	8.0/1.5	7.0/2.0	8.0/0.0	9.0/1.0	H = 6.10, p = 0.08
Палочкоядерные нейтрофилы	3.5/2.5	6.0/4.0	5.0/2.0	6.0/1.0	H = 2.14, p = 0.54
Сегментоядерные нейтрофилы	**3.0/0.5**	**6.0/1.0**	6.5/1.0	3.0/4.0	H = 11.4, p = 0.009 **D_{1-2} = 2.79, p = 0.03**
Сумма нейтрофилов	16.0/5.5	18.0/7.0	19.5/3.0	20.0/5.0	H = 2.89, p = 0.40
Эозинофилы	7.0/1.5	10.0/5.0	13.5/1.0	7.0/2.0	H = 6.64, p = 0.08
Базофилы	7.0/1.0	5.0/4.0	6.5/1.0	7.0/5.0	H = 1.98, p = 0.57
Моноциты	**10.0/3.5**	10.0/3.0	6.5/1.0	**7.0/1. 0**	H = 20.39, p = 0.0001 **D_{1-4} = 3.40, p = 0.003**
Лимфоциты	52.0/5.0	46.0/11.0	40.0/12.0	52.0/11.0	H = 4.76, p = 0.18
ККП	**0.23/0.07**	0.38/0.09	**0.54/0.11**	0.30/0.17	H = 9.55, p = 0.02 **D_{1-3} = 2.83, p = 0.03**
РОН	0.02/0.01	0.06/0.03	0.05/0.02	0.04/0.07	H = 2.99, p = 0.39
ИЛГ	**37.14/9.66**	20.9/9.94	**15.9/3.52**	29.4/19.85	H = 9.36, p = 0.02 **D_{1-3} = 2.76, p = 0.03**
ИСНЛ	0.13/0.03	0.26/0.0	0.28/0.01	0.17/0.10	H = 8.23, p = 0.04
ИСЛЭ	8.14/2.05	4.6/8.1	2.98/1.11	6.71/3.54	H = 5.27, p = 0.15
ИСНЭ	1.0/0.40	1.0/0.2	0.85/0.29	1.13/0.94	H = 2.18, p = 0.53
ИСЛ	**0.47/0.12**	0.5/0.06	**0.86/0.18**	0.63/0.19	H = 8.42, p = 0.03 **D_{1-3} = 2.67, p = 0.04**
ИЯСН	**7.16/3.75**	**3.67/0.79**	4.26/2.81	6.0/4.0	H = 15.58, p = 0.001 **D_{1-2} = 3.55, p = 0.002**
ЛИИ	0.29/0.12	0.38/0.09	0.51/0.29	0.35/0.14	H = 3.79, p = 0.28

Таблица 3.Продолжение

Показатель, %	Самцы		Самки		Статистические показатели
	Здоровые (n = 8)	Инфицированные (n = 5)	Здоровые (n = 2)	Инфицированные (n = 9)	
	1	2	3	4	
Миелоциты	7.5/4.0	6.0/4.0	14.0/16.0	7.2/2.0	H = 1.29, p = 0.73
Юные нейтрофилы	8.0/1.5	7.0/2.0	8.0/0.0	9.0/1.0	H = 6.10, p = 0.08
Палочкоядерные нейтрофилы	3.5/2.5	6.0/4.0	5.0/2.0	6.0/1.0	H = 2.14, p = 0.54
Сегментоядерные нейтрофилы	3.0/0.5	6.0/1.0	6.5/1.0	3.0/4.0	H = 11.4, **p = 0.009** D1-2 = 2.79, **p = 0.03**
Сумма нейтрофилов	16.0/5.5	18.0/7.0	19.5/3.0	20.0/5.0	H = 2.89, p = 0.40
Эозинофилы	7.0/1.5	10.0/5.0	13.5/1.0	7.0/2.0	H = 6.64, p = 0.08
Базофилы	7.0/1.0	5.0/4.0	6.5/1.0	7.0/5.0	H = 1.98, p = 0.57
Моноциты	10.0/3.5	10.0/3.0	6.5/1.0	7.0/1. 0	H = 20.39, **p = 0.0001** D1-4 = 3.40, **p = 0.003**
Лимфоциты	52.0/5.0	46.0/11.0	40.0/12.0	52.0/11.0	H = 4.76, p = 0.18
ККП	0.23/0.07	0.38/0.09	0.54/0.11	0.30/0.17	H = 9.55, **p = 0.02** D1-3 = 2.83, **p = 0.03**
РОН	0.02/0.01	0.06/0.03	0.05/0.02	0.04/0.07	H = 2.99, p = 0.39
ИЛГ	37.14/9.66	20.9/9.94	15.9/3.52	29.4/19.85	H = 9.36, **p = 0.02** D1-3 = 2.76, **p = 0.03**
ИСНЛ	0.13/0.03	0.26/0.0	0.28/0.01	0.17/0.10	H = 8.23, p = 0.04
ИСЛЭ	8.14/2.05	4.6/8.1	2.98/1.11	6.71/3.54	H = 5.27, p = 0.15
ИСНЭ	1.0/0.40	1.0/0.2	0.85/0.29	1.13/0.94	H = 2.18, p = 0.53
ИСЛ	0.47/0.12	0.5/0.06	0.86/0.18	0.63/0.19	H = 8.42, p = 0.03 D1-3 = 2.67, **p = 0.04**
ИЯСН	7.16/3.75	3.67/0.79	4.26/2.81	6.0/4.0	H = 15.58, **p = 0.001** D1-2 = 3.55, **p = 0.002**
ЛИИ	0.29/0.12	0.38/0.09	0.51/0.29	0.35/0.14	H = 3.79, p = 0.28

Примечание. *H* – критерий Краскела – Уоллиса, *D* – критерий Данна, *p* – уровень значимости; жирным показаны значимые различия.

При этом инфицированные самцы отличались от здоровых повышенным количеством сегментоядерных форм (*D* = 2.79, *p* = 0.03), соответственно, низким значением ядерного сдвига нейтрофилов ИЯСН (*D* = 3.55, *p* = 0.002). Лейкограммы инфицированных самцов и самок статистически значимо не различались.

Зараженность внутриклеточными и внеклеточными гемопаразитами коррелировала с возрастанием в крови озерных лягушек количества миелоцитов (*γ* = 0.44, *p* = 0.004) и возрастанием индекса интоксикации организма ЛИИ (*γ* = 0.30, *p* = 0.04). Выявлена связь снижения общего числа эритроцитов в периферической крови инфицированных особей с общим количеством гемопаразитов (*γ* = -0.37, *p* = 0.01) и отдельно с количеством эритроцитов, зараженных *Hepatozoon* sp. (*γ* = -0.54, *p* = 0.001). Присутствие в кровотоке *Trypanosoma* sp. коррелировало с повышением доли миелоцитов (*γ* = 0.54, *p* = 0.008), сегментоядерных нейтрофильных гранулоцитов (*γ* = 0.56, *p* = 0.1) и интегральным показателем интоксикации ЛИИ (*γ* = 0.64, *p* = 0.002).

Изучение взаимосвязи между интоксикацией организма гемопаразитами и функционированием иммунной системы по уровню циркулирующих иммунных комплексов разного размера выявило возрастание в кровотоке крупных иммунных комплексов (*γ* = 0.40, *p* = 0.009) (рис. 1) и снижение индекса укрупнения (*γ* = -0.30, *p* = 0.04).

Изменение морфофизиологических показателей озерных лягушек коррелировало как с общим количеством внутриклеточных и внеклеточных гемопаразитов, так и с численностью конкретного вида гемопаразита (табл. 4). Показана связь суммарного количества гемопаразитов с увеличением относительного размера печени хозяина.

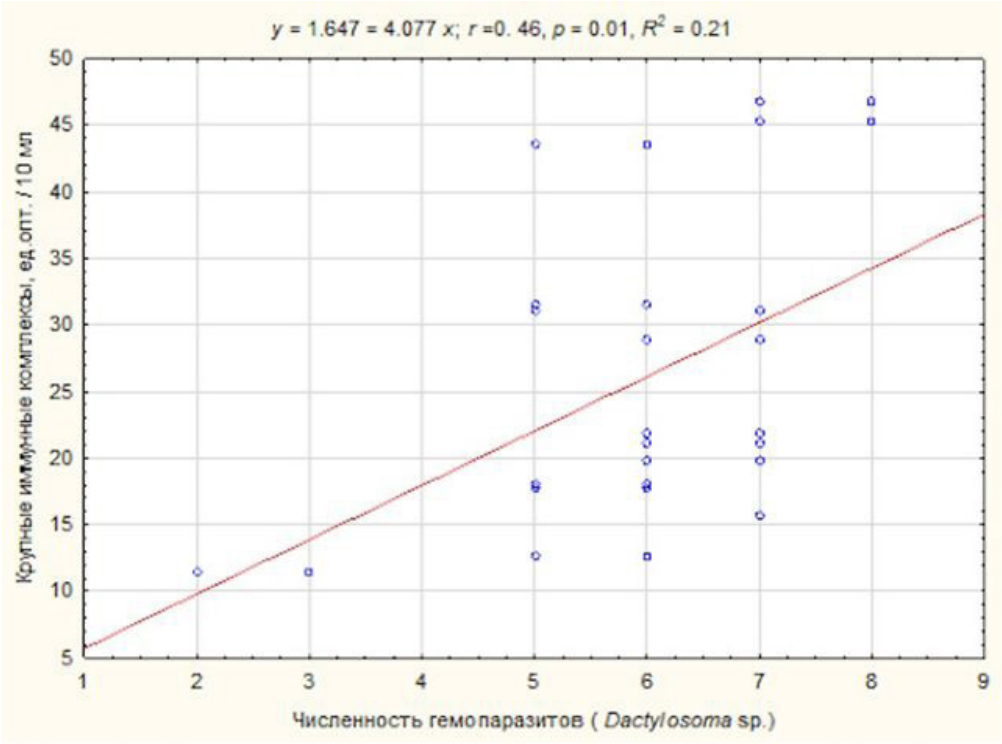


Рис. 1. Зависимость возрастания уровня крупных иммунных комплексов в сыворотке крови озерных лягушек *Pelophylax ridibundus* при инфицировании внутриэритроцитарными паразитами *Dactylosoma* sp.

Fig. 1. Dependence of the increase in the level of large immune complexes in the blood serum of *Pelophylax ridibundus* infected with intraerythrocyte parasites *Dactylosoma* sp.

Таблица 4. Анализ корреляционной взаимосвязи индексов органов инфицированных озерных лягушек с наличием гемопаразитов

Гемопаразиты	Показатель	Гамма-корреляция	Значение *p*
Hepatozoon sp.	Индекс сердца	0.53	0.001
	Индекс печени	0.47	0.005
	Индекс гонад	0.36	0.03
Trypanosoma sp.	Индекс почек	-0.51	0.03
Dactylosoma sp.	Индекс сердца	-0.33	0.03
Сумма внутриклеточных паразитов	Индекс печени	0.37	0.01

Более выраженная статистическая связь морфофизиологических показателей организма хозяина установлена с локализованными в эритроцитах гаметоцитами *Hepatozoon* sp., что проявлялось в увеличении индекса сердца, печени и гонад озерных лягушек. Анализ связи выявил умеренную отрицательную корреляцию между содержанием в эритроцитах гамонтов *Dactylosoma* sp. и снижением индекса сердца у всех инфицированных особей. Подчеркнем, что наличие разнонаправленной корреляции двух признаков (вид гемопаразита и индекс сердца) не может интерпретироваться как доказательство причинно-следственной связи этих признаков. Установлена отрицательная умеренная корреляция между наличием в кровотоке *Trypanosoma* sp. и снижением индекса почек озерных лягушек.

Обсуждение

В естественной среде паразиты являются важной частью биоразнообразия экосистемы, влияя на такие аспекты, как конкуренция хозяев, миграция, видообразование и стабильность (Combes, 1996), они отражают взаимодействие видов их хозяев с окружающей средой, выявляя пищевое поведение и географические ареалы (Dobson et al., 2008). В стабильном симбиотическом сообществе и сбалансированной экосистеме паразиты и их хозяева коэволюционируют, вызывая минимум патогенных эффектов у здорового хозяина.

Интенсивность заражения гемопаразитами озерных лягушек из нашей выборки, собранной в Астраханской области в конце августа 2024 г., была относительно высокой. Внутриэритроцитарные (*Dactylosoma* sp., *Hepatozoon* sp.) и присутствующие в кровотоке *Trypanosoma* sp. определяли общую паразитарную нагрузку организма хозяина (Satapathy et al., 2021) и вносили вклад в модуляцию иммуногематологических показателей организма хозяина. Следует отметить высокую морфологическую изменчивость (Netherlands et al., 2015) внутриклеточных гемопаразитов, связанную, по-видимому, с большим размером эритроцитов и наличием крупных ядер, что предполагает необходимость проведения при дальнейшем изучении молекулярной идентификации вида.

В некоторых работах отмечается, что размер тела особи с возрастом увеличивается, поэтому, чем старше особь, тем выше обилие паразитов (Comas et al., 2014) и тем больше время воздействия паразитов на организм хозяина (Rubenina et al., 2021). В нашем исследовании масса тела большинства особей была сопоставимой (26.57 ± 1.81 г) (за исключением трех крупных особей с массой тела 123.66 ± 2.33 г), и мы не выявили зависимости массы тела лягушек с паразитарной нагрузкой, что согласуется с результатами других исследователей (Coêlho et al., 2021).

Мощной защитой организма является иммунная система. Сравнительный анализ лейкоцитарного профиля здоровых и инфицированных особей выявляет минимум патогенных эффектов гемопаразитов на организм хозяина. Регулирующей функцией иммунной системы организма при инвазии гемопаразитами можно считать активацию неспецифической защиты (количества нейтрофильных гранулоцитов), а также взаимодействие антиген-антитела с образованием циркулирующих комплексов (Костюченко и др., 2002). Формирование иммунных комплексов имеет регуляторное значение и происходит на стыке биохимического, физиологического и иммунного гомеостаза организма, способствуя модуляции клеточного и гуморального иммунного ответа. Можно полагать, что повышенный уровень крупных (но не мелких) иммунных комплексов в ответ на заражение гемопаразитами способствует развитию воспалительной реакции за счет их связывания с комплементом и взаимодействием с рецепторами на тромбоцитах и нейтрофилах. Результатом такого взаимодействия является секреция ферментов и медиаторов кининовой системы с последующей деградацией иммунных комплексов (Добротина и др., 2012). Выявленные статистические связи численности гемопаразитов со снижением индекса укрупнения (умеренная отрицательная корреляция) и возрастанием в крови доли миелоцитов (умеренная положительная корреляция) иллюстрируют как развитие воспалительной реакции, так и некоторое нарушение иммунорегуляции организма озерных лягушек. Такое состояние симбиотической системы (паразит – хозяин) можно считать относительно устойчивым, но если сосуществование нарушается, например, антропогенным разрушением среды обитания или изменением климата, патогенные эффекты могут стать очевидными, что не только приведет к дестабилизации популяции хозяев (Combes, 1996), но может затронуть и глобальные вопросы биоразнообразия и регуляции численности популяций (Dobson et al., 2008; Readel, Goldberg, 2010).

Заключение

Озерные лягушки Астраханской области инфицированы внутриклеточными (*Dactylosoma* sp. и *Hepatozoon* sp.) и внеклеточными (*Trypanosoma* sp.) гемопаразитами. Самки более склонны к инфицированию, чем самцы. Доля пораженных эритроцитов крови у самок была выше по сравнению с самцами. Проведенный сравнительный анализа адаптивных реакций системы крови, функциональной активности иммунитета и морфофизиологических показателей незараженных озерных лягушек показал, что пути адаптации на уровне системы крови к комплексу факторов среды имеют половые различия, проявляющиеся в первую очередь в изменении соотношения гранулоцитарной составляющей защитной системы крови. Лейкоцитарный профиль здоровых и инфицированных самок не различался. Инфицированные самцы отличались от здоровых повышенным числом сегментоядерных нейтрофилов. Более выраженные изменения в морфофизиологических показателях отмечены при инвазии внутриклеточными паразитами. Оценка функционирования иммунной системы при инфицировании гемопаразитами по уровню циркулирующих иммунных комплексов разного размера выявила напряженность гуморального иммунитета озерных лягушек.

Библиография

Гаибова Г. Д., Мамедова С. О. Кровепаразиты озерной лягушки *Pelophylax ridibundus* из водоемов Азербайджана // Вестник Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина. Серия: биология. 2010. Вып. 12, № 920. С. 5–60.

Гриневич Ю. А., Алферов А. Н. Определение иммунных комплексов в крови онкологических больных // Лабораторное дело. 1981. № 8. С. 493–496.

Добротина Н. А., Копытова Т. В., Борисов В. И. Эндоинтоксикация организма человека: экология и биомедицина . Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. 135 с.

Ивантер Э. В., Ивантер Т. В., Туманов И. Л. Адаптивные особенности мелких млекопитающих . Л.: Наука, 1985. 320 с.

Костюченко А. Л., Гуревич К. Я., Беляков Н. А. Повышение активности защитных механизмов детоксикации при эндотоксикозе в популяции озерных лягушек Самарской области // Эфферентная терапия. 2002. Т. 8, № 3. С. 3–9.

Малышева М. Н. К фауне кровепаразитов бесхвостых амфибий (Anura) Киргизии // Паразитология. 2009. Т. 43, № 1. С. 32–45.

Меньшиков В. В., Делекторская Л. Н., Золотницкая Р. П. Лабораторные методы исследования в клинике . М.: Медицина, 1987. 368 с.

Acosta I. C. L., Costa A. P., Nunes P. H., Gondim M. F. N., Gatti A., Rossi J.L. Morphological and molecular characterization and phylogenetic relationships of a new species of trypanosome in *Tapirus terrestris* (lowland tapir), *Trypanosoma terrestris* sp. nov., from Atlantic Rainforest of southeastern Brazil // Parasites & Vectors. 2013. Vol. 6, Article number 349. URL: https://parasitesandvectors.biomedcentral.com/articles/10.1186/1756-3305-6-349 (дата обращения: 07.03.2025).

Baker D. G. Flynn's Parasites of Laboratory Animals. John Wiley & Sons, 2008. P. 149–150.

Beebee T. J. C., Griffiths R. A. The amphibian decline crisis. A watershed for conservation biology? // Biological Conservation. 2005. Vol. 125, iss. 3. P. 271–285.

Bjelić-Čabrilo O., Popović E., Paunović A. Helminthofauna of *Pelophylax* kl. *esculentus* (Linne, 1758) from Petrovaradinski Rit Marsh (Serbia) // Helminthologia. 2009. Vol. 46. P. 107–111. URL: https://doi.org/10.2478/s11687-009-0021-z (дата обращения: 07.03.2025).

Coêlho T. A., De Souza D. C., Da Costa Oliveira E., Correa L. L., Viana L. A., Kawashita-Ribeiro R. A. Haemogregarine of genus *Dactylosoma* (Adeleorina: Dactylosomatidae) in species of *Rhinella* (Anura: Bufonidae) from the Brazilian Amazon // Acta Herpetologica. 2021. Vol. 66. P. 1574–1580. URL: https://europepmc.org/article/med/33997935 (дата обращения: 07.03.2025).

Comas M., Ribas A., Milazzo C., Sperone E., Tripepi S. High levels of prevalence related to age and body condition: host-parasite interactions in a water frog *Pelophylax* kl. *hispanicus* // Acta Herpetologica. 2014. Vol. 9, № 1. P. 25–31. URL: https://oaj.fupress.net/index.php/ah/article/view/1702/1702 (дата обращения: 07.03.2025).

Combes C. Parasites, biodiversity and ecosystem stability // Biodiversity and Conservation. 1996. Vol. 5. P. 953–962.

Davies A. J., Johnston M. R. L. The biology of some intraerythrocytic parasites of fishes, amphibians and reptiles // Advances in Parasitology. 2000. Vol. 45. P. 1–107.

Davis A. K., Devore J. L., Milanovich J. R., Cecala K., Maerz J. C., Yabsley M. J. New findings from an old pathogen: intraerythrocytic bacteria (family Anaplasmatacea) in red-backed salamanders *Plethodon cinereus* // EcoHealth. 2009. Vol. 6. P. 219–228.

Dobson A., Lafferty K. D., Kuris A. M., Hechinger R. F., Jetz W. Homage to Linnaeus: how many parasites? How many hosts? // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2008. Vol. 105, suppl. 1. P. 11482–11489.

Du Preez L. H., Carruthers V. C. Complete Guide to the Frogs of Southern Africa. Cape Town: Struik Nature, 2009. 488 p.

Ferreira J. I. G. da S., da Costa A. P., Ramirez D., Roldan J. A. M., D. Saraiva G. F. R. et al. Anuran trypanosomes: phylogenetic evidence for new clades in Brazil // Systematic Parasitology. 2015. Vol. 91, iss. 1. P. 63–70. URL: https://doi.org/10.1007/s11230-015-9558-z (дата обращения: 07.03.2025).

Khokhlova I. S., Spinu M., Krasnov B. R., Degen A. A. Immune responses to fleas in two rodent species differing in natural prevalence of infestation and diversity of flea assemblages // Parasitology Research. 2004. Vol. 94, iss. 4. P. 304–311. DOI: 10.1007/s00436-004-1215-4.

Leal D. D. M., O'Dwyer L. H, Ribeiro V. C., Reinaldo J. S., Ferreira V. L., Rodrigues R. B. Hemoparasites of the genus *Trypanosoma* (Kinetoplastida: Trypanosomatidae) and hemogregarines in anurans of the Sao Paulo and Mato Grosso do Sul States- Brazil // Anais da Academia Brasileira de Ciências. 2009. Vol. 81, núm. 2. P. 199–206.

Netherlands E. C., Cook C. A., Kruger D. J. D., du Preez L. H., Smit N. J. Biodiversity of frog haemoparasites from sub-tropical northern KwaZulu-Natal, South Africa // International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife. 2015. Vol. 4, iss. 1. P. 135–141. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.

ijppaw.2015.01.003 (дата обращения: 07.03.2025).

Netherlands E. C., Cook C. A., Smit N. J. *Hepatozoon* species (Adeleorina: Hepatozoidae) of African bufonids, with morphological description and molecular diagnosis of *Hepatozoon ixoxo* sp. nov. parasitising three *Amietophrynus* species (Anura: Bufonidae) // Parasites & Vectors. 2014a. Vol. 7, article 552.

Netherlands E. C., Cook C. A., Smit N. J., du Preez L. H. Redescription and molecular diagnosis of *Hepatozoon theileri* (Laveran, 1905) (Apicomplexa: Adeleorina: Hepatozoidae), infecting *Amietia quecketti* (Anura: Pyxicephalidae) // Folia Parasitologica. 2014b. Vol. 61, iss. 4. P. 293–300.

Pavľáková B., Pipová N., Balogová M., Majláth I., Mikulíček P., Majláthova V. Blood parasites of water frogs (*Pelophylax esculentus* complex) from the Danube Delta, Romania // Parasitology International. 2024. Vol. 102. Article 102920. DOI: 10.1016/j.parint.2024.102920 (дата обращения: 07.03.2025).

Peskova T. Yu., Bachevskaya O. N., Plotnikov G. K. Hemoparasites of the Lake Frog *Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771) (Ranidae, Anura) Inhabiting Reservoirs of the North-Western Ciscaucasia // Современная герпетология. 2018. Т. 18, вып. 3/4. С. 146–152. DOI: 10.18500/1814-6090-2018-18-3-4-146-152.

Rajabi F., Javanbakht H., Sajjadi S. S. A preliminary study of haemoparasites in marsh frogs, Pelophylax ridibundus (Ranidae) from Iran // Journal of Entomology and Zoology Studies. 2017. Vol. 5, iss. 4. P. 1314–1317.

Readel A. M., Goldberg T. L. Blood parasites of frogs from an equatorial African montane forest in western Uganda // Journal of Parasitoljgy. 2010. Vol. 96, № 2. P. 448–450.

Rubenina I., Kirjusina M., Ceirans A., Gravele E., Gavarane I., Pupins M., Krasnov B. R. Environmental, anthropogenic, and spatial factors affecting species composition and species associations in helminth communities of water frogs (*Pelophylax esculentus* complex) in Latvia // Parasitology Research. 2021. Vol. 120, iss. 10. P. 3461–3474. DOI: 10.1007/s00436-021-07303-8 (дата обращения: 08.03.2025).

Satapathy A., Bhatt T. K. In-vitro evaluation of lead molecule // The Design and Development of Novel Drugs and Vaccines. Elsevier. 2021. P. 239–245. DOI: 10.1016/B978-0-12-821471-8.00018-0 (дата обращения: 08.03.2025).

Sailasuta A., Satetasit J., Chutmongkonkul M. Pathological Study of Blood parasites in Rice Field Frogs, *Hoplobatrachus rugulosus* (Wiegmann, 1834) // Veterinary Medicine International. 2011. Article ID 850568. P. 1–5. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3171767/pdf/VMI2011-850568.pdf (дата обращения: 08.03.2025).

Stuart S. N., Chanson J. S., Cox N. A., Young B. E., Rodrigues A. S., Fischman D. L. et al. Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide // Science. 2004. Vol. 306. P. 1783–1786. DOI: 10.1126/science.1103538.

Romanova E., Plotnikova V., Gorelov R., Bakiev A. Evaluation of the functional activity of immune responses and physiological parameters of lake frogs *Pelophylax ridibundus* (Amphibia: Ranidae), infected with blood parasites //Principy èkologii. 2025. № 1. P. 66–77. DOI: 10.15393/j1.art.2025.15862

EVALUATION OF THE FUNCTIONAL ACTIVITY OF IMMUNE RESPONSES AND PHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF LAKE FROGS *PELOPHYLAX RIDIBUNDUS* (AMPHIBIA: RANIDAE), INFECTED WITH BLOOD PARASITES

ROMANOVA Elena Borisovna — *D.Sc., Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University, 23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod 603022, Russia, romanova@ibbm.unn.ru*

PLOTNIKOVA Valeria Dmitrievna — *Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University, 23, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod 603022, Russia, psyche_medea@mail.ru*

GORELOV Roman Andreyevich — *Ph.D., Samara Federal Research Center of the RAS, Russia, 10 Komzina St., Togliatti, 445003, Russia, gorelov.roman@mail.ru*

BAKIEV Andrey Gennadyevich — *Ph.D., Samara Federal Research Center of RAS, Russia, 10, Komzina St. Togliatti, 445003, Russia, herpetology@list.ru*

Keywords: amphibians hemoparasites leukocyte indices white cell count organ indices circulating immune complexes

Summary: We carried out a comparative assessment of the hemoparasitic load, immune system functioning and morphophysiological parameters of males (13 individuals) and females (11 individuals) of lake frogs Pelophylax ridibundus from the Astrakhan region of Russia. In the blood of lake frogs (14 individuals: 9 females and 5 males), hemoparasites belonging to three genera: Dactylosoma, Hepatozoon and Trypanosoma were identified. The most common gamonts were Dactylosoma sp. (in 14 individuals), Hepatozoon sp. were found in 7 individuals, and the extracellular form of Trypanosoma sp. - in 5 individuals. The proportion of infected erythrocytes, the extent of invasion, and the index of abundance of hemoparasites in females were significantly higher than in males. Leukocyte profiles of infected males and females did not differ; intersexual differences were found in healthy individuals. The females had a higher blood cell index and a white blood cell shift index, compared with a lower value of the lymphocyte-granulocyte index. Infected males differed from healthy ones by a low neutrophil nuclear shift due to an increase in segmented neutrophils in the blood. Hemoparasite infestation correlated with a decrease in the total number of erythrocytes, an increase in the proportion of myelocytes, an increase in the body's intoxication index, the level of large immune complexes, and a decrease in the enlargement index (the ratio of large to small immune complexes). Localization of Hepatozoon sp. in erythrocytes correlated with an increase in the index of the heart, liver and gonad of lake frogs. A negative correlation was found between the content of Dactylosoma sp. in erythrocytes and a decrease in the heart index in all infected frogs; as well as between the presence of Trypanosoma sp. in the bloodstream and a decrease in the kidney index. The obtained results illustrate the development of an inflammatory reaction and impaired immunoregulation of the body of lake frogs when infected with hemoparasites.

Reviewer: S. M. Lapkov
Reviewer: V. L. Vershinin

Received on: 11 March 2025 **Published on:** 02 April 2025

References

Acosta I. C. L., Costa A. P., Nunes P. H., Gondim M. F. N., Gatti A., Rossi J.L. Morphological and molecular characterization and phylogenetic relationships of a new species of trypanosome in Tapirus terrestris (lowland tapir), Trypanosoma terrestris sp. nov., from Atlantic Rainforest of southeastern Brazil, Parasites & Vectors. 2013. Vol. 6, Article number 349. URL: https://parasitesandvectors.biomedcentral.com/articles/10.1186/1756-3305-6-349 (data obrascheniya: 07.03.2025).

Baker D. G. Flynn's Parasites of Laboratory Animals. John Wiley & Sons, 2008. P. 149–150.

Beebee T. J. C., Griffiths R. A. The amphibian decline crisis. A watershed for conservation biology?, Biological Conservation. 2005. Vol. 125, iss. 3. P. 271–285.

Bjelić-Čabrilo O., Popović E., Paunović A. Helminthofauna of Pelophylax kl. esculentus (Linne, 1758) from Petrovaradinski Rit Marsh (Serbia), Helminthologia. 2009. Vol. 46. P. 107–111. URL: https://doi.org/10.2478/s11687-009-0021-z (data obrascheniya: 07.03.2025).

Coêlho T. A., De Souza D. C., Da Costa Oliveira E., Correa L. L., Viana L. A., Kawashita-Ribeiro R. A. Haemogregarine of genus Dactylosoma (Adeleorina: Dactylosomatidae) in species of Rhinella (Anura: Bufonidae) from the Brazilian Amazon, Acta Herpetologica. 2021. Vol. 66. P. 1574–1580. URL: https://europepmc.org/article/med/33997935 (data obrascheniya: 07.03.2025).

Comas M., Ribas A., Milazzo C., Sperone E., Tripepi S. High levels of prevalence related to age and body condition: host-parasite interactions in a water frog Pelophylax kl. hispanicus, Acta Herpetologica. 2014. Vol. 9, No. 1. P. 25–31. URL: https://oaj.fupress.net/index.php/ah/article/view/1702/1702 (data obrascheniya: 07.03.2025).

Combes C. Parasites, biodiversity and ecosystem stability, Biodiversity and Conservation. 1996. Vol. 5. P. 953–962.

Davies A. J., Johnston M. R. L. The biology of some intraerythrocytic parasites of fishes, amphibians and reptiles, Advances in Parasitology. 2000. Vol. 45. P. 1–107.

Davis A. K., Devore J. L., Milanovich J. R., Cecala K., Maerz J. C., Yabsley M. J. New findings from an old pathogen: intraerythrocytic bacteria (family Anaplasmatacea) in red-backed salamanders Plethodon cinereus, EcoHealth. 2009. Vol. 6. P. 219–228.

Dobrotina N. A. Kopytova T. V. Borisov V. I. Human body endointoxication: ecology and biomedicine. N. Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2012. 135 p.

Dobson A., Lafferty K. D., Kuris A. M., Hechinger R. F., Jetz W. Homage to Linnaeus: how many parasites? How many hosts?, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2008. Vol. 105, suppl. 1. P. 11482–11489.

Du Preez L. H., Carruthers V. C. Complete Guide to the Frogs of Southern Africa. Cape Town: Struik Nature, 2009. 488 p.

Ferreira J. I. G. da S., da Costa A. P., Ramirez D., Roldan J. A. M., D. Saraiva G. F. R. et al. Anuran trypanosomes: phylogenetic evidence for new clades in Brazil, Systematic Parasitology. 2015. Vol. 91, iss. 1. P. 63–70. URL: https://doi.org/10.1007/s11230-015-9558-z (data obrascheniya: 07.03.2025).

Gaibova G. D. Mamedova S. O. Blood parasites of the Eurasian marsh frog Pelophylax ridibundus from the fresh waters of Azerbaijan, Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo universiteta im. V. N. Karazina. Seriya: biologiya. 2010. Vyp. 12, No. 920. P. 5–60.

Grinevich Yu. A. Alferov A. N. Determination of immune complexes in the blood of cancer patients, Laboratornoe delo. 1981. No. 8. P. 493–496.

Ivanter E. V. Ivanter T. V. Tumanov I. L. Adaptive features of small mammals. L.: Nauka, 1985. 320 p.

Khokhlova I. S., Spinu M., Krasnov B. R., Degen A. A. Immune responses to fleas in two rodent species differing in natural prevalence of infestation and diversity of flea assemblages, Parasitology Research. 2004. Vol. 94, iss. 4. P. 304–311. DOI: 10.1007/s00436-004-1215-4.

Kostyuchenko A. L. Gurevich K. Ya. Belyakov N. A. Increased activity of protective detoxification mechanisms in endotoxicosis in the population of marsh frogs of the Samara region, Efferentnaya terapiya. 2002. T. 8, No. 3. P. 3–9.

Leal D. D. M., O'Dwyer L. H, Ribeiro V. C., Reinaldo J. S., Ferreira V. L., Rodrigues R. B. Hemoparasites of the genus Trypanosoma (Kinetoplastida: Trypanosomatidae) and hemogregarines in anurans of the Sao Paulo and Mato Grosso do Sul States- Brazil, Anais da Academia Brasileira de Ciências. 2009. Vol. 81, núm. 2. P. 199–206.

Malysheva M. N. To the fauna of blood parasites of tailless amphibians (Anura) of Kyrgyzstan, Parazitologiya. 2009. T. 43, No. 1. P. 32–45.

Men'shikov V. V. Delektorskaya L. N. Zolotnickaya R. P. Laboratory research methods in the clinic. M.: Medicina, 1987. 368 p.

Netherlands E. C., Cook C. A., Kruger D. J. D., du Preez L. H., Smit N. J. Biodiversity of frog haemoparasites from sub-tropical northern KwaZulu-Natal, South Africa, International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife. 2015. Vol. 4, iss. 1. P. 135–141. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijppaw.2015.01.003 (data obrascheniya: 07.03.2025).

Netherlands E. C., Cook C. A., Smit N. J. Hepatozoon species (Adeleorina: Hepatozoidae) of African bufonids, with morphological description and molecular diagnosis of Hepatozoon ixoxo sp. nov. parasitising three Amietophrynus species (Anura: Bufonidae), Parasites & Vectors. 2014a. Vol. 7, article 552.

Netherlands E. C., Cook C. A., Smit N. J., du Preez L. H. Redescription and molecular diagnosis of Hepatozoon theileri (Laveran, 1905) (Apicomplexa: Adeleorina: Hepatozoidae), infecting Amietia quecketti (Anura: Pyxicephalidae), Folia Parasitologica. 2014b. Vol. 61, iss. 4. P. 293–300.

Pavľáková B., Pipová N., Balogová M., Majláth I., Mikulíček P., Majláthova V. Blood parasites of water frogs (Pelophylax esculentus complex) from the Danube Delta, Romania, Parasitology International. 2024. Vol. 102. Article 102920. DOI: 10.1016/j.parint.2024.102920 (data obrascheniya: 07.03.2025).

Peskova T. Bachevskaya O. N. Plotnikov G. K. Пескова Т. Ю., Бачевская О. Н., Плотников Г. К. Гемопаразиты озерной лягушки Pelophylax ridibundus (Pallas, 1771) (Ranidae, Anura) из водоемов Северо-Западного Предкавказья, Sovremennaya gerpetologiya. 2018. Т. 18, vyp. 3/4. P. 146–152. DOI: 10.18500/1814-6090-2018-18-3-4-146-152.

Rajabi F., Javanbakht H., Sajjadi S. S. A preliminary study of haemoparasites in marsh frogs, Pelophylax ridibundus (Ranidae) from Iran, Journal of Entomology and Zoology Studies. 2017. Vol. 5, iss. 4. P. 1314–1317.

Readel A. M., Goldberg T. L. Blood parasites of frogs from an equatorial African montane forest in western Uganda, Journal of Parasitoljgy. 2010. Vol. 96, No. 2. P. 448–450.

Rubenina I., Kirjusina M., Ceirans A., Gravele E., Gavarane I., Pupins M., Krasnov B. R. Environmental, anthropogenic, and spatial factors affecting species composition and species associations in helminth communities of water frogs (Pelophylax esculentus complex) in Latvia, Parasitology Research. 2021. Vol. 120, iss. 10. P. 3461–3474. DOI: 10.1007/s00436-021-07303-8 (data obrascheniya: 08.03.2025).

Sailasuta A., Satetasit J., Chutmongkonkul M. Pathological Study of Blood parasites in Rice Field Frogs, Hoplobatrachus rugulosus (Wiegmann, 1834), Veterinary Medicine International. 2011. Article ID 850568. P. 1–5. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3171767/pdf/VMI2011-850568.pdf (data obrascheniya: 08.03.2025).

Satapathy A., Bhatt T. K. In-vitro evaluation of lead molecule, The Design and Development of Novel Drugs and Vaccines. Elsevier. 2021. P. 239–245. DOI: 10.1016/B978-0-12-821471-8.00018-0 (data obrascheniya: 08.03.2025).

Stuart S. N., Chanson J. S., Cox N. A., Young B. E., Rodrigues A. S., Fischman D. L. et al. Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide, Science. 2004. Vol. 306. P. 1783–1786. DOI: 10.1126/science.1103538.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 581.526.352.2:502.51(571.51)

ФИТОПЛАНКТОН КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕКИ МАНЫ (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)

ЭЙХВАЛЬД Ксения Александровна — *ФГБОУ ВО Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 644008, Омская область, г. Омск, Институтская площадь, 1, ka.eykhvald@omgau.org*

БАЖЕНОВА Ольга Прокопьевна — *доктор биологических наук, ФГБОУ ВО Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 44008, Омская область, г. Омск, Институтская площадь, 1, olga52@bk.ru*

Ключевые слова:
фитопланктон
видовой состав
таксономическая структура
трофический статус
качество воды
река Мана
Восточная Сибирь

Аннотация: По результатам исследований фитопланктона р. Маны (Красноярский край) в 2021–2024 гг. дополнен его видовой состав, установлена таксономическая структура, доминирующие комплексы водорослей, численность и биомасса, индексы биоразнообразия. Идентифицировано 159 видовых и внутривидовых таксонов водорослей из 7 отделов, основу видового богатства (67.92 %) создают диатомовые водоросли. Доминирующий комплекс фитопланктона формируют случайно-планктонные виды диатомей, безгетероцистные цианопрокариоты, мелкоклеточные зеленые и золотистые водоросли. Индексы биоразнообразия фитопланктонных сообществ свидетельствуют о низком уровне видового разнообразия и средней сложности их структуры. Трофический статус реки преимущественно соответствует олиготрофной категории с переходом к мезотрофной в 2021 году. Качество воды варьируется от 1-го класса «предельно чистая» до 3-го класса «удовлетворительная чистота». Экологическое состояние р. Маны в целом оценивается как удовлетворительное с наличием некоторых негативных процессов, вызванных повышенным антропогенным воздействием.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Т. И. Кутявина

Получена: 08 марта 2025 года **Подписана к печати**: 02 апреля 2025 года

Введение

Оценка экологического состояния различных водных объектов Сибири в настоящее время привлекает пристальное внимание в связи с интенсивным освоением природных ресурсов и необходимостью их усиленной охраны (Габышев, Габышева, 2018; Баженова, Барсукова, 2022; Bazhenova, Barsukova, 2023).

Река Мана является крупным правобережным притоком р. Енисей, впадающим в него в 12 км ниже плотины Красноярской ГЭС. Протяженность реки составляет 475 км, площадь водосборного бассейна – 9320 км^2, падение русла от истоков до устья достигает примерно 1280 м. Среднемесячный сток Маны (по данным гидрометеорологической станции в п. Манском) составляет около 100 м^3/с и значительно меняется в течение года. Скорость течения реки варьируется от 4 км/ч в низовьях до 8 км/ч в верховьях. Средняя глубина колеблется от 68 до 145 см, максимальные глубины не превышают 3.5–4.0 м. Прозрачность воды по диску Секки высокая, обычно до дна. Гидрологические характеристики реки указывают на ее ярко выраженный горный характер. Большая часть тече-

ния р. Маны проходит по территории национального парка «Красноярские Столбы», обозначая его западную границу, но истоки и устье реки находятся вне территории парка (Запекина-Дулькейт, 1972; Наблюдение процессов и явлений..., 2023).

Согласно данным гидрохимического мониторинга, основными загрязняющими веществами воды р. Маны являются железо, алюминий, медь, цинк, марганец. В 2022 г. был зафиксирован случай экстремального загрязнения ионами цинка (144.8 ПДК), а в 2023 г. – ионами меди (28.3 ПДК) (Государственный доклад..., 2023, 2024).

В настоящее время река испытывает и значительную рекреационную нагрузку, в летнее время по ней осуществляется туристический водный сплав. Устье Маны расположено на селитебной территории, и в летнее время здесь происходит неорганизованный отдых местного населения (Река Мана, 2025).

Фитопланктон р. Маны до настоящего времени был изучен недостаточно. Некоторые сведения о диатомовых водорослях реки имеются в работе Б. В. Скворцова (Skvortzow, 1971). Экологическое состояние и качество воды реки исследовали только по показателям перифитона, зоопланктона и зообентоса. По результатам наших предыдущих исследований в 2021–2022 гг. были определены некоторые показатели развития фитопланктона и качество вод реки (Эйхвальд, Баженова, 2022, 2023а, 2023б). Сведения, полученные по результатам исследований реки в 2023–2024 гг., позволили существенно дополнить характеристику ее фитопланктона и более полно оценить качество воды.

Цель работы – оценить современное экологическое состояние и качество воды р. Маны по структурным показателям фитопланктонных сообществ.

Материалы

В статье использованы материалы обработки проб фитопланктона р. Маны, отобранных в период открытой воды в 2021–2024 гг. (рис. 1).

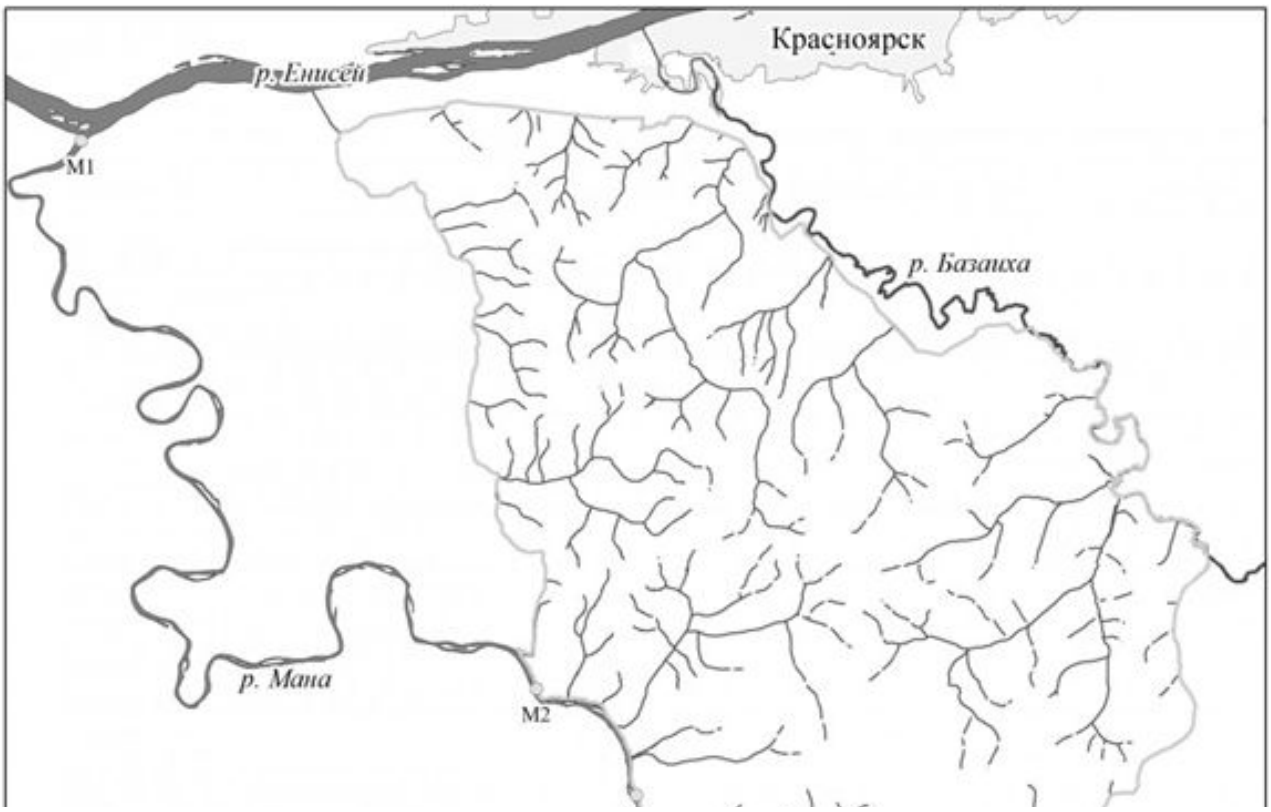


Рис. 1. Карта-схема р. Маны с указанием точек отбора проб: M_1 – устье, M_2 – кордон Кандалак, M_3 – кордон Берлы, M_4 – пос. Береть, M_5 – старица

Fig. 1. A schematic map of the Mana River with sampling points: M1 – estuary, M2 – Kandalak cordon, M3 – Berla cordon, M4 – settlement Beret, M5 – staritsa

Методы

Количественные пробы фитопланктона объемом 0.5 л отбирали зачерпыванием из поверхностного слоя воды. Качественные пробы получали процеживанием 20–50 л воды через сеть Апштейна (газ № 78) и путем интегрирования количественных. Пробы фиксировали 40 % формалином с добавлением раствора Люголя, концентрировали осадочным способом. Обработку проб проводили на световом микроскопе Euler Professor 770T. Численность клеток водорослей учитывали в счетной камере Горяева в двух повторностях, биомассу фитопланктона рассчитывали счетно-весовым методом (Методы гидробиологических исследований..., 2024). Трофический статус и качество воды оценивали по биомассе фитопланктона (Оксиюк и др., 1993).

К доминантам относили виды, численность которых составляла не менее 10 % от общей. Анализ доминирующего комплекса проводили по показателям частоты встречаемости (pF), частоты доминирования (DF) и порядка доминирования (Dt) (Кожова, 1970; Горбулин, 2012).

Таксономический список водорослей составлен с учетом современных систем классификации, видовые названия уточняли с использованием международной базы данных Algaebase (Guiry, Guiry, 2025).

Для изучения параметров альфа-разнообразия фитопланктоценоза в программе PAST (Paleontological Statistics Software for Education and Data Analysis) были рассчитаны индексы Шеннона (H), Маргалефа (d), выравненности сообщества Симпсона (S) и доминирования Симпсона (D) (PAST 4, 2024). Расчет показателей численности и биомассы фитопланктона в среднем по реке проводили в программе Microsoft Office Excel.

Результаты

Температура атмосферного воздуха во время отбора проб фитопланктона в среднем составляла 2.9–17.25 °C. Температура поверхностного слоя воды весной равнялась 6.09 °C, в летний период колебалась в пределах 16.50–22.92 °C. Активная реакция воды изменялась от нейтральной до слабощелочной (7.15–8.62).

В фитопланктоне р. Маны идентифицировано 159 видовых и внутривидовых таксонов, включая номенклатурный ранг вида (ВВТ), из 7 отделов: Bacillariophyta – 108, Chlorophyta – 29, Cyanoprokaryota – 6, Euglenophyta – 6, Chrysophyta – 5, Charophyta – 4, Dinophyta – 1. Основную часть (67.92 %) таксономического списка формируют диатомовые водоросли, значительно уступают им зеленые водоросли (18.24 %). Остальные отделы водорослей значимой роли в формировании видового богатства фитопланктоценоза р. Маны не играют (табл. 1).

Таблица 1. Таксономическая структура фитопланктона р. Маны, 2021–2024 гг.

Отдел	Класс	Количество				
		порядков	семейств	родов	видов	ВВТ
Cyanoprokaryota	Cyanophyceae	3	5	5	6	6
Chrysophyta	Chrysophyceae	1	2	4	5	5
Dinophyta	Dinophyceae	1	1	1	1	1
Euglenophyta	Euglenophyceae	1	2	3	6	6
Bacillariophyta	Coscinodiscaceae	1	1	1	1	1
	Mediophyceae	1	1	2	2	2
	Bacillariophyceae	9	19	36	103	105
Chlorophyta	Chlorophyceae	2	11	14	22	22
	Trebouxiophyceae	2	3	4	6	6
	Ulvophyceae	1	1	1	1	1
Charophyta	Zygnematophyceae	1	2	2	4	4
Всего		23	48	73	157	159

Доминирующий комплекс фитопланктона р. Маны формируют 11 ВВТ из 4 отделов, в т. ч.: Cyanoprokaryota – 3, Bacillariophyta – 5, Chlorophyta – 2, Chrysophyta – 1. К доминирующим видам относится 7.43 % от общего числа ВВТ, в их составе преобладают диатомеи.

Высокая встречаемость (pF = 70–100) отмечалась у *Cocconeis placentula* Ehr., *C. euglypta* Ehr. и *Aphanocapsa holsatica* (Lemm.) Cronb. et Komarek. Максимальные показатели порядка и частоты доминирования (DF = 100, Dt = 100) характерны для цианопрокариоты *A. holsatica* и диатомеи *C. euglypta*.

Показатели общей численности и общей биомассы фитопланктона в среднем по реке в разные годы исследований значительно варьировали, колеблясь в широких пределах в зависимости от сезона отбора проб (рис. 2).

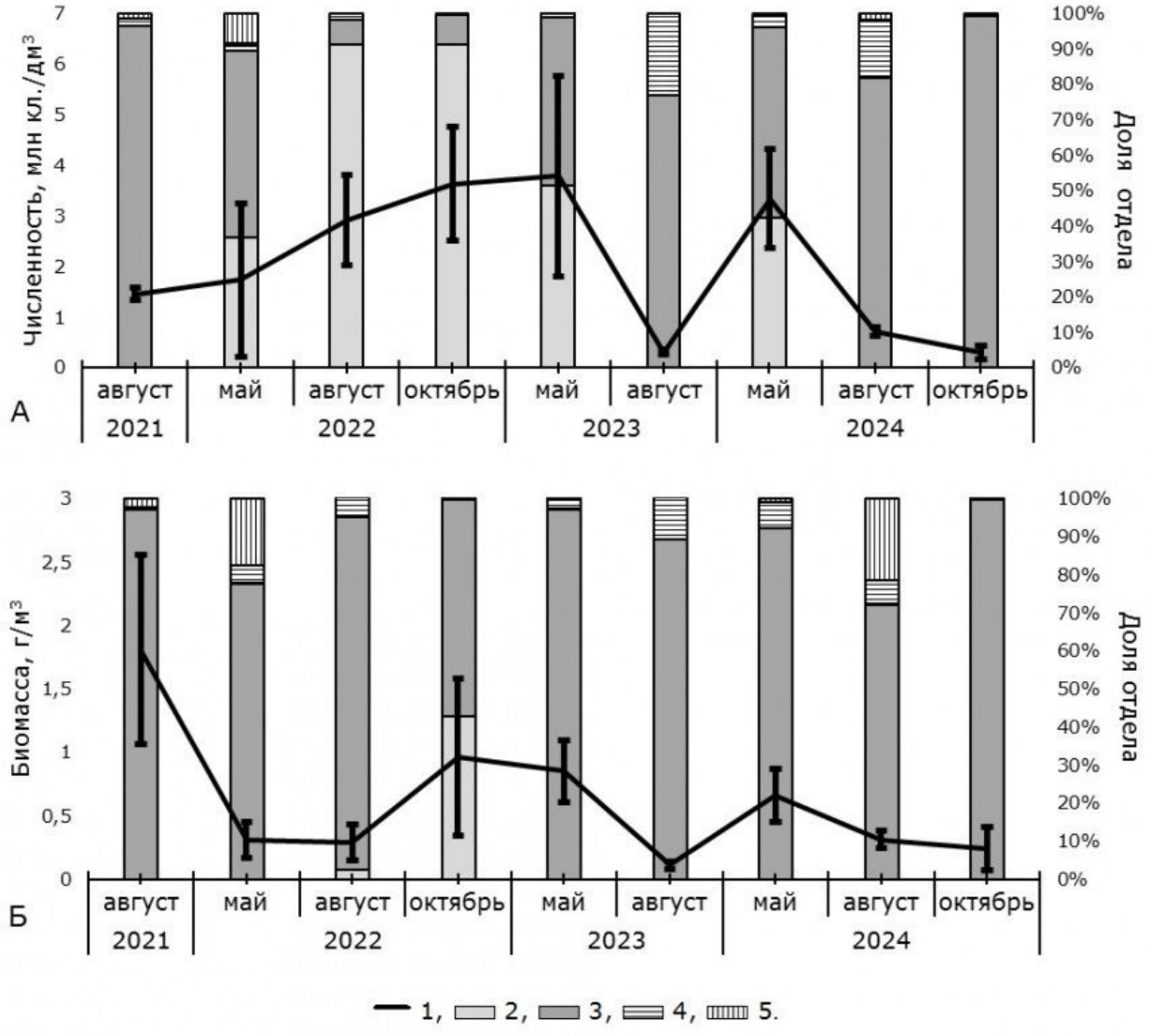


Рис. 2. Сезонная и межгодовая динамика общей численности (А) и общей биомассы (Б) фитопланктона р. Маны, 2021–2024 гг.: 1 – средняя общая численность (А, млн кл./дм³), средняя биомасса (Б, г/м³); средний вклад (%) отделов водорослей: 2 – Cyanoprokaryota, 3 – Bacillariophyta, 4 – Chlorophyta, 5 – прочие

Fig. 2. Seasonal and interannual dynamics of the total abundance (A) and total biomass (B) of phytoplankton in the Mana River, 2021–2024: 1 – average total abundance (A, million cells/dm³), average biomass (B, g/m³); average contribution (%) of algae divisions: 2 – Cyanoprokaryota, 3 – Bacillariophyta, 4 – Chlorophyta, 5 – others

Наибольший вклад в формирование общей численности фитопланктона весной 2022 и 2024 гг. вносили диатомовые водоросли (в среднем 52.69 и 53.81 %), а в 2023 г. – цианопрокариоты (51.28 %). Максимальная численность (3.79 ± 1.98 млн кл./дм^3) и биомасса (0.85 ± 0.24 г/м^3) фитопланктона наблюдалась весной 2023 г. Основу биомассы весеннего фитопланктона во все годы исследований формируют диатомеи (77.36–96.74 %).

В летний сезон общая численность фитопланктона р. Маны колебалась от 0.30 ± 0.05 до 2.91 ± 0.89 млн кл./дм^3, а биомасса от 0.11 ± 0.03 до 1.81 ± 0.75 г/м^3. Максимальный вклад в численность и биомассу летнего фитопланктона вносили диатомовые водоросли, доля которых составляла соответственно 96.70 и 97.09 %. Вклад водорослей других отделов был минимальным, и только летом 2022 г. наблюдалась интенсивная вегетация цианопрокариот рода *Aphanocapsa*, формирующих 91.36 % общей численности фитопланктона (см. рис. 2).

В осенний сезон максимальная численность (3.63 ± 1.12 млн кл./дм^3) и биомасса (0.96 ± 0.62 г/м^3) фитопланктона р. Маны была отмечена в 2022 г. В это время основу общей численности фитопланктона реки формировали цианопрокариоты *Pleurocapsa minor*, а в 2024 г. – диатомовые водоросли. Основу общей биомассы фитопланктона попрежнему создавали диатомовые водоросли.

Трофический статус р. Маны по показателям развития фитопланктона в годы исследований соответствовал олиготрофной категории вод, исключением являлось лето 2021 г., когда воды реки относились к мезотрофной категории. Класс качества воды варьировал от 1-го класса «предельно чистая» до 3-го класса «удовлетворительной чистоты» (разряд «достаточно чистая») (табл. 2).

Таблица 2. Качество воды и трофический статус р. Маны в 2021–2024 гг.

Время отбора проб	Класс качества воды по биомассе фитопланктона	Класс качества воды по УКИЗВ*	Категория трофности
2021			
август	3а – удовлетворительной чистоты	4а – загрязненная	мезотрофная
2022			
май	2а – чистая	3б – удовлетворительной чистоты	олиготрофная
август	2а – чистая		
октябрь	2б – чистая		
2023			
май	2б – чистая	4а – загрязненная	олиготрофная
август	1 – предельно чистая		
2024			
май	2б – чистая	нет данных	олиготрофная
август	2а – чистая		
октябрь	2а – чистая		

Примечание. * – УКИЗВ – удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (Государственный доклад..., 2024).

Параметры альфа-разнообразия фитопланктоценоза р. Маны имеют невысокие значения, варьируя в широких пределах в зависимости от времени и места отбора. Индекс Маргалефа изменялся в пределах от 0.68 до 2.36, в среднем составляя 1.32 ± 0.08. Индекс Шеннона колебался от 0.10 до 2.19, в среднем 1.30 ± 0.11. Индекс выравненности Симпсона варьировал от 0.03 до 0.87, в среднем 0.56 ± 0.05. Индекс доминирования Симпсона – 0.13–0.97, в среднем 0.44 ± 0.05.

Обсуждение

Температура и активная реакция воды р. Маны достаточно благоприятны для вегетации водорослей. Существенно ограничивают развитие фитопланктона высокая скорость течения этой горной реки и повышенные концентрации тяжелых металлов, особенно цинка и меди. Известно, что высокая концентрация ионов тяжелых металлов подавляет развитие фитопланктона (Габышев, Габышева, 2020).

Видовое богатство фитопланктона реки относительно невысокое. Характерной особенностью таксономической структуры фитопланктона является преобладание диатомовых водорослей и низкое видовое богатство водорослей других отделов, что является характерной чертой горных водотоков и водоемов и отмечено многими исследователями в различных физико-географических зонах (Комулайнен и др., 2006; Митрофанова, 2009; Kaddeche et al., 2022; Bushi, Nimasow, 2024).

Особенностью доминирующих комплексов фитопланктона являлось преобладание в их составе случайно-планктонных видов диатомей и безгетероцистных цианопрокариот. Первое связано с тем, что роль диатомовых водорослей в водных экосистемах в целом значительна, а в альгофлоре горных водотоков они занимают лидирующие позиции (Митрофанова, 2009; Bushi, Nimasow, 2024). Доминирование цианопрокариот свидетельствует об увеличении трофического статуса вод (Корнева, Глущенко, 2020; Bazhenova, Mikhailov, 2021), что связано с повышенным антропогенным воздействием на р. Ману.

Значимость случайно-планктонных диатомей в формировании общей численности и биомассы фитопланктона, особенно весной, отмечена многими исследователями (Митрофанова, 2009; Габышев, Габышева, 2018; Фитопланктон Омского Прииртышья, 2019). Что касается цианопрокариот, то известно, что многие из них проводят зиму в покоящемся состоянии в грунтах и донных отложениях (Скабичевский, 1954; Wang et al., 2023).

Снижение численности и биомассы фитопланктона в р. Мане в летний период связано с разнонаправленным влиянием различных гидрометеорологических, гидрологических и гидрохимических факторов, которое часто бывает не прямым, а опосредованным и проявляется с некоторым запозданием (Девяткин и др., 2001; Минеева, 2004; Abba, 2019).

В целом многолетняя и сезонная динамика обилия фитопланктона р. Маны обусловлена пространственно-временными различиями гидрометеорологических и гидрологических параметров, повышенным антропогенным воздействием и подчиняется общим закономерностям функционирования экосистем умеренных и высоких широт (Chang et al., 2021; Bushi, Nimasow, 2024).

Показатели альфа-биоразнообразия для фитопланктоценоза р. Маны указывают на невысокое количество составляющих его видов, а сложность структуры фитопланктоценоза реки близка к средней, что связанно с неблагоприятными условиями среды (Розенберг, 2007; Bushi, Nimasow, 2024).

Установленное в наших исследованиях качество воды р. Маны по биомассе фитопланктона существенно выше, чем качество воды, установленное по УКИЗВ (см. табл. 2), что еще раз, по нашему мнению, свидетельствует о том, что система качества вод, основанная только на гидрохимических показателях, не имеет научного обоснования для объективной оценки экологического состояния водных объектов (Шитиков и др., 2003). Более адекватно этот вопрос решается с помощью различных методов биоиндикации.

Заключение

Для фитопланктона р. Маны характерно относительно низкое видовое богатство, что связанно с горным характером реки. Наиболее значимую роль в составе доминантов играют случайно-планктонные виды диатомей рода *Cocconeis* и безгетероцистные цианопрокариоты из рода *Aphanocapsa*, чье массовое развитие свидетельствует о негативных процессах, связанных с повышенным антропогенным воздействием.

Межгодовая и сезонная динамика обилия фитопланктона р. Маны обусловлена пространственно-временными различиями гидрометеорологических и гидрологических параметров, повышенным антропогенным воздействием и подчиняется общим закономерностям функционирования экосистем умеренных и высоких широт.

Экологическое состояние р. Маны в целом оценивается как удовлетворительное с наличием некоторых негативных процессов, вызванных повышенным антропогенным воздействием.

Библиография

Баженова О. П., Барсукова Н. Н. Первые сведения о фитопланктоне и экологическом состоянии реки Васюган (Томская область) // Сибирский экологический журнал. 2022. Т. 29, № 6. С. 742–750. DOI: 10.15372/SEJ20220610

Габышев В. А., Габышева О. И. К изучению влияния тяжелых металлов на развитие фитопланктона озер г. Якутска и окрестностей // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 4. С. 81–91. DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-4-6

Габышев В. А., Габышева О. И. Фитопланктон крупных рек Якутии и сопредельных территорий Восточной Сибири / Под ред. Л. Г. Корневой. Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2018. 414 с.

Горбулин О. С. Комплексы доминантных форм фитопланктона разнотипных водоемов // Альгология. 2012. Т. 22, № 3. С. 303–315.

Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2022 году» . Красноярск, 2023. 367 с.

Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2023 году» . Красноярск, 2024. 356 с.

Девяткин В. Г., Метелева Н. Ю., Митропольская И. В. Гидрофизические факторы продуктивности литорального фитопланктона: оценка и прогноз содержания хлорофилла а и интенсивности фотосинтеза // Биология внутренних вод. 2001. № 1. С. 36–45.

Запекина-Дулькейт Ю. И. Производительность донной фауны реки Маны и ее изменение в связи с лесосплавом // Труды государственного заповедника «Столбы». Вып. IX. Красноярск, 1972. С. 5–105.

Кожова О. М. Формирование фитопланктона Братского водохранилища // Формирование природных условий и жизни Братского водохранилища. М.: Наука, 1970. С. 26–160.

Комулайнен С. Ф., Чекрыжева Т. А., Вислянская И. Г. Альгофлора озер и рек Карелии. Таксономический состав и экология . Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2006. 81 с.

Корнева Л. Г., Глущенко Г. Ю. Состав и сезонная сукцессия фитопланктона Таганрогского залива Азовского моря и нижнего течения р. Дон в условиях изменяющегося климата // Биология внутренних вод. 2020. Т. 13, № 1. С. 18–25. DOI: 10.31857/S032096522001009X

Методы гидробиологических исследований внутренних вод / А. В. Крылов, И. А. Барышев, Д. М. Безматерных ; Под ред. А. В. Крылова. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Минеева Н. М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ . М.: Наука, 2004. 156 с.

Митрофанова Е. Ю. Водоросли планктона горных водотоков (на примере водотоков бассейна Телецкого озера, Россия) // Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге: Материалы II Всерос. конф. Сыктывкар: Ин-т биологии Коми НЦ УрО РАН, 2009. С. 104–107.

Наблюдение процессов и явлений в природном комплексе национального парка «Красноярские Столбы» и их изучение по программе «Летопись природы» . Книга 82 (2022 г.). Красноярск, 2023. 305 с.

Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.

Река Мана : URL: https://sibguide.ru/place/reka-mana-2/ (дата обращения: 13.01.2025).

Розенберг Г. С. Несколько слов об индексе разнообразия Симпсона // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2007. Т. 21, № 3. С. 581–584.

Скабичевский А. П. О залежах планктонных водорослей в грунтах реки Иртыша // Доклады АН СССР. 1954. Т. 96, № 4. С. 861–864.

Фитопланктон Омского Прииртышья / О. П. Баженова, Н. Н. Барсукова, И. Ю. Игошкина, О. А. Коновалова, Л. В. Коржова, О. О. Кренц; Под общ. ред. О. П. Баженовой. Омск: Изд-во ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2019. 320 с.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации . Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

Эйхвальд К. А., Баженова О. П. Трофический статус и качество воды рек и ручьев национального парка «Красноярские столбы» // Экологические чтения–2022: Сб. науч. трудов XIII Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск: Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, 2022. С. 415–421.

Эйхвальд К. А., Баженова О. П. Дополнения к фитопланктону водных объектов национального парка «Красноярские столбы» // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2023а. Т. 22, № 1. С. 427–431. DOI: 10.14258/pbssm.2023082

Эйхвальд К. А., Баженова О. П. Фитопланктон как показатель качества воды реки Мана национального парка «Красноярские столбы» // Экологические чтения–2023: Сб. науч. трудов XIV Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск: Омский государственный аграрный универ-

ситет имени П. А. Столыпина, 2023б. С. 703–707.
Abba A. Changes in phytoplankton community dynamics during the transition from dry to rainy season: a case study of Kpata Lake, Lokoja, Kogi State Nigeria // FUDMA J. Sci. 2019. Vol. 3, № 1. P. 328–332.
Bazhenova O. P., Barsukova N. N. Phytoplankton of the Ket River (Tomsk Region) // Acta Biologica Sibirica. 2023. Vol. 9. P. 55–69. DOI: 10.5281/zenodo.7680101
Bazhenova O. P., Mikhailov V. V. Phytoplankton as an indicator of the modern ecological state of the Novosibirsk reservoir // Inland Water Biology. 2021. Vol. 14, № 6. P. 670–678. DOI: 10.1134/S1995082921050023
Bushi D., Nimasow G. Seasonal variation of limnological parameters and phytoplankton dynamics in the high-altitude oligotrophic lakes of Tawang district, Arunachal Pradesh (India) // Aquat. Ecol. 2024. Vol. 58, № 3. P. 801–818. DOI: 10.1007/s10452-024-10106-5
Chang C., Gao L., Wei J., Ma N., He Q., Pan B., Li M. Spatial and environmental factors contributing to phytoplankton biogeography and biodiversity in mountain ponds across a large geographic area // Aquat. Ecol. 2021. Vol. 55, № 2. P. 721–735. DOI: 10.1007/s10452-021-09857-2
Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. URL: https://www.algaebase.org/ (Accessed January 2025).
Kaddeche H., Noune F., Dzizi S., Chaib N., Eddine Boudjellab Z., Blanco S. Determinant factors of diatom assemblage's distribution along the Coastal Central Constantine (Northeastern Algeria) // Aquat. Ecol. 2022. Vol. 56, № 4. P. 1245–1269. DOI: 10.1007/s10452-022-09980-8
PAST 4 the Past of the Future (https://www.nhm.uio.no/english/) (дата обращения: 09.12.2024).
Skvortzow B. W. Diatoms from Yenisei River and its tributaries, middle part of Siberia, Western Asia // Philippine Journal of Science. 1971. Vol. 98, № 1. P. 57–113.
Wang L., Zhang M., Meng Y., Meng Y., Yang Z., Shi X., Shi L. Responses of phytoplankton community dynamics to reduced underwater light in spring // Aquat. Ecol. 2023. Vol. 57, № 3. P. 797–812. DOI: 10.1007/s10452-023-10050-w

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность доктору биол. наук, зам. директора по научной работе А. А. Кнорре и ведущему научному сотруднику Е. Ф. Тропиной (Национальный парк «Красноярские Столбы») за помощь в организации исследований, а также доктору биол. наук, главному научному сотруднику Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН С. И. Генкалу за помощь в идентификации диатомовых водорослей.

Исследования проводились в рамках выполнения темы НИР «Изучение естественного хода процессов и явлений в природном комплексе национального парка Красноярские Столбы с целью выявления многолетней динамики экосистем и сохранения природной среды», № госрегистрации 1-22-106-1, выполнена при финансовой поддержке АО «РУСАЛ Красноярск» (договор № 29.03.02/2022 от 01.03.2022) по проекту «Мониторинг антропогенного (техногенного) воздействия на лесные экосистемы национального парка "Красноярские Столбы"».

PHYTOPLANKTON AS AN IDICATOR OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE MANA RIVER (KRASNOYARSK REGION)

EICHWALD Xenia Alexandrovna *P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University, 644008, Omsk region, Omsk, Institutskaya Square, 1., ka.eykhvald@omgau.org*

BAZHENOVA Olga Prokopyevna *D.Sc., P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University, 644008, Omsk region, Omsk, Institutskaya Square, 1., olga52@bk.ru*

Keywords:
phytoplankton
species composition
taxonomic structure
trophic status
water quality
Mana River
Eastern Siberia

Summary: According to the results of phytoplankton studies in the Mana River (Krasnoyarsk Region) in 2021–2024, its species composition was supplemented, as well as its taxonomic structure, dominant algae complexes, abundance and biomass, and biodiversity indices were established. 159 species and intraspecific taxa of algae from 7 divisions were identified. It was found that the basis of the species richness (67.92%) is created by diatoms. The dominant phytoplankton complex is formed by randomly planktonic diatom species, heterocyst-free cyanoprokaryotes, and small cell green and yellow-green algae. The biodiversity indices of the phytoplankton communities indicate a low level of species diversity and an average complexity of their structure. The trophic status of the river mainly corresponds to the oligotrophic category of waters, with the transition to mesotrophic in 2021. The water quality ranges from class 1 «extremely clean» to class 3 «satisfactory purity». The ecological state of the Mana River is generally assessed as satisfactory with the presence of some negative processes caused by increased anthropogenic impact.

Reviewer: T. I. Kutavina

Received on: 08 March 2025 Published on: 02 April 2025

References

Abba A. Changes in phytoplankton community dynamics during the transition from dry to rainy season: a case study of Kpata Lake, Lokoja, Kogi State Nigeria, FUDMA J. Sci. 2019. Vol. 3, No. 1. P. 328–332.

Bazhenova O. P. Barsukova N. N. The first information about phytoplankton and the ecological state of the Vasyugan River (Tomsk region), Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 2022. T. 29, No. 6. P. 742–750. DOI: 10.15372/SEJ20220610

Bazhenova O. P., Barsukova N. N. Phytoplankton of the Ket River (Tomsk Region), Acta Biologica Sibirica. 2023. Vol. 9. P. 55–69. DOI: 10.5281/zenodo.7680101

Bazhenova O. P., Mikhailov V. V. Phytoplankton as an indicator of the modern ecological state of the Novosibirsk reservoir, Inland Water Biology. 2021. Vol. 14, No. 6. P. 670–678. DOI: 10.1134/S1995082921050023

Bushi D., Nimasow G. Seasonal variation of limnological parameters and phytoplankton dynamics in the high-altitude oligotrophic lakes of Tawang district, Arunachal Pradesh (India), Aquat. Ecol. 2024. Vol. 58, No. 3. P. 801–818. DOI: 10.1007/s10452-024-10106-5

Chang C., Gao L., Wei J., Ma N., He Q., Pan B., Li M. Spatial and environmental factors contributing to phytoplankton biogeography and biodiversity in mountain ponds across a large geographic area, Aquat. Ecol. 2021. Vol. 55, No. 2. P. 721–735. DOI: 10.1007/s10452-021-09857-2

Devyatkin V. G. Meteleva N. Yu. Mitropol'skaya I. V. Hydrophysical factors of littoral phytoplankton productivity: assessment and forecast of chlorophyll A content and photosynthesis intensity, Biologiya vnutrennih vod. 2001. No. 1. P. 36–45.

Dul'keyt Yu. I. Productivity of the bottom fauna of the Mana River and its changes in connection with logging, Trudy gosudarstvennogo zapovednika «Stolby». Vyp. IX. Krasnoyarsk, 1972. P. 5–105.

Eyhval'd K. A. Bazhenova O. P. Additions to the phytoplankton of the water bodies of the Krasnoyarsk Pillars National Park, Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii. 2023a. T. 22, No. 1. P. 427–431. DOI: 10.14258/pbssm.2023082

Eyhval'd K. A. Bazhenova O. P. Phytoplankton as an indicator of the water quality of the Mana River in the Krasnoyarsk Pillars National Park, Ekologicheskie chteniya–2023: Sb. nauch. trudov HIV Nac.

nauch, prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet imeni P. A. Stolypina, 2023b. P. 703–707.
Eyhval'd K. A. Bazhenova O. P. Trophic status and water quality of rivers and streams of the Krasnoyarsk Pillars National Park, Ekologicheskie chteniya–2022: Sb. nauch. trudov XIII Nac. nauch, prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet imeni P. A. Stolypina, 2022. P. 415–421.
Gabyshev V. A. Gabysheva O. I. Phytoplankton of large rivers of Yakutia and adjacent territories of Eastern Siberia, Pod red. L. G. Kornevoy. Novosibirsk: Izd. ANS «SibAK», 2018. 414 p.
Gabyshev V. A. Gabysheva O. I. To study the influence of heavy metals on the development of phytoplankton in the lakes of Yakutsk and its surroundings, Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. 2020. T. 25, No. 4. P. 81–91. DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-4-6
Gorbulin O. S. Complexes of dominant forms of phytoplankton of different types of reservoirs, Al'gologiya. 2012. T. 22, No. 3. P. 303–315.
Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. URL: https://www.algaebase.org/ (Accessed January 2025).
Kaddeche H., Noune F., Dzizi S., Chaib N., Eddine Boudjellab Z., Blanco S. Determinant factors of diatom assemblage's distribution along the Coastal Central Constantine (Northeastern Algeria), Aquat. Ecol. 2022. Vol. 56, No. 4. P. 1245–1269. DOI: 10.1007/s10452-022-09980-8
Komulaynen S. F. Chekryzheva T. A. Vislyanskaya I. G. Algoflora of lakes and rivers of Karelia. Taxonomic composition and ecology. Petrozavodsk: Karel'skiy nauch. centr RAN, 2006. 81 p.
Korneva L. G. Gluschenko G. Yu. Composition and seasonal succession of phytoplankton of Taganrog Bay in the Sea of Azov and the downstream reaches of the Don River in a changing climate, Biologiya vnutrennih vod. 2020. T. 13, No. 1. P. 18–25. DOI: 10.31857/S032096522001009X
Kozhova O. M. Formation of phytoplankton of the Bratsk reservoir, Formirovanie prirodnyh usloviy i zhizni Bratskogo vodohranilischa. M.: Nauka, 1970. P. 26–160.
Methods of hydrobiological studies of inland waters, A. V. Krylov, I. A. Baryshev, D. M. Bezmaternyh ; Pod red. A. V. Krylova. Yaroslavl': Filigran', 2024. 592 p.
Mineeva N. M. Plant pigments in the water of the Volga reservoirs. M.: Nauka, 2004. 156 p.
Mitrofanova E. Yu. Algae of plankton of mountain streams (on the example of the streams of the Lake Teletskoye basin, Russia), Vodorosli: problemy taksonomii, ekologii i ispol'zovanie v monitoringe: Materialy II Vserop. konf. Syktyvkar: In-t biologii Komi NC UrO RAN, 2009. P. 104–107.
Observation of processes and phenomena in the natural complex of the Krasnoyarsk Pillars National Park and their study under the Chronicle of Nature program. Kniga 82 (2022 g.). Krasnoyarsk, 2023. 305 p.
Oksiyuk O. P. Zhukinskiy V. N. Braginskiy L. P. Linnik P. N. Kuz'menko M. I. Klenus V. G. Complex ecological classification of the quality of land surface waters, Gidrobiologicheskiy zhurnal. 1993. T. 29, No. 4. P. 62–76.
PAST 4 the Past of the Future (https://www.nhm.uio.no/english/) (data obrascheniya: 09.12.2024).
Phytoplankton of the Omsk Irtysh region, O. P. Bazhenova, N. N. Barsukova, I. Yu. Igoshkina, O. A. Konovalova, L. V. Korzhova, O. O. Krenc; Pod obsch. red. O. P. Bazhenovoy. Omsk: Izd-vo FGBOU VO Omskiy GAU, 2019. 320 p.
Rozenberg G. S. A few words about the Simpson Diversity Index, Samarskaya Luka: problemy regional'noy i global'noy ekologii. 2007. T. 21, No. 3. P. 581–584.
Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Zinchenko T. D. Quantitative hydroecology: methods of system identification. Tol'yatti: IEVB RAN, 2003. 463 p.
Skabichevskiy A. P. About deposits of planktonic algae in the soils of the Irtysh River, Doklady AN SSSR. 1954. T. 96, No. 4. P. 861–864.
Skvortzow B. W. Diatoms from Yenisei River and its tributaries, middle part of Siberia, Western Asia, Philippine Journal of Science. 1971. Vol. 98, No. 1. P. 57–113.
State report «On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2022». Krasnoyarsk, 2023. 367 p.
State report «On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2023». Krasnoyarsk, 2024. 356 p.
The Mana River: URL: https://sibguide.ru/place/reka-mana-2/ (data obrascheniya: 13.01.2025).
Wang L., Zhang M., Meng Y., Meng Y., Yang Z., Shi X., Shi L. Responses of phytoplankton community dynamics to reduced underwater light in spring, Aquat. Ecol. 2023. Vol. 57, No. 3. P. 797–812. DOI: 10.1007/s10452-023-10050-w

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

УДК 528

БИБЛИОТЕКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ТУРКМЕНИСТАНА

АННАНИЯЗОВ Какабай Оразович
Национальный институт пустынь, растительного и животного мира Министерства охраны окружающей среды Туркменистана, 941405, Туркменистан, г. Ашгабат, ул. Битарап Туркменистан, 15, kakabay5211@mail.ru

ХУДАЙНАЗАРОВ Сердар Аманязович
Туркменский государственный университет имени Махтумкули, 744000, Туркменистан, г. Ашгабат, пр. С. Туркменбаши, 31, serdarhudaynazarov1989@gmail.com

Ключевые слова:
спектральная библиотека
спектр
космические снимки
концепция
растительный покров

Аннотация: В статье описывается механизм создания спектральной библиотеки природных объектов (основной растительный покров пустыни Каракумы). Сформулирована Концепция создания спектральной библиотеки растительности. Представлена пилотная версия спектральной библиотеки растительности Туркменистана (26 видов пастбищной растительности). Научно-исследовательские работы проводились в восточных районах страны, в Центральных Каракумах и в окрестностях Прикаспийской низменности. При гиперспектральном дешифрировании космических снимков функциональное значение спектральных библиотек заключается в определении типа, географического положения и распределения растительности по спектру. Библиотека содержит пакеты характеристик для каждого вида, включая: описание объекта, данные спектрометрических измерений в виде графиков, географические координаты, фотографию образца. Спектральная библиотека растительности Туркменистана может быть использована для систематического наблюдения за состоянием растительного покрова, получения оперативной информации о направлении и масштабах происходящих в них изменений, мониторинга окружающей среды, картирования растительности, разработки методов дистанционного зондирования Земли.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 12 апреля 2024 года **Подписана к печати**: 02 апреля 2025 года

Введение

Библиотека спектральных характеристик объектов на поверхности Земли – это ценный источник информации для обработки данных дистанционного зондирования. В ней собраны пространственные данные, такие как географическая основа, материалы дистанционного зондирования, результаты тематического дешифрирования и спектральные характеристики природных объектов, включая растительные культуры (Аншаков и др., 2013; Касимов и др., 2015). Они незаменимы при дешифрировании гиперспектральных космических снимков. Для повышения достоверности дешифрирования космических снимков спектральные библиотеки формируются из базы данных, полученных из систематических наземных (полевых) спектрометрических измерений. В качестве пилотной версии нами разработана концепция создания спектральной библиотеки исследуемого природного объекта (растительных культур) на территории во-

круг озера Алтын Асыр и Лебапского региона Туркменистана.

При создании данной концепции были поставлены и решались следующие задачи:

– разработка принципов формирования спектральной библиотеки исследуемого природного объекта;

– систематическое получение спектральных характеристик различных природных объектов и формирование банка данных в спектральной библиотеке из исследуемых регионов Туркменистана;

– создание пилотной версии спектральной библиотеки растительности Туркменистана.

Оригинальные методы исследований

Принципы формирования эталонной спектральной библиотеки исследуемого природного объекта (растительных культур) Туркменистана

Структурно формируемая спектральная библиотека состоит из наименования исследуемого природного объекта (1-я колонка) и банка данных (со 2-й по *n* колонку). На основе опыта работы в области дешифрирования космических снимков, получения, обработки и использования данных полевых спектрометрических измерений (Создание системы..., 2022) нами был разработан следующий ряд принципов:

– в полевых измерениях использовать высококачественное, калиброванное измерительное оборудование, которое обеспечит получение подробных и достоверных данных;

– применять обоснованную и хорошо документированную методику измерений;

– выбирать типичные виды (т. е. доминантные) растений и их состояния в основных фенологических фазах;

– библиотека создана в двух видах: 1) библиотека для общего пользования, может быть доступна через интернет и основана на использовании WEB-технологий; 2) библиотека с функциями услуг для частного пользователя, которая будет использоваться в режиме офлайн с функцией обновления с удаленного сервера;

– обеспечение удобного пользования спектральной библиотекой, в т. ч. возможностями поиска исследуемой территории через интернет, информации по типу объекта, времени измерений, просмотра данных онлайн, экспорта данных из библиотеки для просмотра и анализа в программном обеспечении пользователя (Программный комплекс..., 2014).

Спектральные характеристики исследуемого природного объекта (растительных культур)

Спроектированная спектральная библиотека природного объекта (растительности) включает следующие основные элементы:

– описание объекта (географическое положение, рельеф и почвенный покров, флора и растительность, характер и степень антропогенного воздействия и др.);

– данные спектрометрических измерений (в текстовой и графической форме);

– условия проведения измерений и другая информация (табл. 1).

Пилотная версия спектральной библиотеки растительности

Результатом проведенных исследовательских работ по созданию спектральных библиотек стала пилотная версия спектральной библиотеки растительности названных регионов Туркменистана, включающая следующие основные элементы для каждого типа растений:

– описание растительных культур (таксационные данные);

– географические координаты и фото образца;

– данные спектрометрических измерений в виде текстового файла и графика.

Разработанную концепцию спектральной библиотеки растительности мы рассматриваем как систему средств для взаимодействия пользователя (исследователя) с компьютерным устройством и основанную на представлении всех доступных пользователю (исследователю) спектральных данных и функций, описывающих процессы их взаимодействия. Формирование спектральной библиотеки мы проводим по технологии создания графического интерфейса при операционной системе Windows. Команды управления библиотекой скрываются за графическими элементами, которыми управляет пользователь (исследователь). Графический интерфейс иногда называют WIMP – аббревиатура от Windows, Icons, Menus, Pointer – «окна, иконки, меню, и указатель». WIMP-интерфейс позволяет управлять программными и аппаратными ресурсами компьютера через окна, иконки, меню и указатели. Для удобства пользования библиотекой спектров конечное ее оформление произведено в веб-формате и представляет собой интернет-страницу (см. рис. 1), которую можно открыть в любом браузере.

Таблица 1. Спектральная библиотека пастбищной растительности Туркменистана (фрагмент)

№	Название растения	Характеристика	ASCII_ref	UV-NIR
1	**Boýalyç (çereten)** *Salsola arbuscula*	Характеристика	ASCII_ref	0,3-2,5 µm
2	**Kemrud ýowşany** *Artemisia kemrudica*	Характеристика	ASCII_ref	0,3-2,5 µm
3	**Ýarymgyrymsyly kermek** *Limonium suffruticosum*	Характеристика	ASCII_ref	0,3-2,5 µm
4	**Çöl sary solmazy** *Senecio subdentatus*	Характеристика	ASCII_ref	0,3-2,5 µm

При оформлении использовались стандартные средства веб-разработки: язык разметки HTML и таблица стилей CSS. Страница оформлена в табличном виде с названием растительной культуры и базы данных в zip-формате. База данных включает в себя краткую характеристику и снимок растения, скриншот графика спектра растения и сам спектр в формате asd (в цифровом виде) и интервал длин волн, в которых находятся спектры. При наведении и щелчке по картинкам в разделах таблицы (снимкам растений и графикам спектров) они открываются в новых окнах в увеличенном размере для более детального рассмотрения (рис. 1, 2). Для удобства пользования таблицей заголовки ее разделов при прокручивании сохраняют свое положение в верхней части окна просмотра браузера.

В качестве примера использования спектральных библиотек были проведены полевые работы по измерениям спектров нескольких видов растительности в районе туркменского озера Алтын Асыр и Прикаспийской низменности – около 26 видов растений. Собранные спектры растительности были объединены в спектральную библиотеку (рис. 3).

По данным спектральной библиотеки были дешифрированы гиперспектральные космические снимки территории Туркменистана. На них удалось обнаружить совпадения по спектрам нескольких видов растений (черный саксаул, солянка деревцевидная, полынь Келлера и др.), тем самым подтверждая возможность обнаружения местоположения интересующих нас объектов на космических снимках (рис. 4).

Заключение или выводы

Исследования показали, что существуют различные перспективы использования спектральных библиотек для решения научных и прикладных задач. Предложенная концепция создания спектральной библиотеки и ее пилотная версия позволяют оптимизировать работу с данными дистанционного зондирования Земли разного уровня разрешения: результаты исследований показали существенную вариацию спектральных характеристик различных видов растений. Поэтому при создании спектральной библиотеки растений особое внимание необходимо обратить на их вариабельность в зависимости от фенологического состояния, условий произрастания (увлажнение, затененность, экспозиция и крутизна склонов и др.), степени и характера техногенного воздействия. Это предполагает формирование сложной структуры базы спектральных характеристик, данных о состоянии каждого вида растения и возможность ее пополнения.

Анализ отечественного и зарубежного опыта показал, что создание спектральных библиотек относится к задачам, решаемым мировым научным сообществом, и вклад нашей страны значим.

Функциональная значимость спектральных библиотек при гиперспектральном дешифрировании космических снимков состоит в определении географического местоположения растительной культуры по ее спектру.

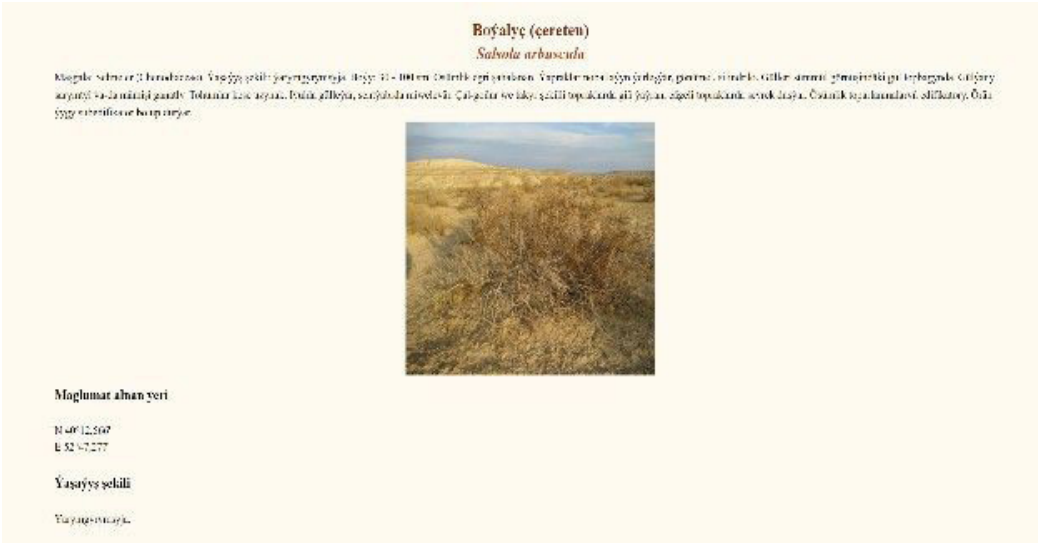


Рис. 1. Содержимое столбца «Характеристика» спектральной библиотеки
Fig. 1. Contents of the "Characteristic" column of the spectral library

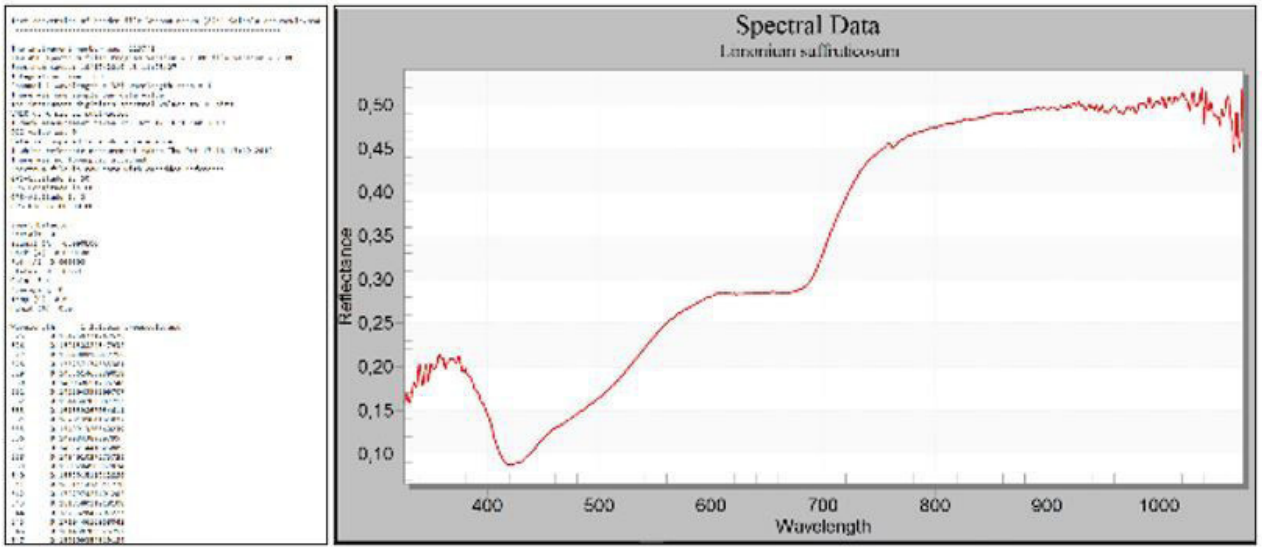


Рис. 2. Содержимое столбцов ASCII_ref и UV-NIR спектральной библиотеки
Fig. 2. Contents of ASCII_ref and UV-NIR columns of the spectral library

Рис. 4. Дешифрированные космические снимки, на которых удалось обнаружить совпадение по спектрам нескольких видов растительных культур из представленного списка спектров: 1 – черный саксаул, 2 – солянка деревцевидная, 3 – полынь Келлера и др.

Fig. 4. Deciphered space images in which it was possible to detect a coincidence in the spectra of several types of plant crops from the presented list of spectra: 1 – Haloxylon ammodendron, 2 – Salsola arbuscula, 3 – Artemisia Keller and others

Библиография

Аншаков Г. П., Егоров А. С., Ращупкин А. В., Скирмунт В. К. Многоуровневая система оперативного гиперспектрального мониторинга Земли // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 4. С. 28–37. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-4(42)-28-37

Касимов Н. С., Голубева Е. И., Лурье И. К., Зимин М. В., Самсонов Т. Е. Библиотека спектральных характеристик географических объектов в структуре геопортала МГУ имени М. В. Ломоносова // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2015. № 5. С. 3–8.

Создание системы многоуровневого мониторинга состояния природных объектов (растительность и почва) на примере территории вокруг озера Алтын асыр и Прикаспийской низменности : Отчет госбюджетной темы: 2017–2022 г. Лаб. ГИС Центра технологий АН Туркменистана. 58 с.

Программный комплекс ENVI 5.1: Руководство пользователя . М.: Совзонд, 2014. 242 с.

LIBRARY OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF VEGETATION IN TURKMENISTAN

ANNANIYAZOV Kakabay Orazovich — *National Institute of Deserts, Flora and Fauna Ministry of Environmental Protection of Turkmenistan, 941405, Turkmenistan, Ashgabat, Bitarap Turkmenistan St., 15, kakabay5211@mail.ru*

HUDAYNAZAROV Serdar Amaniyazovich — *Magtymguly Turkmen State University, 744000, Turkmenistan, Ashgabat, S.Turkmenbashi Ave., 31, serdarhudaynazarov1989@gmail.com*

Keywords:
spectral library
spectrum
space images
concept
vegetation cover

Summary: The article describes the mechanism of creating a spectral library of natural objects that make up the main vegetation cover of the Karakum Desert. The concept of creating a spectral library of vegetation is formulated. A pilot version of the spectral library of vegetation of Turkmenistan (26 types of pasture vegetation of Turkmenistan) is presented. Research work was carried out in the eastern regions of the country, in the Central Karakum Desert and in the vicinity of the Caspian lowland. In hyperspectral decoding of satellite images, the functional significance of spectral libraries is to determine the type, geographical location and distribution of vegetation across the spectrum. The library contains packages of characteristics for each type, including: description of the object, data from spectrometric measurement in the form of graphs, geographical coordinates, and a photograph of the sample. The spectral library of vegetation of Turkmenistan can be used for systematic monitoring of the state of vegetation cover, obtaining operational information on the direction and scale of changes occurring in them, monitoring the environment, mapping vegetation, and developing methods for remote sensing of the Earth.

Received on: 12 April 2024 **Published on:** 02 April 2025

References

Anshakov G. P. Egorov A. S. Raschupkin A. V. Skirmunt V. K. Multilevel system of operational hyperspectral monitoring of the Earth, Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2013. No. 4. C. 28–37. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-4(42)-28-37

Creation of a multi-level monitoring system for the state of natural objects (vegetation and soil) using the example of the territory around Lake Altyn Asyr and the Caspian Lowland: Otchet gosbyudzhetnoy temy: 2017–2022 g. Lab. GIS Centra tehnologiy AN Turkmenistana. 58 p.

ENVI Software package 5.1: User's Guide. M.: Sovzond, 2014. 242 p.

Kasimov N. S. Golubeva E. I. Lur'e I. K. Zimin M. V. Samsonov T. E. Library of spectral characteristics of geographical objects in the structure of the geoportal of M.V. Lomonosov Moscow State University, Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya. 2015. No. 5. C. 3–8.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

А. М. МАКАРОВ «ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ, ДОКЛЕТОЧНЫЕ И КЛЕТОЧНЫЕ ФОРМЫ»

ИЛЮХА Виктор Александрович *доктор биологических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии внутренних вод имени И. Д. Папанина Российской академии наук (ИБВВ РАН), 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, п. Борок, 109, ilyukha.62@mail.ru*

Подписана к печати: 31 марта 2025 года

У дотошного читателя может возникнуть вопрос: «Зачем писать рецензию на уже изданное научное или учебное произведение?» Рецензент, пишущий рецензию на рукопись, по крайней мере надеется, что его замечания как минимум позволят улучшить стиль и убрать имеющиеся ошибки и опечатки. В уже изданной книге править что-то не получится. Да и редакторы с корректорами, как правило, поработали, чтобы таких недочетов не было. На мой взгляд, единственная задача рецензии – привлечь к книге потенциального читателя, которого может что-то отпугнуть (например, большой объем или слишком заумные названия разделов).

Рецензируемое пособие «Общая биология. Происхождение жизни, доклеточные и клеточные формы», несомненно, является необходимым и актуальным. К сожалению, разделение различных биологических дисциплин в ходе обучения не способствует формированию единой картины биологического мира, а разные биологические науки все больше специализируются и их терминология становится все менее понятной для работающих в смежных областях. Пособие направлено именно на создание у читателя единой современной картины формирования и развития живых организмов, установление внутренних связей между знаниями, полученными в процессе изучения различных биологических дисциплин.

Учебное пособие состоит из пяти разделов, списка литературы (более полутора тысяч источников), глоссария, списка сокращений. К каждой главе прилагается список контрольных вопросов и список рекомендуемой литературы. В тексте приведены внутренние ссылки на подразделы, связанные с рассматриваемым материалом, что также способствует формированию единого целостного взгляда на проблему. В отличие от традиционных учебников, в тексте приведены ссылки на основные источники информации, позволяющие более подробно разобраться в основаниях выводов автора. Кроме того, это хорошее подспорье для тех, кто хочет более детально ознакомиться с интересующей его проблемой, например, при написании рефератов. Несмотря на связность материала, читателю не обязательно изучать пособие «от корки до корки», поскольку каждый раздел, а иногда и подраздел являются самодостаточными и любой заинтересовавшийся может взять то, что ему необходимо.

А. М. Макаров длительное время читает курс для студентов Петрозаводского государственного университета и имеет большой педагогический опыт, что отразилось в оптимальном и грамотном изложении материала и делает его доступным для широкого круга читателей. Материал изложен кратко и доступно, при этом рассматриваются все, даже альтернативные, взгляды и теории. Отдельно следует отметить иллюстративный материал, который не только хорошо подобран, но во многих случаях еще и откорректирован автором. Кроме того, в угоду совре-

менной читающей аудитории автор сделал всплывающими ссылки на встречающиеся в тексте термины, что достаточно удобно. Несмотря на значительный объем пособия, лучше использовать именно его, а не искать информацию, часто сомнительного научного качества, по десяткам менее объемных книг. Хочется надеяться, что автор подумает и о тех, кто привык получать информацию не только с экрана монитора, но и с обычных печатных страниц, и издаст это пособие в традиционном бумажном варианте.

Библиография

Макаров А. М. Общая биология. Происхождение жизни, доклеточные и клеточные организмы . Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2025. 601 с.

Ilyukha V. A. M. Makarov «General biology. Origin of life, precellular and cellular forms» // Principy èkologii. 2025. № 1. P. 94–96. DOI: 10.15393/j1.art.2025.15983

A. M. MAKAROV «GENERAL BIOLOGY. ORIGIN OF LIFE, PRECELLULAR AND CELLULAR FORMS»

ILYUKHA Viktor Alexandrovich — *D.Sc., Federal State Budgetary Institution of Science I.D. Papanin Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences (IBVV RAS), 109 Borok settlement, Nekouzsky district, Yaroslavl region, 152742 Russia, ilyukha.62@mail.ru*

References

Makarov A. M. General biology. Origin of life, precellular and cellular organisms. Petrozavodsk: Izdatel'stvo PetrGU, 2025. 601 p.

научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ
http://ecopri.ru

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
http://petrsu.ru

ПРОИСХОЖДЕНИЕ

МАКАРОВ Александр Михайлович

доктор биологических наук, Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, пр. Ленина, 33, a.makarov@karelia.ru

Подписана к печати: 25 марта 2025 года

В издательстве Петрозаводского государственного университета вышла книга А. М. Макарова «Общая биология. Происхождение жизни, доклеточные и клеточные организмы».

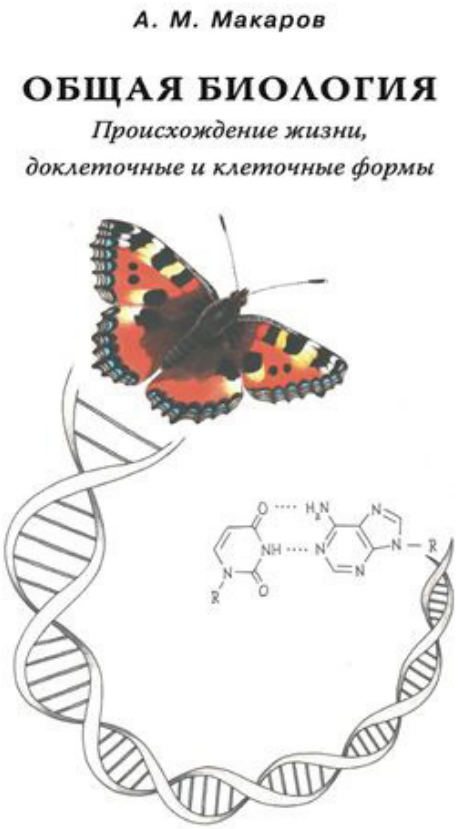
Она создана на основе лекций по общей биологии, которые автор с 2010 г. читает на выпускных курсах эколого-биологического факультета и Института биологии, экологии и агротехнологий Петрозаводского государственного университета. Формально это пособие старшекурсникам для подготовки к государственному экзамену по биологии, неформально – обзор современного состояния вопросов о происхождении жизни, доклеточных и неклеточных формах, происхождении прокариотической и эукариотической клеток, расхождении таксонов, формировании многоклеточности, общих структурных характеристиках биоразнообразия. Изучение этих вопросов активно ведется в XXI в., и многие наши представления, основанные на классических учебниках, заметно устарели. Основа обзора – публикации последних лет, главным образом англоязычные, приведены подробные ссылки на источники.

Задача книги – формирование единой картины биологических знаний на основании современных литературных источников и многообразных биологических курсов, изучаемых в высших учебных заведениях. Материал подан в общей форме – без разделения на таксоны. Изложены основные закономерности и теории. Автор не стремился к выделению в каждом вопросе единственного эволюционного пути, а старался представить многообразие вариантов и гипотез. Приведен глоссарий употребляемых в книге терминов с указанием ударений.

Среди различных общебиологических вопросов рассмотрены и те, которые связаны с взаимоотношениями организмов и среды, т. е. собственно экологические. Прежде всего это само возникновение жизни (раздел 2.5), преобразование условий на Земле, когда микроорганизмы поменяли состав атмосферы, а ее изменение, в свою очередь, глобально изменило облик живых организмов (раздел 5.1). А в целом – любое существование живого организма невозможно без взаимодействия со средой.

Поскольку это электронное издание, то из Содержания одним кликом можно попасть в нужный раздел. Выделенные курсивом термины поясняются во всплывающих подсказках (появляются при наведении мышки на термин, без клика – работает только в файле, загруженном на компьютер).

Автор с благодарностью примет комментарии и замечания по электронной почте *a.makarov@karelia.ru.*



Библиография

Макаров А. М. Общая биология. Происхождение жизни, доклеточные и клеточные организмы . Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2025. 601 с.

THE ORIGIN

MAKAROV
Alexandr Michailovitch *DSc, PetrSU, Petrozavodsk, Lenina st., 33, a.makarov@karelia.ru*

References

Makarov A. M. Origin of life, precellular and cellular organisms. Petrozavodsk: Izdatel'stvo PetrGU, 2025. 601 p.