



научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



<http://ecopri.ru>

<http://petrsu.ru>

Издатель

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

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 4 (38). Декабрь, 2020

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

Редакционная коллегия

Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
А. М. Макаров
А. Ю. Мейгал
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов
A. Gugolek B.
J. B. Jakovlev
R. Krasnov
J. P. Kurhinen

Службы поддержки

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

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

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

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





Содержание № 3. 2020

От редакции

Конец 2020

3

Оригинальные исследования

- | | | |
|--|---|---------|
| Ануфриев А. И. | <i>Динамика и скорость роста температуры тела у зимоспящих при пробуждениях</i> | 4 – 15 |
| Егорова Н. Ю., Сулейманова В. Н. | <i>Оценка эколого-ценотических условий местообитаний <i>Dactylorhiza maculata</i> (L.) Soo (orchidaceae juss.) Вятско-камского междуречья</i> | 16 – 28 |
| Иванова М. И.,
Бухаров А. Ф.,
Кашлева А. И.,
Балеев Д. Н. | <i>Лук алтынкольский в условиях культуры московской области</i> | 29 – 39 |
| Кульнев В. В.,
Насонов А. Н.,
Цветков И. В.,
Король Т. С.,
Шаховская К. А. | <i>Биотестирование почв на основе фрактальных характеристик растений</i> | 40 – 53 |
| Рязанов С. С.,
Кулагина В. И.,
Грачев А. Н.,
Сунгатуллина Л. М.,
Забелкин С. А.,
Шагидуллин Р. Р. | <i>Влияние биоуглей из илов сточных вод на рост растений, почвенные микроорганизмы и содержание азота в серых лесных почвах</i> | 54 – 70 |
| Ташлыкова Н. А.,
Афоница Е. Ю. | <i>Развитие планктонных биоценозов литоральной зоны в условиях антропогенной гидротермальной водоемов-охлаждений</i> | 71 – 87 |

Методы экологических исследований

- | | | |
|-----------------------------------|--|-----------|
| Коросов А. В.,
Ганюшина Н. Д. | <i>Методы оценки параметров терморегуляции рептилий (на примере обыкновенной гадюки, <i>Vipera berus</i> L.)</i> | 88 – 103 |
| Румянцев Д. Е.,
Черкашев А. В. | <i>Методические подходы для определения возраста деревьев</i> | 104 – 117 |

Синописис

- | | | |
|---------------|-----------------|-----------|
| Коросов А. В. | <i>Портреты</i> | 118 – 119 |
|---------------|-----------------|-----------|



Выпуск № 4

От редакции

КОНЕЦ 2020

Уважаемые читатели, авторы и рецензенты!

Подходит к концу сложный 2020 год, год потерь...

Однако нужно смотреть в будущее!

Электронная форма нашего журнала оказалась настолько выигрышной, что эпидемия и связанные с ней ограничения никак не повлияли на общий ход работы, хотя были некоторые перебои в переписке с авторами и рецензентами.

Были и приобретения. После непонятной паузы мы вновь вошли в Перечень ВАК, но с уточненным статусом. Из Минобрнауки РФ сообщили, что «издание "Принципы экологии" включено в Перечень по 4 научным специальностям: 03.02.08 – Экология (по отраслям), 03.02.04 – Зоология (биологические науки), 03.02.09 – Биогеохимия (биологические науки), 03.02.10 – Гидробиология (биологические науки)». Специально отмечено, что по специальности 03.02.01 – Ботаника – отказано во включении в Перечень. Изменения внесены в политику журнала.

В этом году, как и прежде, мы жестко выдерживаем линию на двойное (иногда тройное) внешнее рецензирование. Мы его рассматриваем как форму взаимодействия с авторами для качественного улучшения рукописи. В оценке 34 опубликованных в 2020 г. научных статей участвовало (не считая научных редакторов) 70 внешних рецензентов из разных регионов России и стран ближнего зарубежья (Беларусь, Израиль, Казахстан, Финляндия). Наш журнал многим обязан именно рецензентам, бескорыстным энтузиастам науки экологии. Мы признательны всем нашим коллегам и считаем необходимым публикацию их имен. Помимо простой благодарности, редколлегия традиционно выплатит трем рецензентам премии (по 15 тыс. руб.) в знак признательности за особенно большой вклад в дело улучшения публикаций (фамилии выделены). Наши рецензенты: Авдеев Ю.М., Агафонов Л.И., Ананьева Н.Б., Андреев Д. Д., Баканев С. С., Баранова О.Ю., Бердиев Р.К., **Бучкина Н.П.**, Василевская Н.В., Веселкин Д.В., Воденеева Е.Е., Воробьева И.Г., Воскобойникова И.И., Галибина Н.А., Гапонов С.П., Гашев С.Н., Горбач В.В., Гордеев М.И., Диатроптов М.Е., Дробенков С.М., Егошина Т.Л., **Ермолаева Н.И.**, Жарикова Е.А., Жигарев И.А., Жиров А.И., Жохов А.А., Зазнобина Н.И., Исаченко Г.А., Кавеленова Л. Л., Казанцев И.В., Казьмин В.Д., Кириллова И.А., Коломыц Э.Г., Комулайнен С.Ф., Кораблёв Н.П., Корляков К.А., Кубрина Л.В., **Куранова В.Н.**, Курхинен Ю.П., Куст Г.С., Лепская Е.В., Мандра Ю.А., Мелехин А. А., Минеева Н.М., Минеева О.В., Митрофанова Е.Ю., Назаров Н.Н., Павлейчик В.М., Павлов А.В., Палатов Д.Д., Погорелов А.В., Прохоренко Н.Б., Прохоров А.А., Пузаченко А.Ю., Пчелкин А.В., Рахматуллина И.Р., Родионов А.В., Розенберг Г.С., Седова Н.А., Сергеева Н.Г., Сергиенко Л.А., Синкевич О.В., Столяров А.П., Сторчак Т.Т., Тихомирова Е.И., Филоненко И.В., Худоногова Е.Г., Цаценко Л.В., Черлин В.А., Чертопруд М.В.

Всех читателей, авторов и рецензентов поздравляем с Новым годом!

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



УДК УДК 591.322.2:531.543

ДИНАМИКА И СКОРОСТЬ РОСТА ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА У ЗИМОСПЯЩИХ ПРИ ПРОБУЖДЕНИЯХ

АНУФРИЕВ

Андрей Иванович

доктор биологических наук, Институт биологических проблем криоли-
тозоны СО РАН, anufry@ibpc.ysn.ru

Ключевые слова:

зимняя спячка
пробуждения
температура тела
скорость роста
температуры
сурок
длиннохвостый суслик
арктический суслик
бурундук
белогрудый еж

Аннотация: В представленном сообщении проанализированы динамика температуры тела и скорость роста температуры при пробуждениях у зимоспящих сем. *Sciuridae* и сем. *Erinaceus*. Наблюдения за температурой тела проводились с термографов, имплантированных в полость тела. Анализ пробуждения показал, что присутствует S-образность температурного графика саморазогревания. Скорость роста температуры тела у животных различна на разных этапах саморазогревания. На начальном этапе температура тела растет медленно, почти линейно. Затем наступает фаза быстрого роста температуры тела, которая у всех животных происходит в диапазоне от 10–12 до 22–25 °С. Скорость роста температуры достигает максимума, после чего резко снижается. У представителей пяти рассматриваемых видов пиковая скорость роста температуры тела составляла в среднем 0.2–0.35 град./мин. Средняя скорость роста температуры была 0.1–0.15 град./мин. У белогрудого ежа *E. roumanicus* максимальная скорость на 60 % выше, чем у близких по массе тела беличьих (*S. undulatus*, *S. parryii* и *M. camtschatica*) и сходна с максимальной скоростью разогревания бурундука (*T. sibiricus*) с массой тела на порядок меньше.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 24 апреля 2020 года

Подписана к печати: 26 декабря 2020 года

Введение

Зимняя спячка присутствует у представителей широкого филогенетического диапазона мелких и средних млекопитающих. Характеризуется длительными периодами гипотермического оцепенения, которые регулярно прерываются краткими интервалами нормотермии, пробуждениями (Melvin and Andrews, 2009). Пробуждения – по-прежнему загадка зимней спячки, но их значение таково, что они встречаются у подавляющего большинства зимоспящих млекопитающих. При пробуждениях фаза быстрого саморазогревания включает в себя несократительный термогенез, возникающий в специализированном «органе саморазогревания», уникальном для млекопитающих и называемом бурой жировой тканью (Калабухов, 1985; Ballinger and Andrews, 2018). Предполагает-

ся, что пробуждения жизненно необходимы мелким зимоспящим млекопитающим для возобновления транскрипции, обновления внутриклеточных структур и активации иммунной системы для борьбы с патогенами. Синтез макромолекул, таких как РНК и белок, более эффективен и проходит в более высоком темпе, при высоких температурах тела (Van Breukelen and Martin, 2001, 2002; Prendergast et al., 2002; D'Alessandro et al., 2017; Wiersma et al., 2018).

При периодических спонтанных пробуждениях процесс саморазогревания происходит в сжатые сроки и сопровождается быстрым ростом уровня метаболизма и температуры тела. Скорость роста температуры тела – показатель способности организма зимоспящего животного быстро продуцировать и выделять достаточное количество

энергии для саморазогревания. В представленном сообщении в сравнительном плане проанализирована динамика температуры тела и скорость роста температуры при регулярных периодических пробуждениях у особей пяти зимоспящих видов семейств Sciuridae и Erinaceidae.

Материалы

В работе использованы материалы, полученные от животных, постоянно проживавших в Республиканском зоопарке «Орто-Дойду»: черношапочных сурков (*Marmota camtschatica* Pallas, 1811) и арктических (берингийских) сусликов (*Spermophilus parryi* Richardson, 1827). Родина этих животных – отроги Верхоянского хребта в Якутии. Работа с бурундуками (*Tamias sibiricus jacutensis* Ognev, 1935) и длиннохвостыми сусликами (*Spermophilus undulatus* Pallas, 1778) проводилась со зверьками, отловленными в окрестностях г. Якутска в безморозный период. Проанализированы данные, полученные в 2010–2019 гг. Сравнительные материалы по белогрудым ежам (*Erinaceus roumanicus* Barrett-Hamilton, 1900) получены при обработке первичных материалов и совмест-

ном написании статей по зимней спячке ежей (Рутовская и др., 2019а, б). В зимний период в подвальном помещении ИБПК СО РАН, где зимовали животные, поддерживали температурный режим, близкий к естественному на горизонтах почв коренных местообитаний животных. Зимой 2018/19 г. спячка длиннохвостых сусликов проходила в штольне подземной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН (г. Якутск) (Ануфриев, Ядрихинский, 2019). Белогрудые ежи зимовали на экспериментальной базе ИПЭЭ РАН зимой 2017/18 г. в Подмоскowie в заранее подготовленных искусственных норах. Характеристика экспериментальных животных представлена в табл. 1.

Методы

Представителям сем. Беличьи до начала спячки, в конце августа – сентябре, внутрибрюшинно имплантировали приборы длительной регистрации температуры тела (температурные накопители DS-1922L, подробное описание прибора и основные характеристики можно найти на сайтах: www.elin.ru, <http://www.thermochron.ru/>, <http://www.ibdl.ru/>).

Таблица 1. Основные параметры экспериментальных животных

Вид	Число особей	Период исследований	Пол животных	Масса тела перед спячкой, г
<i>T. sibiricus</i>	3	2010/11; 2019/20	2 ♂; 1 ♀	97–120
<i>S. undulatus</i>	3	2018/2019	3 ♂	860–960
<i>S. parryi</i>	3	2009/10; 2014/15	2 ♂; 1 ♀	840–1180
<i>M. camtschatica</i>	3	2011/2012	2 ♂; 1 ♀	3200–3800
<i>E. roumanicus</i>	3	2017/18	3 ♂	980–1200

Приборы были запрограммированы на измерение температуры с частотой 1 раз в 60 мин. Аналогичными приборами проводили регистрацию температуры окружающей среды. Бурундукам, из-за их относительно небольших размеров, приборы имплантировали под кожу, в переднюю часть тела (в подмышечную впадину). Белогрудым ежам до начала спячки в те же сроки внутрибрюшинно были имплантированы измерители Петровского (Петровский и др., 2008) (термонакопители ДТН4-28 «ЭМБИ РЕСЕРЧ», Новосибирск). Измерения проводились с частотой 1 раз в 20 мин.

Проанализировано по 6–7 пробуждений в период «глубокой» спячки (декабрь – март) у трех особей каждого вида. У бурундуков и

ежей – в диапазоне температуры среды от -3...5 до +3...5°. У двух видов сусликов и черношапочных сурков в диапазоне от -10...8 до +2...4°. В этих температурных диапазонах проходит зимняя спячка исследованных видов в естественной среде. У всех видов расчет скорости температуры тела и времени разогревания проводили при достижении скорости роста температуры 0.01–0.02 °/мин. Окончанием саморазогревания считали снижение скорости роста температуры также 0.01–0.02 °/мин. Сравнивались максимальные и средние скорости роста температуры тела при пробуждении, время пробуждений у пяти зимоспящих видов. Статистическую обработку проводили, используя стандартный пакет анализа MS Excel, при сравнении

средних значений измеряемых величин использовали критерий Стьюдента. Работу с животными проводили с учетом рекомендаций национального стандарта, по принципам надлежащей лабораторной практики Российской Федерации, ГОСТ 3 53434-2009.

Результаты

За время зимней спячки представители изучаемых видов многократно погружались в состояние гипотермии, периодически прерываемое пробуждениями. Анализ полученных и имеющихся материалов показал, что число пробуждений за сезон зимней спячки у разных видов различно. Так, два вида сусликов (*Sp. undulatus* и *Sp. parryii*) за почти шестимесячный период спячки при оптимальных для спячки температурах среды в основном пробуждались от 12 до 15 раз, максимальная продолжительность гипотермии составляла 400 ч и более. Бурундук, обладающий наименьшей массой тела среди сравниваемых видов, за спячку пробуждался 20 раз и более с максимальной продолжительностью до 229 ч. Черношапочный сурок, наиболее крупный представитель зимоспящих, за спячку пробуждался около 20 раз, максимальная продолжительность гипотермии превышала 400 ч. Наибольшее число пробуждений за спячку отмечено у белогрудого ежа, до 35. Максимальная продолжительность гипотермии у белогрудых ежей также около 400 ч (рис. 1). У черношапочного сурка и белогрудого ежа календарная продолжительность спячки в естественной среде выше, чем у остальных видов (Ануфриев, 2008; Ануфриев, Ядрихинский, 2019; Рутовская и др., 2019а).

У всех экспериментальных животных продолжительность активной части саморазогреваний составляла в среднем 4–6 ч (табл. 2), а температура тела у окончательно пробудившихся зверьков имела значения 33–35 °С, в редких случаях до 36 °С. Анализ графика температурной зависимости показал, что повсеместно присутствует S-образность температурного графика саморазогревания (рис. 2).

Это означает, что саморазогревание – процесс активный и имеет кумулятивную направленность. Скорость роста температуры тела у животных различна на разных этапах саморазогревания. На начальном этапе температура тела растет медленно, почти линейно. Затем наступает фаза быстрого роста, которая у всех животных происходит в диапазоне температуры тела от 10–12 до

22–25 °С. Скорость роста температуры достигает максимума, после чего резко снижается. Имеется точка «перелома» графика скорости роста температуры тела, указывающая на окончание активного процесса саморазогревания. В начальный период саморазогревания и при максимальной скорости продуцирования тепла происходит разогрев и аккумуляция тепла в передней части тела, которая разогревается значительно быстрее задней. Это фаза несократительного термогенеза. Более быстрый разогрев передней части тела обусловлен локализацией в ней запасов бурого жира, расположенного в подмышечных впадинах, а также покрывающего тонким слоем сердечную сумку и внутреннюю часть грудного отдела позвоночника. При саморазогревании длиннохвостого суслика разница температуры в ротовой полости и в прямой кишке превышает 10 °С (Ануфриев, 2008). После прохождения пика максимальной скорости роста температуры тела выработанное тепло перераспределяется по всему организму, скорость роста температуры тела снижается и становится нулевой. Эта часть саморазогревания сопровождается выраженным «дрожанием» животных – фаза сократительного термогенеза. У представителей всех пяти рассматриваемых видов пиковая скорость роста температуры тела составляла в среднем 0.2–0.35 град./мин. А средняя скорость роста температуры – 0.1–0.15 град./мин. Чем продолжительнее время саморазогревания, тем ниже скорость роста температуры тела. У белогрудого ежа и сибирского бурундука среднее время саморазогревания близко по значениям, максимальная скорость роста температуры также близка.

Температура окружающей среды непосредственно влияет на общее время пробуждения. Во время спячки при температурах среды ниже минус 5–6 °С температура тела у рассматриваемых животных, кроме сибирского бурундука, могла иметь значения ниже 0 °С (см. рис. 1) (Ануфриев, 2008; Рутовская, 2019б). В этом случае увеличивалась продолжительность начальной стадии саморазогревания, предшествующей «быстрому» разогреванию. Ее длительность зависела от температуры окружающей среды, начальной температуры тела и, вероятно, массы зверька. Так, у длиннохвостого суслика, пробуждение которого началось с температуры в полости тела минус 1 °С, начальная стадия пробуждения, когда температура тела росла медленно и почти линейно, длилась

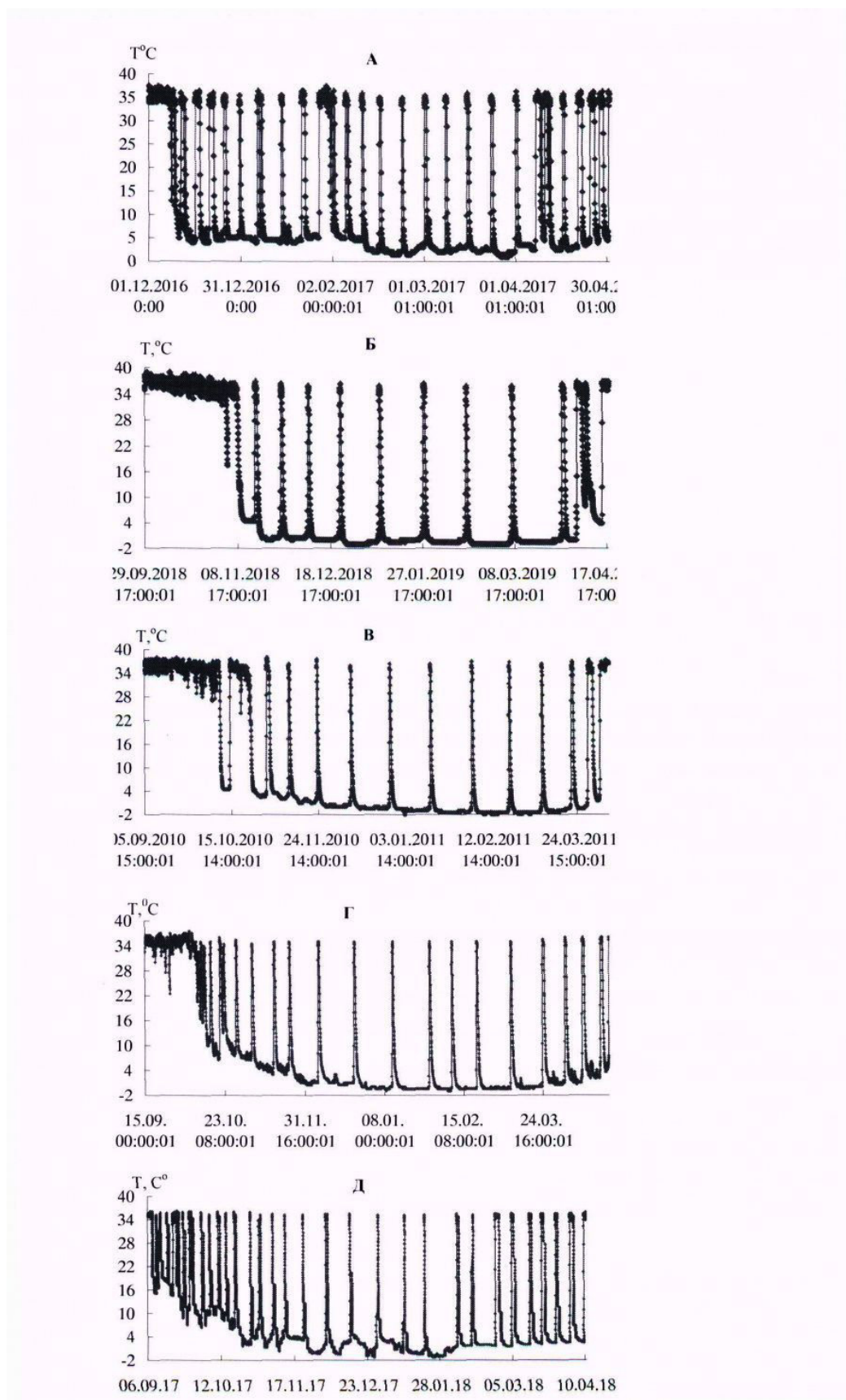


Рис. 1. Типичные примеры хода зимней спячки (по температуре тела) у бурундука (А), длиннохвостого (Б) и арктического (В) сусликов, черношапочного сурка (Г) и белогрудого ежа (Д) (Рутовская и др., 2019)

Fig. 1. Typical examples of the course of hibernation (body temperature) in the Chipmunk (А), Long-tailed (Б) and Arctic (В) ground squirrels, Black-capped marmot (Г), and White-breasted hedgehog (Д) (Rutkovskaya et al., 2019)

Таблица 2. Скорость и время саморазогревания при пробуждении у пяти зимоспящих видов

Вид / параметр	<i>T. sibiricus</i> (M ± m) Me Min – Max	<i>S. undulatus</i> (M ± m) Me Min – Max	<i>S. parryii</i> (M ± m) Me Min – Max	<i>M. camtschatica</i> (M ± m) Me Min – Max	<i>E. roumanicus</i> (M ± m) Me Min – Max
V _{max} °C/ мин	(0.33 ± 0.02)0.37 0.15–0.45	(0.22 ± 0.017)0.23 0.13– 0.37	(0.2 ± 0.007)0.21 0.17–0.24	(0.2 ± 0.01)0.16 0.133–0.28	(0.35 ± 0.02)0.34 0.26–0.45
V _{средн.} °C/мин	(0.15 ± 0.01)0.14 0.12–0.2	(0.12 ± 0.01)0.11 0.09–0.154	(0.106 ± 0.03)0.1 0.084– 0.122	(0.096 ± 0.006)0.09 0.055–0.12	(0.12 ± 0.004)0.12 0.092–0.148
Длит. про- бужд. ч	(4.4 ± 0.27)4.0 3.0–6.0	(5.7 ± 0.18)5.6 5.0–7.0	(5.4 ± 0.16)5.2 5.0–6.0	(5.9 ± 0.19)6.0 5.0–8.0	(4.8 ± 0.27)4.5 3.7–6.0

Примечание. m – количество проанализированных пробуждений, у всех видов, по 20; Me – медиана.

несколько часов. За это время она подросла на 3–4°. Затем при достижении температуры 2–3 °C начиналось обычное пробуждение с характерным быстрым ростом температуры, и за 6 ч зверек приобретал температуру около 34–35 °C (рис. 3). Стрелками показаны начало и окончание активной части пробуждения. На рис. 3 пробуждение взрослого самца 6–7 марта, это тот же зверек на рис. 1. У исследованных животных, спячка которых проходила с температурой тела 2–3 °C и выше, быстрый рост температуры начинался после непродолжительного предварительного этапа.

У исследованных видов на протяжении периода «глубокой» спячки при пробуждениях основные характеристики «активного» саморазогревания (время, скорость) изменялись незначительно (рис. 4).

Обсуждение

С переходом зимоспящих животных к норной жизни и потери связи с поверхностью почвы количество воздействующих на них внешних факторов, синхронизирующих эндогенные ритмы с экзогенными, значительно снижается. Исчезает суточный периодизм изменения освещенности, температуры и влажности окружающей среды. Основными факторами, позволяющими синхронизировать эндогенные ритмы с сезонными изменениями внешней среды, по крайней мере для зимоспящих северо-востока Сибири, остаются лишь температура, в меньшей степени – атмосферное давление

и влажность почвы (Ануфриев, 2008). Регуляция ритмов зимней спячки в значительной степени связана с температурой внешней среды. Так, для длиннохвостого суслика еще в начале 90-х годов прошлого века была выявлена зависимость продолжительности периодов гипотермии и уровня метаболизма от температуры среды. Позднее сходная зависимость была получена для арктического суслика с Аляски (Ануфриев, Ахременко, 1990; Buck, Barnes, 2000). Аналогичные зависимости выявлены для сибирского бурундука, черношапочного сурка и белогрудого ежа (Ахременко и др., 1998; Ануфриев, 2008; Рутовская и др., 2019). У каждого зимоспящего вида в период спячки имеется температурный диапазон, в котором продолжительности периодов гипотермии максимальны, а уровень обмена минимален. Этот диапазон температуры среды близок к температурам почвы, месторасположениям зимовочных гнезд коренных местообитаний видов, зонам «оптимума» спячки (Ануфриев, 2008). Частота пробуждений связана с температурными условиями протекания спячки и косвенно подтверждает гипотезу о метаболической природе пробуждений (Калабухов, 1985). Температура среды, при которой проходит спячка, влияет на продолжительность саморазогревания животных. Так, у длиннохвостого суслика в начальный период спячки при температуре среды 3–4 °C саморазогревание при пробуждении проходит за 4 ч, в период глубокой спячки около 6 ч. У белогрудого ежа в начальный период

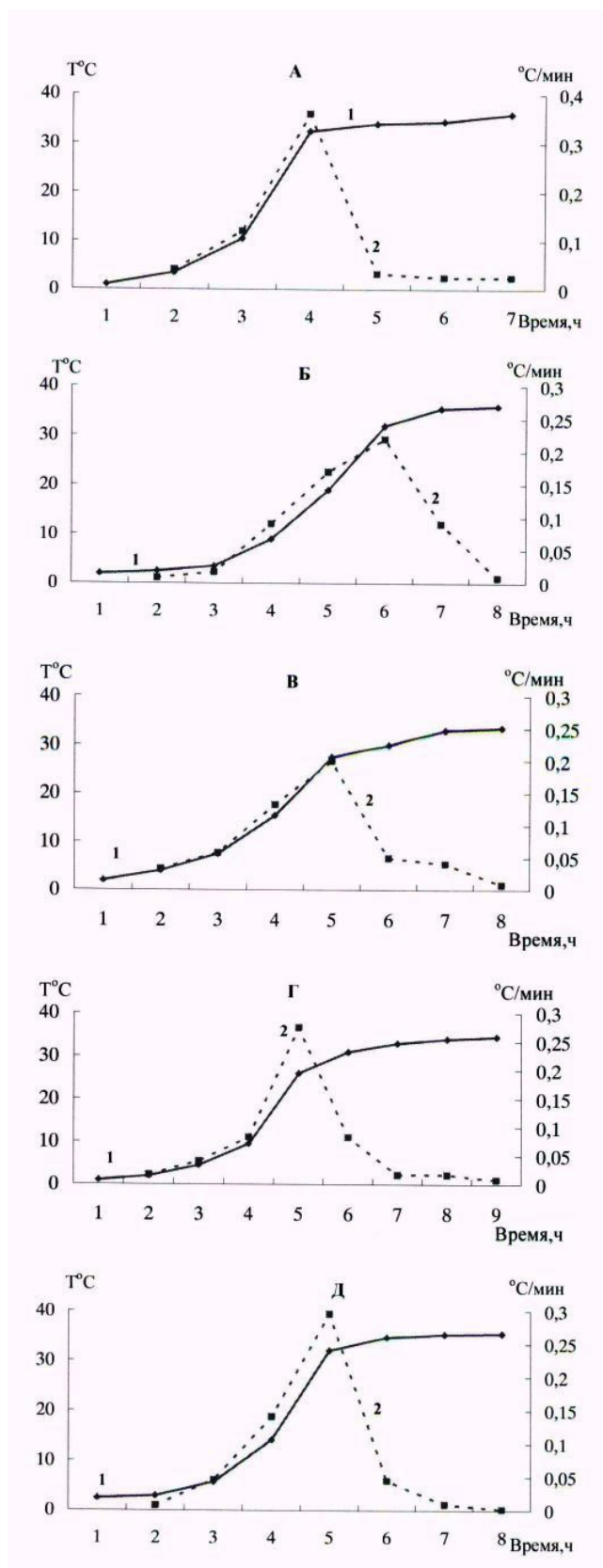


Рис. 2. Динамика температуры тела при пробуждении у сибирского бурундука (А), арктического суслика (Б), длиннохвостого суслика (В), черношапочного сурка (Г) и белогрудого ежа: 1 – температура тела; 2 – скорость роста температуры тела

Fig. 2. Dynamics of body temperature on arousal in the Siberian chipmunk (А), Arctic ground squirrel (Б), Long-tailed souslik (В), Black-capped marmot (Г) and White-breasted hedgehog: 1 – body temperature; 2 – rate of body temperature growth

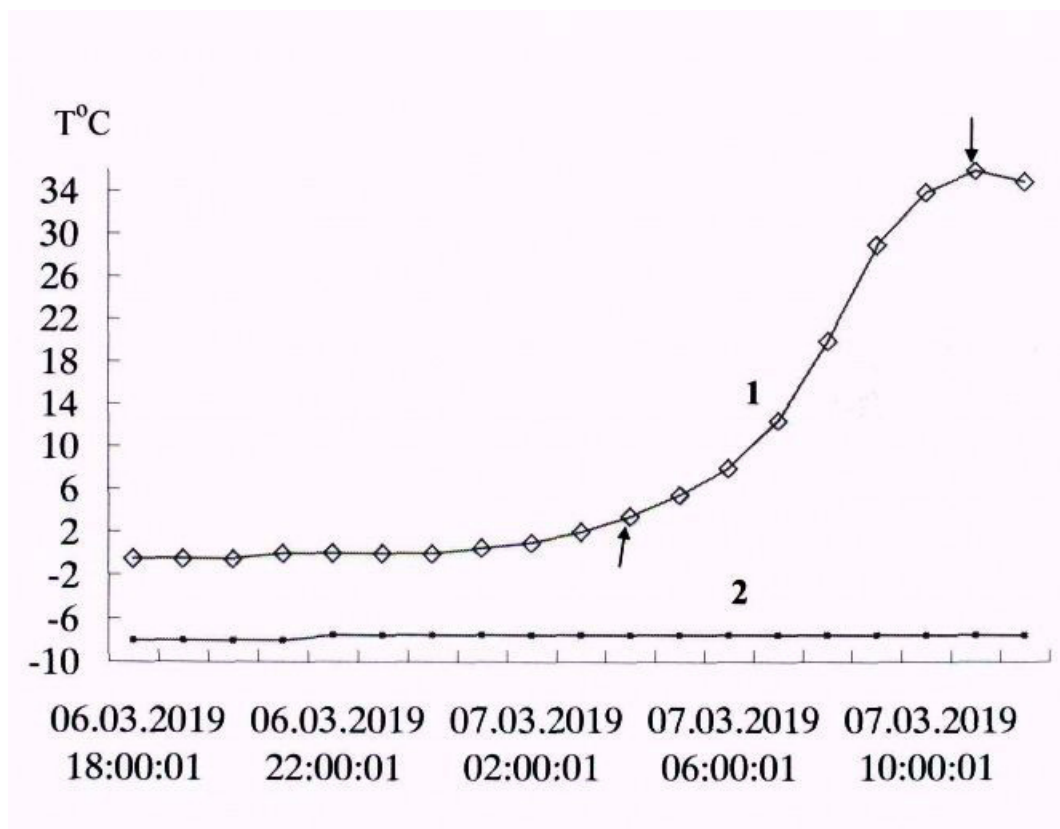


Рис. 3. Динамика роста температуры тела у длиннохвостого суслика при пробуждении в спячке с температурой тела ниже 0 °C: 1 – температура тела; 2 – температура среды. Стрелками обозначено начало и окончание процесса разогревания

Fig. 3. Dynamics of body temperature growth in a long-tailed ground squirrel upon interbout arousal with body temperature below 0 °C: 1 – body temperature; 2 – ambient temperature. Arrows indicate the beginning and end of the heating process

спячки при относительно высоких температурах среды также наблюдается высокая частота пробуждений, а время саморазогревания значительно короче. Анализ динамики температуры тела у длиннохвостого и золотистого сусликов показал, что чем выше начальная температура тела, тем меньше продолжительность пробуждений (Соломонов и др., 1987; Utz et al., 2007). Поэтому мы рассматриваем пробуждения после установления стабильного ритма спячки, который мы условно называем «глубокая» спячка. Ранее анализ пробуждений длиннохвостого суслика показал, что самопроизвольные (спонтанные) пробуждения по характеру графической зависимости не отличались от спровоцированных (вызванных) пробуждений. При пробуждениях животных с температурой тела ниже 5 °C скорость разогревания достигает максимума в диапазоне температуры тела 20–23 °C. Если пробуждение проходит при более высоких температурах, уменьшается время разогревания, максимальная скорость разогревания – при более высоких температурах тела (Ануфриев, 2008).

У изучаемых видов «активная» часть са-

моразогревания начинается при температурах тела около 2–3 °C, у ежей чуть выше. У этих видов, за исключением бурндука, отмечена спячка с температурой тела ниже 0 °C. При спячке с температурой тела ниже 0 °C перед началом «активного» саморазогревания температура тела гибернирующих животных возрастает практически линейно, продолжительность этой части пробуждения зависит от температуры тела, следовательно, и от температуры среды и может продолжиться несколько часов.

Периодические пробуждения мелких зимоспящих животных энергетически необычайно расточительны. Это отмечал еще Н. И. Калабухов (1985), они имеют метаболическую природу. Основным источником тепла в мышцах разогревающихся зимоспящих животных является свободное несопряженное окисление, в основе которого лежит разобщение окисления и фосфорилирования (Нейфах, Даудова, 1964; Скулачев, 1972). И действительно, наибольшая часть энергозатрат в период спячки связана именно с периодическими пробуждениями. Прямое измерение массы тела *T. sibiricus* и *Sp. undulatus*

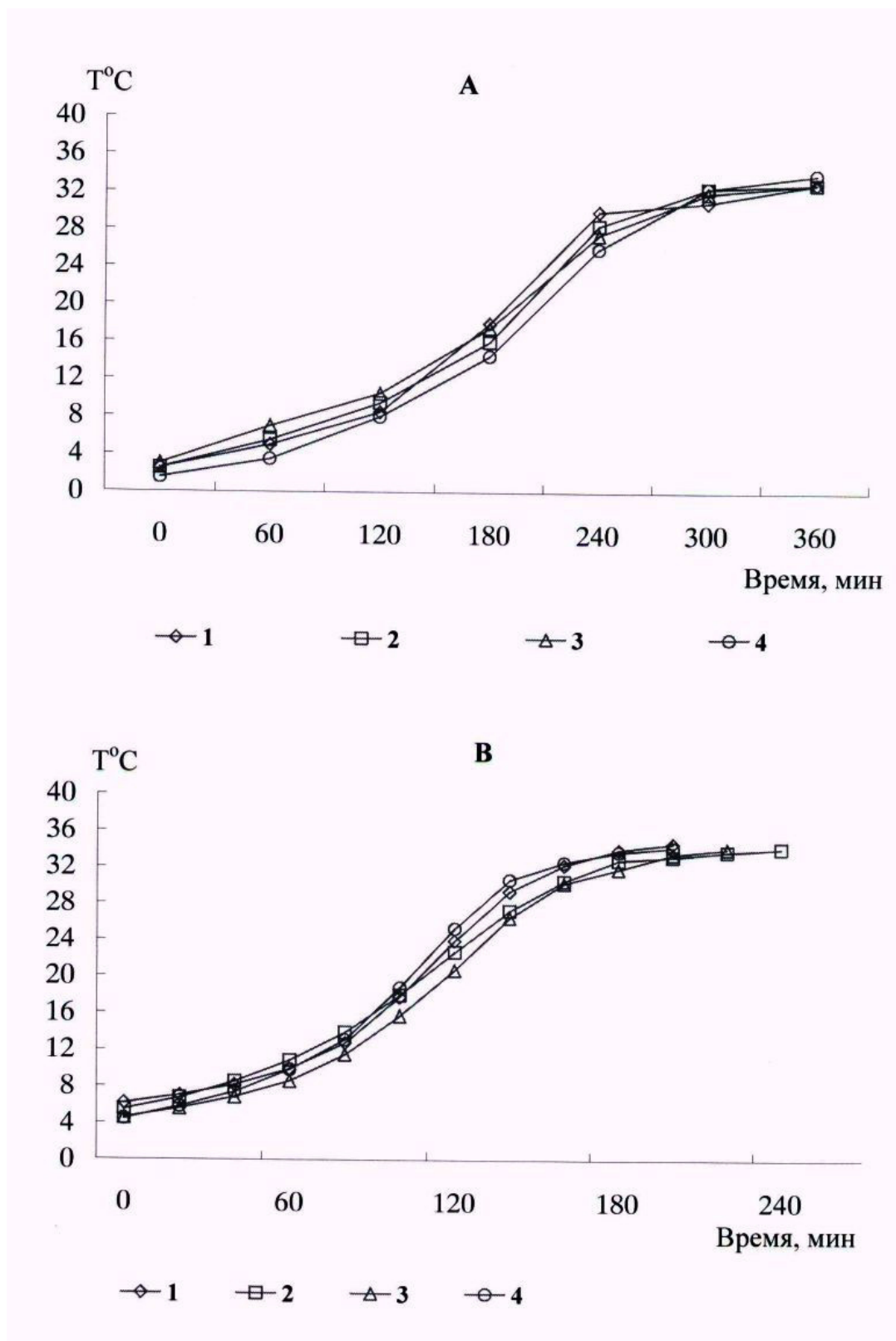


Рис. 4. Динамика температуры тела при пробуждении у длиннохвостого суслика (А) и белогрудого ежа (В) на протяжении спячки: 1 – декабрь; 2 – январь; 3 – февраль; 4 – март

Fig. 4. Dynamics of body temperature on awakening in a long-tailed ground squirrel (A) and white-breasted hedgehog (B) during hibernation: 1 – December; 2 – January; 3 – February; 4 – March

показало, что при каждом пробуждении потери массы тела у бурндуков составляют 0.15, а у сусликов 0.1 г/жив./ч. Наиболее энергозатратной частью является саморазогревание, потребление кислорода при максимальной скорости роста температуры тела у длиннохвостого суслика в три раза выше, чем у окончательно пробудившегося зверька. Графическая кривая потребления кислорода при пробуждении длиннохвостого суслика и график скорости роста температуры тела очень похожи (Ануфриев, 2008).

Саморазогревание у всех видов происходит в сжатые сроки с быстрым продуцированием тепла. У австралийской ехидны (*Tachyglossus aculeatus*) бурый жир отсутствует, температура тела при пробуждении растет практически линейно и продолжается свыше десяти часов (Augée, Ealeu, 1968). Среди рассматриваемых беличьих сибирский бурндук имеет размеры и массу тела на порядок меньшие по сравнению с остальными видами. Продолжительность пробуждения у бурндука, по сравнению с остальными видами беличьих, меньше только на 25–29 %, максимальная скорость разогревания выше на 60 %, а средняя скорость на 25–30 % ($P < 0.05$). У рукокрылых, например северного кожанка с массой тела около 10 г, при температурах среды от 0 до минус 2 °C саморазогревание при пробуждении занимает около 30 мин, а весь цикл – пробуждение и залегание в спячку – около 1.5 ч. Длительность оцепенений в естественной среде в период «глубокой» спячки, в январе – феврале, у кожанка составляет 8–11 сут и сопоставима с продолжительностью периодов гипотермии у бурндука (Ануфриев, Ревин, 2006; Кириллин и др., 2018).

У ежевых, имеющих массу тела близкую к двум видам сусликов, пробуждения проходят в более сжатые сроки и с более высоким продуцированием тепла в единицу времени. Причем время пробуждения на 15–20 % меньше, максимальная скорость на 60 %, а средняя выше на 15–18 % ($P < 0.05$). Вместе с тем графические зависимости динамики температуры тела и скорости роста температуры тела сходны со сравниваемыми видами (см. рис. 2). Имеется еще ряд сходных черт зимней спячки у представителей семейств Беличьи и Ежовые. Все исследованные виды объединяет способность находиться в состоянии зимней спячки при окружающих температурах среды ниже нуля. У трех видов беличьих описана способность находиться в состоянии гипотермии с

температурой тела (внутрибрюшинно и под кожей) ниже 0 °C (Ануфриев, 2008). Совсем недавно было показано, что два вида ежей сем. Erinaceus, имеющих обширные ареалы на Европейском континенте (*E. roumanicus* и *E. europaeus*), могут находиться в спячке с температурой в полости тела ниже 0 °C. У всех рассматриваемых видов число пробуждений за спячку напрямую связано с температурой окружающей среды. Наиболее продолжительные периоды оцепенений отмечены при оптимальных для спячки каждого вида температурах среды, которые в коренных местообитаниях видов поддерживаются на большей части зимовки и спячки (Рутовская и др., 2019а; б; Ануфриев, 2020).

На протяжении сезона зимней спячки у особой исследованных видов в эксперименте поддерживались относительно постоянные температурные условия зимовки, сходные с естественными. Крайние значения температурного диапазона спячки поддерживались непродолжительное время. Зверьки находились в спячке в гнездах из пакли и сухой травы, уменьшая воздействие внешней температуры. На протяжении периода «глубокой» спячки, декабрь – март, не отмечено существенных изменений основных характеристик пробуждений (скорости роста температуры, увеличения или уменьшения времени саморазогревания) (см. рис. 4). Но в начале зимовок, когда температура среды всегда была относительно высокой, частота пробуждений была выше, температура тела зверьков составляла 6–7 °C, соответственно, время разогревания было менее продолжительным.

Заключение

Форма графических кривых динамики температуры тела, скорости роста температуры тела и, вероятно, механизм продуцирования тепла при пробуждениях сходны у рассмотренных видов. Имеются отличия в скорости роста температуры тела и продолжительности процесса разогревания, отражающие экологические особенности видов. Более крупные зимоспящие беличьи затрачивают на пробуждения больше времени, средняя и максимальная скорость роста температуры тела ниже. Белогрудый еж демонстрирует скорость роста температуры тела большую, а время разогрева меньшее по сравнению с близкими по размерам и массе тела беличьими. Возможно, это отличие является одной из особенностей энергетики зимней спячки ежевых.

Библиография

- Ануфриев А. И. Механизмы зимней спячки мелких млекопитающих Якутии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. С. 1–157.
- Ануфриев А. И. Температурная регуляция ритмов зимней спячки // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25. № 1. С. 60–67.
- Ануфриев А. И., Ахременко А. К. Энергетическая стоимость зимней спячки длиннохвостого суслика // Экология. 1990. № 5. С. 68–72.
- Ануфриев А. И., Ревин Ю. В. Биоэнергетика зимней спячки летучих мышей (Chiroptera, Vespertilionidae) в Якутии. // *Plecotus et al.* 2006. № 9. С. 8–18.
- Ануфриев А. И., Ядрихинский В. Ф. Температурная регуляция процессов зимней спячки у длиннохвостого суслика *Spermophilus undulatus Pallas, 1778* // Принципы экологии. 2019. Т. 8. № 3. С. 8–17.
- Ахременко А. К., Ануфриев А. И., Соломонов Н. Г., Соломонова Т. Н., Васильев В. Н. Зимняя спячка при температуре ниже нуля // Сибирский экологический журнал. 1998. № 3–4. С. 347–352.
- Калабухов Н. И. Спячка млекопитающих. М.: Наука, 1985. 264 с.
- Кириллин Р. А., Соломонов Н. Г., Ануфриев А. И., Охлопков И. М. Зимовка северного кожанка (*Eptesicus nilssonii*, Chiroptera, Vespertilionidae) в окрестностях г. Якутска (Центральная Якутия) // Зоологический журнал. 2018. Т. 97. № 9. С. 1171–1175.
- Нейфах С. А., Даудова Г. М. Разобщение окислительного фосфорилирования в печени в момент пробуждения зимоспящего животного // Биохимия. 1964. Т. 29. № 5. С. 1003–1008.
- Петровский Д. В., Новиков Е. А., Мошкин М. П. Динамика температуры тела обыкновенной слепушонки (*ELLOBIUS TALPINUS*, RODENTIA, CRICETIDAE) в зимний период // Зоологический журнал. 2008. Т. 87. № 12. С. 1504–1508.
- Рутовская М. В., Диатроптов М. Е., Кузнецова Е. В., Ануфриев А. И., Феоктистова Н. Ю., Суров А. В. Динамика температуры тела белогрудого ежа (*Erinaceus roumanicus* Barrett-Hamilton, 1900) во время зимней спячки // Зоологический журнал. 2019а. № 5. С. 556–566.
- Рутовская М. В., Диатроптов М. Е., Кузнецова Е. В., Ануфриев А. И., Феоктистова Н. Ю., Суров А. В. Феномен снижения температуры тела до отрицательных значений у ежей рода *Erinaceus* во время зимней спячки // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2019б. Т. 55. Вып. 6. С. 463–464.
- Скулачев В. П. Трансформация энергии в биологических мембранах. М.: Наука, 1972. 448 с.
- Соломонов Н. Г., Ахременко А. К., Ануфриев А. И. Динамика энергетических субстратов в тканях пробуждающихся сусликов // Механизмы зимней спячки. Пушино, 1987. С. 48–56.
- Augee M. L., Ealeu E. N. Torpor of the echidna, *Tachyglossus aculeatus* // J. Mammol. 1968. Vol. 49. № 3. P. 446–464.
- Ballinger M. A., Andrews M. T. Nature's fat-burning machine: brown adipose tissue in a hibernating mammal // J. Exp. Biol. 2018. Vol. 221. DOI: 10.1242/jeb.162586.
- Buck C. L., Barnes B. M. Effects of ambient temperature on metabolic rate, respiratory quotient, and torpor in an arctic hibernator // Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. 2000. Vol. 279. № 1. P. 255–262.
- D'Alessandro A., Nemkov T., Bogren L. K., Martin S. L. and Hansen K. C. Comfortably numb and back: plasma metabolomics reveals biochemical adaptations in the hibernating 13-lined ground squirrel // J. Proteome Res. 2017. Vol. 16. P. 958–969.
- Melvin R. G. and Andrews M. T. Torpor induction in mammals: recent discoveries fueling new ideas // Trends Endocrinol. Metab. 2009. № 20. P. 490–498.
- Prendergast B. J., Freeman D. A., Zucker I. and Nelson R. J. Periodic arousal from hibernation is necessary for initiation of immune responses in ground squirrels // Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. 2002. Vol. 282. P. 1054–1062.
- Utz J. C., Velickovska V., Shmireva A., Van Breukelen F. Temporal and temperature effects on the maximum rate of rewarming from hibernation // Journal of Thermal Biology. 2007. Vol. 32. P. 276–281.
- Van Breukelen F., Martin S. L. Translational initiation is uncoupled from elongation at 18 degrees C during mammalian hibernation // Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. 2001. Vol. 281. P. 1374–1379.
- Van Breukelen F., Martin S. L. Reversible depression of transcription during hibernation // J. Comp. Physiol. 2002. Vol. 172. P. 355–361.
- Wiersma M., Beuren T. M. A., de Vrij E. L., Reitsema V. A., Brintjes J. J., Bouma H. R., Brundel B. J., Henning R. H. Torpor-arousal cycles in Syrian hamster heart are associated with transient activation of the protein quality control system // Comp. Biochem. Physiol. (B). Biochem. Mol. Biol. 2018. Vol. 223. P. 23–28.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания ИБПК ЯНЦ СОРАН: «Структура и динамика популяций и сообществ животных холодного региона Северо-Востока России в современных условиях глобального изменения климата и антропогенной трансформации северных экосистем: факторы, механизмы, адаптации, сохранение» AAAA-A17-117020110058-4.

DYNAMICS AND RATE OF BODY TEMPERATURE GROWTH IN HIBERNATORS UPON AWAKENING

ANUFRIEV
Andrei Ivanovich

D.Sc., Institute for biological problems of cryolithozone SB RAS,
anufry@ibpc.ysn.ru

Keywords:

hibernation
awakening
body temperature
rate of temperature
increase
Marmot
Long-tailed ground
squirrel
Arctic ground squirrel
Chipmunk
White-breasted hedgehog

Summary: The presented report analyzes the dynamics of body temperature and the rate of temperature growth during awakenings in winter-sleeping *Sciuridae* and *Erinaceus* families. Observations of body temperature were carried out with thermographs implanted in the body cavity. Analysis of the awakening showed that there is an S-shape of the temperature graph of self-heating. The rate of increase in body temperature in animals varies at different stages of self-heating. At the initial stage, the body temperature increases slowly and almost linearly. Then comes the phase of rapid growth of body temperature, which in all animals occurs in the range from 10–12 to 22–25°C. The rate of temperature growth reaches a maximum, after which it sharply decreases. In the representatives of the five species under consideration, the peak rate of increase in body temperature was on average 0.2–0.35 deg/min. The average rate of temperature growth was 0.1–0.15 deg/min. In the white-breasted hedgehog *E. roumanicus*, the maximum rate is 60% higher than that of similar squirrels (*S. undulatus*, *S. parryi* and *M. camtschatica*) and is similar to the maximum heating rate of the chipmunk (*T. sibiricus*) with a body weight of an order of magnitude less

Received on: 24 April 2020

Published on: 26 December 2020

References

- Wiersma M., Beuren T. M. A., de Vrij E. L., Reitsema V. A., Buintjes J. J., Bouma H. R., Brundel B. J., Henning R. H. Torpor-arousal cycles in Syrian hamster heart are associated with transient activation of the protein quality control system, *Comp. Biochem. Physiol. (B). Biochem. Mol. Biol.* 2018. Vol. 223. P. 23–28.
- Prendergast B. J., Freeman D. A., Zucker I. and Nelson R. J. Periodic arousal from hibernation is necessary for initiation of immune responses in ground squirrels, *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2002. Vol. 282. P. 1054–1062.
- Ahremenko A. K. Anufriev A. I. Solomonov N. G. Solomonova T. N. Vasil'ev V. N. Winter hibernation at temperatures below zero, *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*. 1998. No. 3–4. P. 347–352.
- Anufriev A. I. Ahremenko A. K. Energy cost of winter hibernation of the long-tailed ground squirrel, *Ekologiya*. 1990. No. 5. P. 68–72.
- Anufriev A. I. Revin Yu. V. Bioenergetics of winter hibernation of bats (Chiroptera, Vespertilionidae) in Yakutia, *Plecotus et al.* 2006. No. 9. P. 8–18.
- Anufriev A. I. Yadrinskiy V. F. Temperature regulation of hibernation processes in the long-tailed ground squirrel *Spermophilus undulatus* Pallas, 1778, *Principy ekologii*. 2019. T. 8. No. 3. P. 8–17.
- Anufriev A. I. Mechanisms of winter hibernation of small mammals in Yakutia. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008. P. 1–157.
- Anufriev A. I. Temperature regulation of winter hibernation rhythms, *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики*. 2020. T. 25. No. 1. P. 60–67.
- Augee M. L., Ealeu E. N. Torpor of the echidna, *Tachyglossus aculeatus*, *J. Mammol.* 1968. Vol. 49. No. 3. P. 446–464.
- Ballinger M. A., Andrews M. T. Nature's fat-burning machine: brown adipose tissue in a hibernating mammal, *J. Exp. Biol.* 2018. Vol. 221. DOI: 10.1242/jeb.162586.
- Buck P. L., Barnes B. M. Effects of ambient temperature on metabolic rate, respiratory quotient, and torpor in an arctic hibernator, *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2000. Vol. 279. No. 1. P. 255–262.
- D'Alessandro A., Nemkov T., Bogren L. K., Martin S. L. and Hansen K. C. Comfortably numb and back: plasma metabolomics reveals biochemical adaptations in the hibernating 13-lined ground squirrel, *J. Proteome Res.* 2017. Vol. 16. P. 958–969.

- Kalabuhov N. I. Hibernation of mammals. M.: Nauka, 1985. 264 p.
- Kirillin R. A. Solomonov N. G. Anufriev A. I. Ohlopkov I. M. Wintering of the Northern leatherback (*Eptesicus nilssonii*, Chiroptera, Vespertilionidae) in the vicinity of Yakutsk (Central Yakutia), *Zoologicheskii zhurnal*. 2018. T. 97. No. 9. P. 1171–1175.
- Melvin R. G. and Andrews M. T. Torpor induction in mammals: recent discoveries fueling new ideas, *Trends Endocrinol. Metab.* 2009. No. 20. R. 490–498.
- Neyfah S. A. Daudova G. M. Dissociation of oxidative phosphorylation in the liver at the time of awakening of a winter-sleeping animal, *Biohimiya*. 1964. T. 29. No. 5. P. 1003–1008.
- Petrovskiy D. V. Novikov E. A. Moshkin M. P. Dynamics of body temperature of the common blind cat (*ELLOBIUS TALPINUS*, RODENTIA, CRICETIDAE) in winter, *Zoologicheskii zhurnal*. 2008. T. 87. No. 12. P. 1504–1508.
- Rutovskaya M. V. Diatroptov M. E. Kuznecova E. V. Anufriev A. I. Feoktistova N. Yu. Surov A. V. Dynamics of body temperature in the white-breasted hedgehog (*Erinaceus roumanicus* Barrett-Hamilton, 1900) during winter hibernation, *Zoologicheskii zhurnal*. 2019a. No. 5. P. 556–566.
- Rutovskaya M. V. Diatroptov M. E. Kuznecova E. V. Anufriev A. I. Feoktistova N. Yu. Surov A. V. The Phenomenon of lowering body temperature to negative values in hedgehogs of the genus *Erinaceus* during winter hibernation, *Zhurnal evolyucionnoy biohimii i fiziologii*. 2019b. T. 55. Vyp. 6. P. 463–464.
- Skulachev V. P. Energy Transformation in biological membranes. M: Nauka, 1972. 448 p.
- Solomonov N. G. Ahremenko A. K. Anufriev A. I. Dynamics of energy substrates in the tissues of awakening ground squirrels, *Mehanizmy zimney spyachki*. Puschino, 1987. P. 48–56.
- Utz J. C., Velickovska V., Shmereva A., Van Breukelen F. Temporal and temperature effects on the maximum rate of rewarming from hibernation, *Journal of Thermal Biology*. 2007. Vol. 32. P. 276–281.
- Van Breukelen F., Martin S. L. Reversible depression of transcription during hibernation, *J. Comp. Physiol.* 2002. Vol. 172. P. 355–361.
- Van Breukelen F., Martin S. L. Translational initiation is uncoupled from elongation at 18 degrees C during mammalian hibernation, *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2001. Vol. 281. P. 1374–1379.



УДК УДК 582.5:581.52

ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЦЕНОТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МЕСТООБИТАНИЙ *DACTYLORHIZA MACULATA* (L.) SOO (*ORCHIDACEAE* JUSS.) ВЯТСКО-КАМСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

ЕГОРОВА
Наталья Юрьевна

к. б. н., Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б. М. Житкова,
n_chirkova@mail.ru

СУЛЕЙМАНОВА
Венера Нуридиновна

к. б. н., Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова, Вятская государственная сельскохозяйственная академия,
venera_su@mail.ru

Ключевые слова:
Dactylorhiza maculata
Orchidaceae
экологические шкалы
экоареал
гемеробность
Кировская область

Аннотация: Виды семейства Орхидные (*Orchidaceae* Juss.) вследствие биологических особенностей и высокой чувствительности к эдафотопическим условиям являются наиболее уязвимыми элементами естественных экосистем. Большинство представителей Орхидных занесено в Красные книги различного ранга и охраняется на заповедных территориях. Пальчатокоренник пятнистый (*Dactylorhiza maculata* (L.) Soo) включен в Европейский список сосудистых растений (LC категория), в Приложение II к конвенции CITES, а также в Красные книги 25 регионов РФ, в том числе и Кировской области – 3-я категория. Цель исследования – оценка эколого-ценотических предпочтений *D. maculata* в таежной зоне Вятско-Камского междуречья. Выявление экологических предпочтений *D. maculata* проведено по индикационным экологическим шкалам Д. Н. Цыганова (1983). В результате проведенных исследований в условиях таежной зоны Кировской области установлено, что вид характеризуется широким потенциальным диапазоном по большинству рассматриваемых факторов. Выявлено, что по отношению к комплексу всех экологических шкал Д. Н. Цыганова *D. maculata* относится к мезобионтным видам ($It = 0.54$). По совокупности климатических факторов *D. maculata* принадлежит к гемистеновалентным видам ($It = 0.44$). По фактору освещенности-затенения относится к эврибионтным видам ($It = 0.67$). По отношению к комплексу почвенных факторов *D. maculata* является гемизэвивалентом ($It = 0.60$). Показано, что *D. maculata* – вид, переносящий незначительное и умеренное антропогенное влияние. Во всех исследуемых местообитаниях *D. maculata* преобладают о (олиго-) и м (мезо-)гемеробные виды.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 23 января 2020 года

Подписана к печати: 26 декабря 2020 года

Введение

Виды семейства Орхидные (*Orchidaceae* Juss.) встречаются в различных биотопах пригодных для обитания растений. Однако, вследствие биологических особенностей, высокой чувствительности к эдафотопическим условиям, они являются наиболее уязвимыми элементами естественных экосистем. Поэтому большинство представителей этого семейства характеризуются ограниченным распространением и занесены в Красные книги различного ранга.

Современная популяционная экология растений обладает методами оценки экотопа, позволяющими установить влияние каждого конкретного и совокупности факторов на популяции, их элементы (Жукова и др., 2010), а также на основе анализа факторов среды выделить определяющие параметры экоареала (Селедец, 2010). В связи с этим изучение эколого-ценотических параметров ценопопуляций видов семейства *Orchidaceae* на всем протяжении ареала, которое позволит выявить факторы, лимитирующие их распространение, диапазон толерантности видов и их чувствительность к изменению тех или иных факторов среды, весьма актуально.

Исследования, посвященные видам семейства *Orchidaceae* в Кировской области, весьма немногочисленны (Чупракова, Савиных, 2012; Пакеева, Пересторонина, 2018; Егорова, Сулейманова, 2019, 2020; Сулейманова, Егорова, 2020), большинство из них ограничивается сообщениями о распространении и необходимости охраны этих видов в природных местообитаниях.

Пальчатокоренник пятнистый (*Dactylorhiza maculata* (L.) Soo) – травянистый клубнеобразующий поликарпик. Европейский, бореальный, болотный вид. Общий ареал охватывает Скандинавию, Среднюю Европу, Атлантическую Европу. В Восточной Европе отмечен в следующих флористических районах: Арктика (Арктическо-Европейский), Север (Карело-Мурманский и запад Двино-Печерского), Прибалтика, Центр, Запад (Карпатский и Днепровский), Восток (Заповжье) (Смолянинова, 1976).

Dactylorhiza maculata включен в Европейский список редких и уязвимых сосудистых растений (LC категория), в Приложение II к конвенции CITES (Bilz et al., 2011; Convention..., 2013), а также в Красные книги 25 регионов РФ (Вахрамеева, 2014), в том числе и Кировской области – 3-я категория

(редкий – малочисленный вид) (Красная книга..., 2014).

Целью настоящего исследования является оценка эколого-ценотических предпочтений *D. maculata* в таежной зоне Вятско-Камского междуречья.

Материалы

Исследования биотопических особенностей распространения *D. maculata* в условиях таежной зоны в пределах Кировской области осуществлялись в период с 2010 по 2018 г. Всего изучено 8 ценопопуляций (ЦП) *D. maculata* (рис. 1).

Методы

Описания исследованных растительных сообществ осуществляли согласно общепринятым геоботаническим методам (Миркин, Наумова, 1998; Методы изучения..., 2002) с подробной характеристикой видового состава (проективное покрытие, сомкнутость крон, обилие, высота растений, фенофаза, жизненность и др.) и физико-географических условий (увлажнение, экспозиция, рельеф местности и т. д.). Названия видов приведены в соответствии с базой данных The Plant List (<http://www.theplantlist.org>).

Для выявления экологических параметров местообитаний *D. maculata* проведена обработка геоботанических описаний по индикационным экологическим шкалам Д. Н. Цыганова (1983), содержащим балловые значения различных свойств факторов среды: Тм – термоклиматической, Кп – континентальности климата, Ом – омброклиматической аридности-гумидности, Сг – криоклиматической, Hd – увлажнения почвы, Tr – солевого режима почв, Nt – богатства почв азотом, Rc – кислотности почв, fH – переменности увлажнения, Lc – освещенности-затенения. Обработка геоботанических описаний по экологическим шкалам осуществлялась с помощью программы EcoScaleWin (2008).

Экологическую валентность и толерантность вида определяли в соответствии с методикой Л. А. Жуковой (Жукова и др., 2010). Для оценки приспособленности ценопопуляции вида к изменению одного экологического фактора рассчитывали потенциальную экологическую валентность (PEV) по формуле: $PEV = (A_{max} - A_{min} + 1) / n$, где A_{max} и A_{min} – максимальные и минимальные значения ступеней шкалы, занятых видом, n – общее число ступеней в шкале. По результатам PEV определяли 5 фракций валентности (стено-,

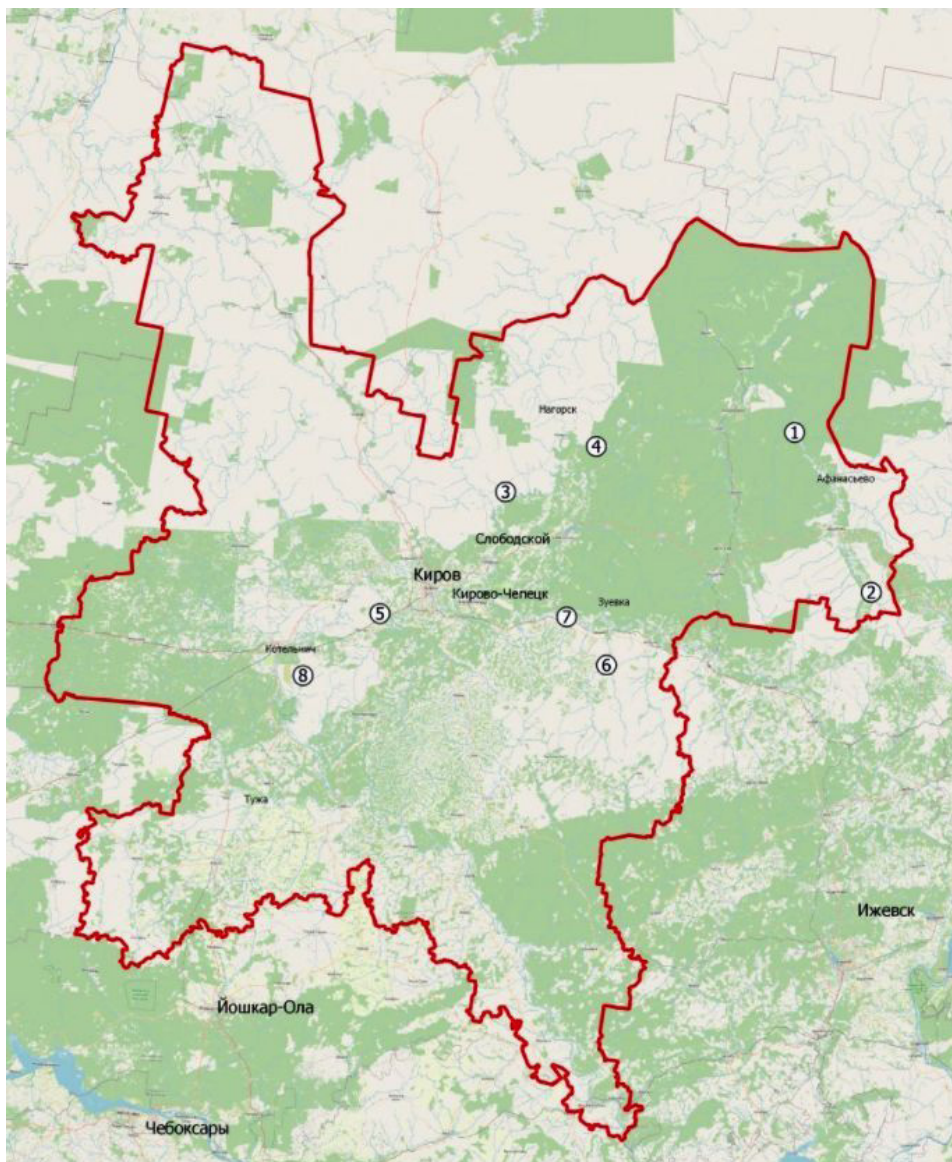


Рис. 1. Карта-схема изученных ценопуляций *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo. Цифры соответствуют порядковым номерам ценопуляций в табл. 1

Fig. 1. Schematic map of the studied coenopopulations of *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo. Numbers correspond to the studied coenopopulations in table 1

гемистено-, мезо-, гемизври-, эвривалентная). Популяции с низкой экологической валентностью (стеновалентные виды) могут выносить ограниченные изменения фактора среды. Эвривалентные виды занимают местообитания с чрезвычайно изменчивыми условиями среды (Быченко, 2008а). Реализованную экологическую валентность определяли по формуле: $REV = (A_{max} - A_{min} + 0.01) / n$, где A_{max} и A_{min} – максимальные и минимальные значения ступеней шкалы, занятые конкретными ЦП; n – общее число ступеней в шкале.

Для выявления степени использования экологических потенций вида определяли коэффициент экологической эффективности ($K. ec. eff.$) как отношение реализован-

ной экологической валентности к потенциальной. Индекс толерантности (It) вида или его меру стено-эврибионтности определяли по формуле: $It = \sum PEV / \sum$ шкал рассматриваемых факторов (Жукова, 2005; Жукова и др., 2010). Чем выше It , тем больше лабильность вида по отношению к рассматриваемым экологическим факторам (Быченко, 2008б).

Гемеробность *D. maculata* в растительных сообществах определяли по составу видов (Frank, Klotz, 1990), использовалась 7-балльная система гемеробии Яласа: *a* – агемеробные виды, не выносящие антропогенного влияния; *o* – олигогемеробные виды лесов, лугов, верховых болот и т. д., выносящие очень незначительное антропогенное влия-

ние; *m* – мезогемеробные виды лесов, лугов, остепненных лугов и степей, испытывающих экстенсивное антропогенное влияние; *b* – эугемеробные виды лугов и лесов с интенсивным уходом, выносящие эвтрофикацию, известкование, незначительное нарушение грунта; *c* – эугемеробные виды удобряемых лугов, деградирующих лесов, полевые сорняки; *p* – полигемеробные виды выращиваемые в культуре и типичные рудеральные растения, выносящие сильные и частые нарушения местообитаний; *t* – метегемеробные виды полностью деградировавших экосистем и искусственных сообществ.

Статистический анализ был проведен с использованием программного обеспечения PAST 3.15 (Hammer et al., 2001) и Microsoft Excel.

Результаты

Наиболее распространенными типами местообитаний *D. maculata* являются сырые и заболоченные луга, переходные и низинные болота, их окраины, заболоченные хвойные и лиственные леса, заросли

кустарников, иногда по берегам водоемов, вдоль ручьев, по долинам рек (Блинова, 1995; Вахрамеева, 2000). В Кировской области *D. maculata* встречается редко, преимущественно по переходным болотам, сфагновым ельникам (Тарасова, 2007).

Исследованные ценопопуляции *D. maculata* (табл. 1) приурочены преимущественно к залесенным (ЦП 1, 2) или открытым (ЦП 3–5) мезо-олиготрофным сфагновым болотам речных террас рек Кама, Кобра, Вятка. Древостой залесенных болот представлен *Pinus sylvestris* L. с примесью *Betula pendula* Roth, *B. pubescens* Ehrh. Сомкнутость крон варьирует в пределах 0.2–0.4. В травяно-кустарничковом ярусе всех исследуемых болотных биотопов наибольшим постоянством отличаются *Eriophorum vaginatum* L., *Carex acuta* L., *Menyanthes trifoliata* L. Мохово-лишайниковый покров образован сплошной дерниной сфагновых мхов *Sphagnum magellanicum* Brid., *Sph. angustifolium* (Warnst.) C. E. O. Jensen, *Sph. fuscum* (Schimp.) H. Klinggr.

Таблица 1. Ценотическая характеристика исследованных местообитаний *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo

№ ЦП	Тип фитоценоза	Основные виды травяно-кустарничкового яруса	Обилие <i>Dactylorhiza maculata</i>
1	Залесенное мезо-олиготрофное осоково-пушицево-сфагновое болото	<i>Carex acuta</i> L., <i>Eriophorum vaginatum</i> L., <i>Andromeda polifolia</i> L., <i>Menyanthes trifoliata</i> L., <i>Oxycoccus palustris</i> Pers.	Sp
2	Залесенное мезотрофное пушицево-вахтово-сфагновое болото	<i>Eriophorum vaginatum</i> L., <i>Menyanthes trifoliata</i> L., <i>Comarum palustre</i> L., <i>Oxycoccus palustris</i> Pers., <i>Carex vesicaria</i> L., <i>Thelypteris palustris</i> (A. Gray) Schott, <i>Equisetum fluviatile</i> L.	Sol
3	Мезотрофное пушицево-вахтово-сфагновое болото	<i>Menyanthes trifoliata</i> L., <i>Eriophorum vaginatum</i> L., <i>Drosera rotundifolia</i> L., <i>Andromeda polifolia</i> L., <i>Carex acuta</i> L., <i>Carex limosa</i> L., <i>Oxycoccus palustris</i> Pers., <i>Scheuchzeria palustris</i> L., <i>Equisetum hyemale</i> L., <i>Comarum palustre</i> L.	Un
4	Мезо-олиготрофное пушицево-вахтово-сфагновое болото	<i>Menyanthes trifoliata</i> L., <i>Eriophorum vaginatum</i> L., <i>Drosera rotundifolia</i> L., <i>Andromeda polifolia</i> L., <i>Chamaedaphne calyculata</i> (L.) Moench, <i>Carex acuta</i> L., <i>Oxycoccus palustris</i> Pers.	Sp
5	Мезо-олиготрофное кустарничково-осоково-вахтово-сфагновое болото	<i>Menyanthes trifoliata</i> L., <i>Carex acuta</i> L., <i>Oxycoccus palustris</i> Pers., <i>Vaccinium uliginosum</i> L., <i>Andromeda polifolia</i> L., <i>Comarum palustre</i> L., <i>Equisetum hyemale</i> L.	Sp
6	Березняк разнотравно-вейниковый	<i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth, <i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim., <i>Mentha aquatica</i> L., <i>Geum rivale</i> L., <i>Angelica sylvestris</i> L., <i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.	Un

№ ЦП	Тип фитоценоза	Основные виды травяно-кустарничкового яруса	Обилие <i>Dactylorhiza maculata</i>
7	Ивняк разнотравно-таволговый	<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim., <i>Alchemilla xanthochlora</i> Rothm., <i>Pimpinella saxifraga</i> L., <i>Ranunculus acris</i> L., <i>Cirsium palustre</i> (L.) Coss. ex Scop., <i>Scirpus sylvaticus</i> L., <i>Geum rivale</i> L., <i>Equisetum pratense</i> Ehrh., <i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	Sol
8	Ельник с примесью березы кустарничково-хвощево-разнотравно-сфагновый	<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>Vaccinium myrtillus</i> L., <i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F. W. Schmidt, <i>Menyanthes trifoliata</i> L., <i>Carex sylvatica</i> Huds., <i>Oxalis acetosella</i> L., <i>Solidago virgaurea</i> L., <i>Rubus arcticus</i> L., <i>Thelypteris palustris</i> (A. Gray) Schott, <i>Equisetum fluviatile</i> L.	Sol

Также отмечено произрастание *D. maculata* в условиях обработанного торфяного месторождения в пойме р. Коса (ЦП 6). Древостой образован *Betula pubescens* (10Б) с редким участием *Pinus sylvestris* и *Populus tremula* L. Сомкнутость крон древостоя варьирует от 0.4 до 0.6. В подлеске произрастают *Salix cinerea* L., *S. myrsinifolia* Salisb., *Frangula alnus* Mill. Проективное покрытие травяного яруса составляет в среднем 65 %. Доминирующим видом с высоким постоянством является *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth. Встречаются гигрофильные травы – *Mentha aquatica* L., *Lysimachia vulgaris* L., *Geum rivale* L. Моховый покров слабо выражен, покрытие невелико – до 5 %. Встречается *D. maculata* и по ивовым зарослям в пойме небольшого ручья (ЦП 7). Данный фитоценоз отличается хорошо выраженным кустарничковым ярусом высотой 1.5–2 м, в сложении которого участвуют *Salix myrsinifolia*, *S. cinerea*. Доминантом травяного яруса является *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.

Кроме того, вид изучен в условиях темнойвойного заболоченного лесного массива (ЦП 8). В составе древесного яруса преобладает *Picea abies* (L.) Н. Karst., высота 15–18 м, сомкнутость крон 0.6–0.8. На микроповышениях произрастают лесные виды кустарников: *Sorbus aucuparia* L., *Rubus idaeus* L., *Juniperus communis* L., бореальное мелкотравье *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt, *Trientalis europaea* L., *Rubus arcticus* L., *Oxalis acetosella* L., лесное разнотравье и мхи. В межкочьях поселяются *Menyanthes trifoliata*., *Equisetum fluviatile* L. и др. Мхи

представлены родами *Mnium*, *Sphagnum*.

Проективное покрытие (ПП) травяно-кустарничкового яруса в изучаемых фитоценозах колеблется от 35 (мезо-олиготрофное пушицево-вахтово-сфагновое болото) до 65 % (березняк разнотравно-вейниковый). Видовой состав изученных фитоценозов весьма разнообразен: в травяно-кустарничковом ярусе отмечено от 8 до 34 видов растений. Обилие исследуемого вида оценивается как Sp в ЦП 1, 4, 5, низкое обилие – Sol отмечено в ЦП 2, 7, 8, единичные особи (Un) зафиксированы в ЦП 3, 6.

Обсуждение

В результате фитоиндикации исследуемых местообитаний *D. maculata* получены экологические характеристики по десяти шкалам Д. Н. Цыганова (табл. 2, рис. 2). *D. maculata* по отношению к комплексу всех экологических факторов является мезовалентом (МВ) ($It_{общее} = 0.54$) и имеет средний уровень лабильности по отношению к рассматриваемым факторам среды. Е. Г. Филиппов (1997), напротив, отмечает узкую экологическую амплитуду *D. maculata* на Урале, такого же мнения придерживаются и другие исследователи (Ellenberg et al., 1991; Вахрамеева и др., 1994; Вахрамеева, 2000). По данным, приводимым разными авторами, вид обитает в условиях от сухолесолугового до болотного типа увлажнений. Растет на сильно кислых – слабощелочных почвах с бедным и достаточным содержанием минерального азота. Диапазон освещенности – от открытых пространств до светлых лесов. По совокупности климатических факторов *D.*

Таблица 2. Характеристика экологических условий местообитаний *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo Вятско-Камского междуречья

Экологические шкалы		Экологическая позиция вида по шкале фактора	РЕV	Реализованная экологическая позиция изученных ЦП	REV	Кес. eff., %
Климатические шкалы	Tm	3–9	0.41	6.06–7.72	0.10	23.86
	Kn	3–11	0.60	8.33–9.00	0.05	7.56
	Om	7–11	0.33	7.96–9.86	0.13	38.20
	Cr	5–10	0.40	6.19–8.07	0.13	31.50
Почвенные шкалы	Hd	11–19	0.39	12.39–15.63	0.14	36.11
	Tr	1–9	0.47	5.06–7.10	0.11	22.78
	Nt	1–7	0.64	3.19–5.66	0.23	35.43
	Rc	1–11	0.85	5.00–6.66	0.13	15.18
	Fh	1–7	0.64	3.29–5.50	0.20	31.71
Шкала освещенности- затенения	Lc	1–6	0.67	3.00–4.94	0.22	32.50

Примечание. РЕV – потенциальная экологическая валентность; REV – реализованная экологическая валентность; Кес. eff. – коэффициент эффективности, %.

maculata является гемистеновалентом (ГСВ). Коэффициент экологической эффективности (Кес. eff) колеблется весьма значительно. Максимально реализуют свои потенции ЦП *D. maculata* по омброклиматической шкале (Кес. eff = 38.20 %). Минимальные значения Кес. eff отмечены для шкалы континентальности климата (7.56 %).

По термоклиматическому фактору (Tm), показывающему распределение тепла, *D. maculata* обитает в условиях от бореального до суббореального типа режима (6.06–7.72 балла). Исследованные ЦП занимают центральную часть шкалы и находятся в пределах потенциальных диапазонов, указанных Д. Н. Цыгановым (рис. 2А).

По шкале континентальности климата (Kn) потенциальные диапазоны исследуемого вида колеблются от 3 до 11 баллов и характеризуются гемизвравалентной позицией. Исследованные ЦП отличаются узким реальным диапазоном (REV = 0.05) и относятся к зоне умеренно-континентального климата (субматериковый, материковый вид) с диапазоном 8.33–9.00 балла.

По омброклиматической шкале, показывающей соотношение осадков и испарения, полученные экологические амплитуды *D. maculata* соответствуют потенциальным диапазонам Д. Н. Цыганова. Вид в пределах исследуемой территории обитает в условиях от субаридного (Om = 7.96 балла) до субгумидного (Om = 9.86 балла) климата.

По криоклиматической шкале (Cr), показывающей наличие и продолжительность морозных дней с низкими температурами, *D. maculata* встречается в условиях от 6 (довольно суровых зим / умеренных зим) до 8 (умеренных зим / мягких зим) баллов. По данному фактору отмечено также достаточно высокое значение показателя реализованной экологической валентности – 0.13 (Кес. eff = 31.50 %).

В целом в пределах рассматриваемого фрагмента ареала изученные ЦП вида используют очень незначительную часть потенциальной экологической амплитуды климатических шкал (REV = 0.05–0.13) при достаточно широкой их потенциальной амплитуде (PEV = 0.33–0.60).

Эдафотопические условия местообитаний *D. maculata* характеризуются значительным экологическим разнообразием диапазонов. По отношению к комплексу почвенных факторов *D. maculata* является гемизвравалентом (ГЭВ) (It = 0.60) (см. табл. 2). Коэффициент экологической эффективности по данным шкалам варьирует от 15.18 до 36.11 %. По всем почвенным шкалам диапазон изученных местообитаний не выходит за потенциально возможные границы (рис. 2В).

По шкале увлажнения почвы (Hd) *D. maculata* является гемистеновалентным видом. Это свидетельствует о небольшом разнообразии возможных местообитаний

по данному фактору. Потенциальные диапазоны исследуемого вида по этой шкале составляют от 11 до 19 баллов. Показатели реализованной экологической позиции находятся в пределах от сухолесолугового до сыролесолугового типа режима (12.39–15.63 балла).

По шкале солевого режима почв данный вид является мезовалентом. По шкале, включающей 19 баллов, *D. maculata* встречается в диапазоне значений от 5.06 (небогатых почв) до 7.10 (довольно богатых почв) баллов. Показатель реализованной экологической валентности составляют 0.11 (Кес. eff = 22.78 %).

По шкале богатства почв азотом (Nt) *D. maculata* является гемизэвривалентным видом (REV = 0.64). Реализованный диапазон изученных ЦП составляет от 3.19 балла (очень бедные азотом почвы) до 5.66 балла (бедные азотом почвы).

По шкале кислотности почв (Rc) исследуемый вид является эвривалентом.

Потенциальный диапазон варьирует от 1 до 11 баллов. Реализованный диапазон смещен в сторону кислых почв (5.00–6.66 балла).

По шкале переменности увлажнения почвы *D. maculata* гемизэвривалентен. В исследованных местообитаниях *D. maculata* обитает в диапазоне от 3.29 (относительно устойчивого увлажнения) до 5.50 (слабо переменного увлажнения) и занимают левую часть шкалы.

По шкале освещенности-затенения (Lc) *D. maculata* значение потенциальной экологической валентности составляет 0.67 – вид эвривалентен. Реализованный диапазон занимает от 3.00 до 4.94 балла, что соответствует условиям полуоткрытых пространств – светлых лесов. Реализованная экологическая валентность по данному фактору имеет наиболее высокие показатели – REV = 0.22.

Геометрический образ фундаментальной и реализованной экологических ниш представлен на рис. 3.

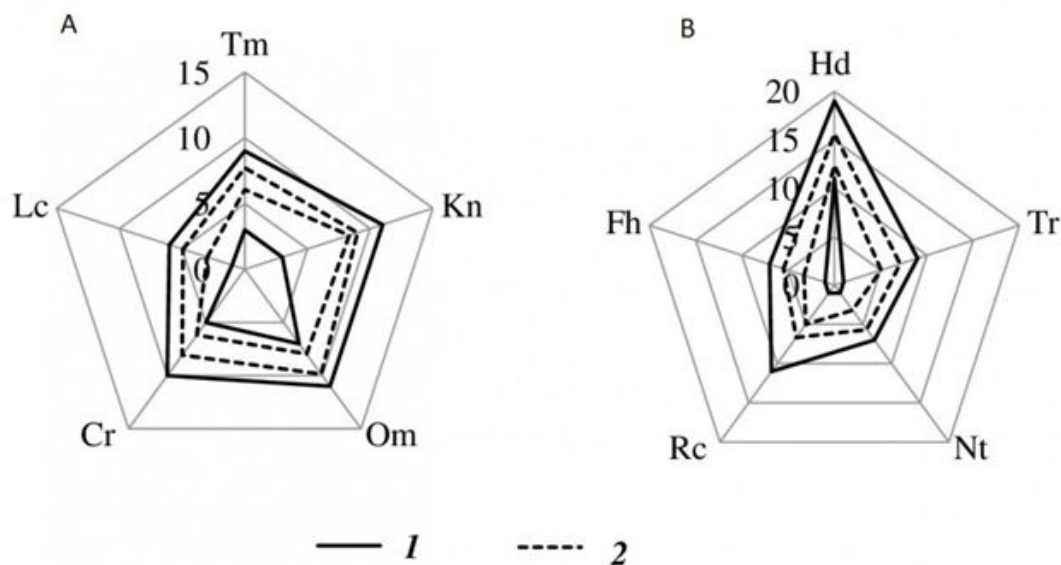


Рис. 2. Фрагмент экологической ниши *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo в Кировской области (по шкалам Д. Н. Цыганова (1983)). А – климатические шкалы и шкала освещенности-затенения; В – почвенные шкалы; 1 – экологическая позиция вида по шкале фактора, 2 – реализованная экологическая позиция изученных ценопопуляций

Fig. 2. Fragment of the ecological niche of *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo in the Kirov region (according to the scales of D. N. Tsyganov (1983)). A – climate scales and light-shading scales; B – soil scales; 1 – ecological position of the species on the scales, 2 – ecological position of the studied species in the phytocenosis according to scales

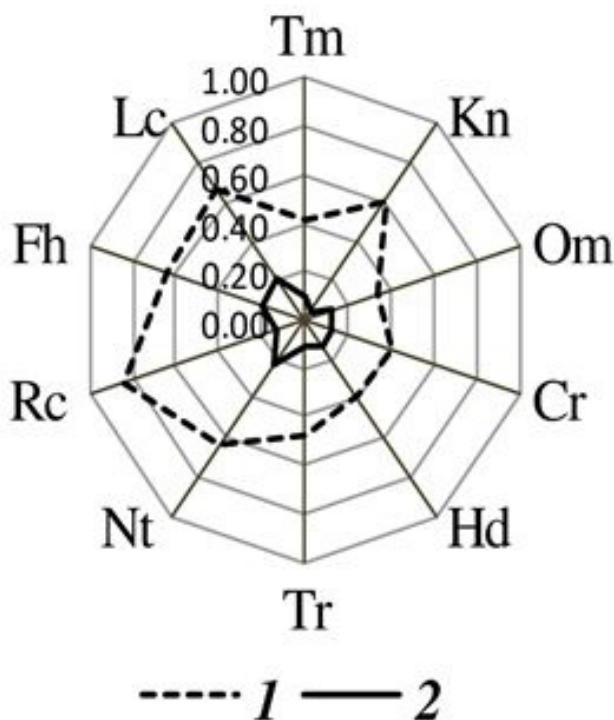


Рис. 3. Потенциальная (1) и реализованная (2) экологические валентности изученных ценопопуляций *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo
Fig. 3. Potential (1) and realized (2) ecological valencies of the studied coenopopulations of *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo

Соотношение фундаментальной и реализованной экологических ниш свидетельствует о низкой эффективности использования исследуемыми ценопопуляциями *D. maculata* своего экоареала. Низкая реализованность экоареала не позволяет виду проявлять фитоценотическую активность, что проявляется в небольшом обилии *D. maculata* в исследуемых растительных сообществах.

Результаты PCA-анализа исследованных ЦП *D. maculata* и значений эдафических параметров биотопов представлены на рис. 4.

В результате проведенного PCA-анализа выявлены две главные компоненты, которые берут на себя соответственно 80.90 и 12.93 % общей дисперсии и определяют 93.83 % дисперсии. Первая главная компонента интерпретирована как комплексный градиент влажности (Hd). Из направления лучей biplot-графика видно, что ЦП, изученные в условиях избыточного увлажнения (мезо-олиготрофные сфагновые болота ЦП 1–5), характеризуются более высокими значениями влажности почвы (Hd). Максимально положительные факторные нагрузки на увлажнение у ЦП 6, 7, 8 (1.69...2.23) и максимально отрицательные у 3 и 4 ЦП

(-1.36...-2.73). Вторая компонента интерпретирована как интенсивность освещенности. Максимально положительная нагрузка на освещенность у ЦП 7 (0.94), отрицательная факторная нагрузка у ЦП 8 (-1.41).

Проведенный анализ экологических параметров исследуемых местообитаний показал, что в условиях рассматриваемого экоареала вида наиболее важную роль для *D. maculata* играют факторы увлажнения и освещенности.

Для оценки антропогенной устойчивости *D. maculata* использовали показатель геме-робии (рис. 5). Растительные сообщества с участием исследуемого вида представлены преимущественно олиго- и мезо-гемеробными видами – 40.9 и 39.0 % соответственно. Несколько меньше приходится на долю б-эугемеробных видов – 17.1 %. Доля участия а-эугемеробных видов составляет 3.3 %, а полигемеробных – 4.5 %. Наименьший процент приходится на виды, очень чувствительные к антропогенному воздействию, – а-гемеробы (около 2 %). Во всех изученных фитоценозах не были выявлены метатегмеробные виды.

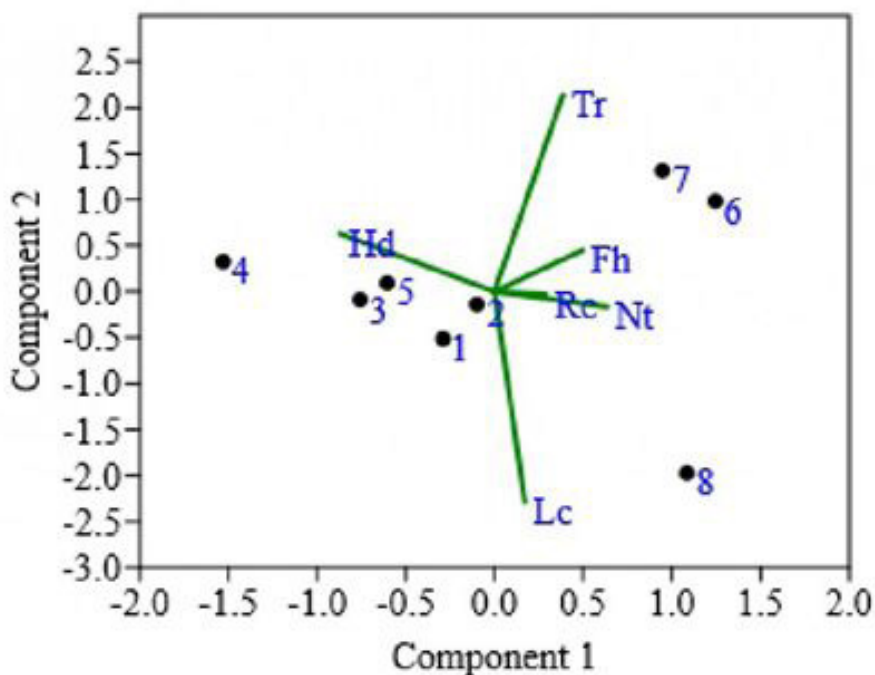


Рис. 4. Положение исследованных ценопопуляций *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo в системе первых двух главных компонент (PCA – Principal Components Analysis). Цифры соответствуют порядковым номерам ценопопуляций в табл. 1

Fig. 4. The position of the studied coenopopulations of *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo in the system of the first two main components. Numbers correspond to the studied coenopopulations in table 1

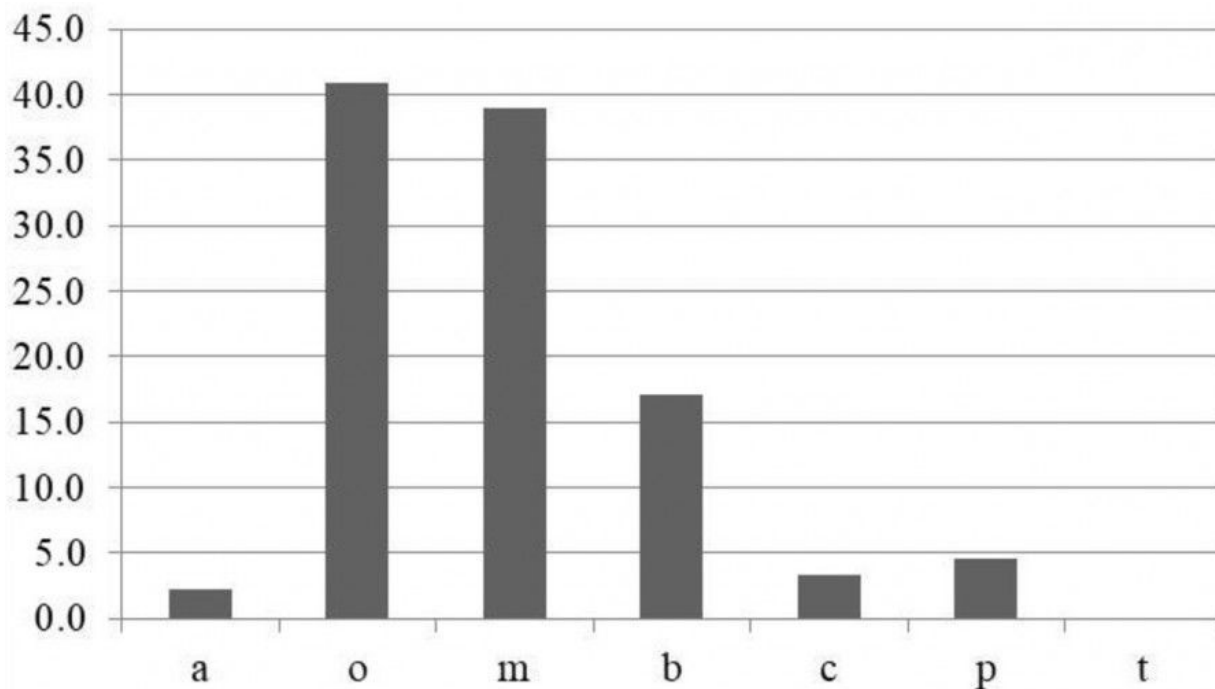


Рис. 5. Спектр гемеробии сообществ с *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo. По оси абсцисс – уровни гемеробии; по оси ординат – доля а-о-м-б-с-р-т-гемеробии, %

Fig. 5. The spectrum of hemeroby of communities with *Dactylorhiza maculata* (L.). On the Y axis – levels of hemeroby; on the X axis – proportion of a-o-m-b-c-p-t is hemeroby, %

В спектре гемеробии сообществ с *D. maculata* отмечается доминирование антропофобных видов (а-о-т – отрезок спектра): от 60 до 100 %, максимальные показатели которых зафиксированы в болотных местообитаниях *D. maculata* (мезо-олиготрофное сфагновое болото). Доля антропотолерантных видов варьирует от 10.7 до 40.0 %.

Для вида установлено достаточно высокое значение апофитизма – 25.8 %. *D. maculata* характеризуется широким диапазоном антропотолерантности: от 12 до 66.7 %. Это связано, вероятнее всего, с произрастанием *D. maculata* в растительных сообществах, как естественных, так и типологически являющихся сукцессионными (зарастающие мелколесьем выработанные торфяные месторождения, заболоченные луга на торфяниках).

В целом значительная доля участия б-с-р-гемеробов свидетельствует о способности вида переносить умеренное антропогенное воздействие. Способность *D. maculata* выдерживать рекреационные нагрузки отмечалась в работах и других исследователей (Василевская и др., 2007; Верещагина и др., 2009).

Заключение

В условиях таежной зоны в пределах Кировской области исследуемые ценопопуляции *D. maculata* приурочены как к естественным типам местообитаний (мезо-олиго-

трофное сфагновое болото), так и типологически являющимся сукцессионными (березняк разнотравно-вейниковый).

По отношению к комплексу всех экологических шкал Д. Н. Цыганова *D. maculata* относится к мезобионтным видам ($It = 0.54$) и характеризуется широким потенциальным диапазоном по большинству рассматриваемых факторов, что позволяет виду занимать местообитания с весьма изменчивыми условиями среды.

Определяющими параметрами экоареала ценопопуляций *D. maculata* являются факторы освещенности и увлажнения почвы.

В пределах рассматриваемого фрагмента распространения эдафические условия *D. maculata* по шкале увлажнения почв соответствуют режимам от сухолесолугового до сыролесолугового; по фактору солевого режима почв – небогатым и довольно богатым почвам; кислотности почв – кислым почвам; богатства почв азотом – очень бедным и бедным азотом почвам; переменной увлажненности – почвам с относительно устойчивым и слабо переменной увлажненностью.

Диапазон изученных местообитаний вида не выходит за потенциально возможные границы по всем рассматриваемым абиотическим факторам.

Dactylorhiza maculata по показателю гемеробии является видом, переносящим незначительное и умеренное антропогенное воздействие.

Библиография

- Блинова И. В. Эколого-биологические особенности некоторых представителей семейства *Orchidaceae* Мурманской области : Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1995. 24 с.
- Быченко Т. М. Методы популяционного мониторинга редких и исчезающих видов растений Прибайкалья . Иркутск: Иркутский гос. пед. ун-т, 2008а. 164 с.
- Быченко Т. М. Экологическое разнообразие ценопопуляций орхидных Прибайкалья // Принципы и способы сохранения биоразнообразия: Материалы III Всерос. науч. конф. / Под ред. Л. А. Жуковой. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского гос. ун-та, 2008б. С. 313–316.
- Василевская Н. В., Глазунова Е. Д., Путилова Н. В. Состояние ценопопуляций *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo на нарушенных местообитаниях в условиях Арктики // Актуальные проблемы геоботаники: Материалы III Всерос. школы-конференции / Под ред. С. А. Кутенкова, А. В. Сониной, В. В. Тимофеевой. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. Ч. 1. С. 97–101.
- Вахрамеева М. Г. Род Пальчатокоренник // Биологическая флора Московской области. 2000. Вып. 14. С. 55–86.
- Вахрамеева М. Г., Варлыгина Т. И., Татаренко И. В. Орхидные России (биология, экология и охрана) . М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 437 с.
- Вахрамеева М. Г., Татаренко И. В., Быченко Т. М. Экологические характеристики некоторых видов евразийских орхидных // Бюллетень МОИП. Отд. Биол. 1994. Т. 99. № 4. С. 75–82.
- Верещагина В. А., Шибанова Н. Л., Антипина М. Г. Влияние антропогенной нагрузки на состояние ценопопуляций орхидей // Вестник Пермского университета. Серия: Экология. Охрана и природы. 2009. Вып. 10 (36). С. 130–135.
- Егорова Н. Ю., Сулейманова В. Н. Оценка состояния ценопопуляций *Cypripedium calceolus* L. на выходах известняковых пород по склонам долины реки Вятка // Вестник Томского государственного

- ного университета. Биология. 2019. № 47. С. 40–58. DOI: 10.17223/19988591/47/3.
- Егорова Н. Ю., Сулейманова В. Н. Биотопические особенности распространения и устойчивость к антропогенному воздействию *Listera ovata* (L.) R. Br. в Кировской области // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2020. Т. 6 (72). № 1. С. 47–56. DOI: 10.37279/2413-1725-2020-6-1-47-56.
- Жукова Л. А. Экологическое разнообразие ценопопуляций модельных видов растений в Национальном парке «Марий Чодра» // Биоразнообразие растений в экосистемах Национального парка «Марий Чодра». Йошкар-Ола, 2005. Ч. 2. С. 16–29.
- Жукова Л. А., Дорогова Ю. А., Турмухаметова Н. В., Гаврилова М. Н., Полянская Т. А. Экологические шкалы и методы анализа экологического разнообразия растений. Йошкар-Ола: МарГУ, 2010. 368 с.
- Зубкова Е. В., Ханина Л. Г., Грохлина Т. И., Дорогова Ю. А. Компьютерная обработка геоботанических описаний по экологическим шкалам с помощью программы EcoScaleWin: Учеб. пособие. Йошкар-Ола: Марийский гос. ун-т: Пущинский гос. ун-т, 2008. 96 с.
- Красная книга Кировской области: Животные, растения, грибы. Киров: Департамент экологии и природопользования Кировской обл., 2014. 336 с.
- Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
- Миркин Б. М., Наумова Л. Г. Наука о растительности (история и состояние основных концепций). Уфа: Гилем, 1998. 413 с.
- Пакеева А. Э., Пересторонина О. Н. Семейства *Orchidaceae* особо охраняемой природной территории «Медведский бор» // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XVI Всерос. научно-практ. конф. с международным участием / Под ред. Т. Я. Ашихминой. Киров: Вятский гос. ун-т, 2018. Кн. 2. С. 67–69.
- Селедец В. П. Концепция экологического ареала вида в ботанических исследованиях на Дальнем Востоке России // Бюллетень ботанического сада-института ДВО РАН. 2010. № 7. С. 23–38.
- Смольянинова Л. А. *Orchidaceae* // Флора европейской части. Л.: Наука, 1976. Т. 2. С. 10–59.
- Сулейманова В. Н., Егорова Н. Ю. К экологии *Cypripedium calceolus* L. (*Orchidaceae*) в Кировской области // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2020. Т. 6 (72). № 2. С. 234–248. DOI: 10.37279/2413-1725-2020-6-2-234-248.
- Тарасова Е. М. Флора Вятского края. Часть 1. Сосудистые растения. Киров: ОАО «Кировская областная типография», 2007. 440 с.
- Филиппов Е. Г. Внутривидовая изменчивость и экология видов рода *DACTYLORHIZA* NECK. EX NEVSKI (СЕМ. ORCHIDACEAE) на Урале: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 1997. 24 с.
- Цыганов Д. Н. Фитоиндикация режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука, 1983. 198 с.
- Чупракова Е. И., Савиных Н. П. Структура особей *Calypso bulbosa* (L.) Oakes и *Epipactis palustris* (L.) Crantz с позиции модульной организации // Ярославский педагогический вестник. Естественные науки. 2012. № 4. Т. III. С. 97–102.
- Bilz M., Kell S. P., Maxted N. and Lansdown R. V. European Red List of Vascular Plants. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. 130 p.
- Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora. Appendices I, II and III valid from 12 June 2013. International Environment House. Switzerland, Geneva, 45.
- Ellenberg H., Weber H. E., Dull R., Volkmar W., Willg W., & Dirk P. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa // Scripta Geobotanica. 1991. Vol. 18. S. 9–166.
- Frank D., Klotz S. Biologisch-okologisch Daten zur Flora der DDR. Halle (Saale), 1990. 167 p.
- 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.

ASSESSMENT OF ECOLOGICAL AND CENOTIC CONDITIONS OF *DACTYLORHIZA MACULATA* (L.) SOO (ORCHIDACEAE JUSS.) VYATKA-KAMA INTERFLUVE

YEGOROVA
Natalya Yurevna

PhD, Professor B. M. Zhitkov all-Russian research Institute of hunting and animal husbandry., n_chirkova@mail.ru

SULEYMANOVA
Venera Nuritdinovna

PhD, Prof. Zhitkov all-Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, Vyatka State Agricultural Academy, venera_su@mail.ru

Keywords:

Dactylorhiza maculata
Orchidaceae
ecological scales
ecoarea
hemeroby
Kirov region

Summary: Species of the Orchid family (Orchidaceae Juss.) are the most vulnerable elements of natural ecosystems due to their biological characteristics and high sensitivity to edaphotopic conditions. Most representatives of Orchids are listed in the Red books of various ranks and are protected in conservation areas. Spotted orchid *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo is included in the European list of vascular plants (LC category), in Annex II to the CITES Convention, as well as in the Red books of 25 regions of the Russian Federation, including the Kirov region – category 3. The aim of the study was to assess the ecological and cenotic preferences of *D. maculata* in the taiga zone of the Vyatka-Kama interstream area. Identification of environmental preferences of *D. maculata* was carried out according to the indicative environmental scales of D. N. Tsyganov (1983). As a result of research conducted in the taiga zone of the Kirov region, it was found that the species was characterized by a wide potential range for most of the considered factors. It was revealed that in relation to the complex of all environmental scales of D. N. Tsyganov, *D. maculata* belonged to mesobiont species (It = 0.54). According to the combination of climatic factors, *D. maculata* belongs to the hemistenovalent species (It = 0.44). According to the light-shading factor, it belongs to eurybiont species (It = 0.67). In relation to the complex of soil factors, *D. maculata* is a hemieytrivalent (It = 0.60). It is shown that *D. maculata* is a species that tolerates minor and moderate anthropogenic influence. O (oligo-) and m (meso-) hemerobic species predominate in all the studied habitats of *D. maculata*.

Received on: 23 January 2020

Published on: 26 December 2020

References

- Bilz M., Kell S. P., Maxted N. and Lansdown R. V. European Red List of Vascular Plants. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. 130 p.
- Blinova I. V. Ecological and biological features of some representatives of the family Orchidaceae of the Murmansk region: Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. M., 1995. 24 p.
- Bychenko T. M. Ecological diversity of Orchid populations in the Baikal region, Principy i sposoby sohraneniya bioraznoobraziya: Materialy III Vserop. nauch. konf., Pod red. L. A. Zhukovoy. Yoshkar-Ola: Izd-vo Mariyskogo gop. un-ta, 2008b. P. 313–316.
- Bychenko T. M. Methods of population monitoring of rare and endangered plant species of the Baikal region. Irkutsk: Irkutskiy gop. ped. un-t, 2008a. 164 p.
- Chuprakova E. I. Savinyh N. P. Structure of individuals of *Calypso bulbosa* (L.) Oakes and *Epipactis palustris* (L.) Crantz from the position of modular organization, Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik. Estestvennye nauki. 2012. No. 4. T. III. P. 97–102.
- Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora. Appendices I, II and III valid from 12 June 2013. International Environment House. Switzerland, Geneva, 45.
- Cyganov D. N. Phytoindication of regimes in the subzone of coniferous and broad-leaved forests. M.: Nauka, 1983. 198 p.
- Egorova N. Yu. Suleymanova V. N. Biotopical characteristic of distribution and resistance to andropogenic press of *Listera ovata* (L.) R. Br. in the Kirov region, Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Himiya. 2020. T. 6 (72). No. 1. P. 47–56. DOI:

10.37279/2413-1725-2020-6-1-47-56.

- Egorova N. Yu. Suleymanova V. N. Estimation of *Cypripedium calceolus* L. coenopopulations on limestone deposits along the slopes of the Vyatka River valley, Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2019. No. 47. P. 40–58. DOI: 10.17223/19988591/47/3.
- Ellenberg H., Weber H. E., Dull R., Volkmar W., Willg W., & Dirck P. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa, Scripta Geobotanica. 1991. Vol. 18. S. 9–166.
- Filippov E. G. CK. EM. Intraspecific variability and ecology of the genus DACTYLORHIZA NECK. EX NEVSKI (Family ORCHIDACEAE): Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. Ekaterinburg, 1997. 24 p.
- Frank D., Klotz S. Biologisch-okologisch Daten zur Flora der DDR. Halle (Saale), 1990. 167 p.
- 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.
- Methods of investigation of forest communities. SPb.: NIImimii SPbGU, 2002. 240 p.
- Mirkin B. M. Naumova L. G. Vegetation science (history and modern state of basic concepts). Ufa: Gilem, 1998. 413 p.
- Pakeeva A. E. Perestoronina O. N. Family Orchidaceae of the specially protected natural territory «Medvedsky Bor», Biodiagnostika sostoyaniya prirodnih i prirodno-tehnogennyh sistem: Materialy XVI Vserop. nauchno-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem, Pod red. T. Ya. Ashihminoy. Kirov: Vyatskiy gop. un-t, 2018. Kn. 2. P. 67–69.
- Red Data Book of Kirov region: animals, plants, fungi. Kirov: Departament ekologii i prirodopol'zovaniya Kirovskoy obl., 2014. 336 p.
- Seledec V. P. The concept of the ecological range of the species in botanical research in the far East of Russia, Byulleten' botanicheskogo sada-instituta DVO RAN. 2010. No. 7. P. 23–38.
- Smol'yaninova L. A. Orchidae, Flora evropeyskoy chasti. L.: Nauka, 1976. T. 2. P. 10–59.
- Suleymanova V. N. Egorova N. Yu. Ecology of *Cypripedium calceolus* L. (Orchidaceae) in Kirov region, Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Himiya. 2020. T. 6 (72). No. 2. P. 234–248. DOI: 10.37279/2413-1725-2020-6-2-234-248.
- Tarasova E. M. Flora of Vyatsky kray. Part 1. Vascular plants. Kirov: OAO «Kirovskaya oblastnaya tipografiya», 2007. 440 p.
- Vahrameeva M. G. Tatarenko I. V. Bychenko T. M. Ecological characteristics of some species of Eurasian orchids, Byulleten' MOIP. Otd. Biol. 1994. T. 99. No. 4. P. 75–82.
- Vahrameeva M. G. Varlygina T. I. Tatarenko I. V. Orchids of Russia (biology, ecology and protection). M.: Tovarischestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2014. 437 p.
- Vahrameeva M. G. The Genus of *Dactylorhiza*, Biologicheskaya flora Moskovskoy oblasti. 2000. Vyp. 14. P. 55–86.
- Vasilevskaya N. V. Glazunova E. D. Putilova N. V. State of *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo cenopopulations on disturbed habitats in the Arctic, Aktual'nye problemy geobotaniki: Materialy III Vserop. shkoly-konferencii, Pod red. P. A. Kutenkova, A. V. Soninoy, V. V. Timofeevoy. Petrozavodsk: Izd-vo KarNC RAN, 2007. Ch. 1. P. 97–101.
- Vereschagina V. A. Shibanova N. L. Antipina M. G. Influence of anthropogenous loading on the condition of orchids's populations, Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Ekologiya. Ohrana i prirody. 2009. Vyp. 10 (36). P. 130–135.
- Zhukova L. A. Dorogova Yu. A. Turmuhametova N. V. Gavrilova M. N. Polyanskaya T. A. Ecological scales and methods of analysing the ecological diversity of plants. Yoshkar-Ola: MarGU, 2010. 368 p.
- Zhukova L. A. Ecological diversity of coenopopulations of model plant species in the national park «Mari Chodra», Bioraznoobrazie rasteniy v ekosistemah Nacional'nogo parka «Mariy Chodra». Yoshkar-Ola, 2005. Ch. 2. P. 16–29.
- Zubkova E. V. Hanina L. G. Grohlina T. I. Dorogova Yu. A. Computer processing of geobotanical descriptions on ecological scales using the EcoScaleWin program. Yoshkar-Ola: Mariyskiy gop. un-t: Puschinskiy gop. un-t, 2008. 96 p.



УДК 582.572.285

ЛУК АЛТЫНКОЛЬСКИЙ В УСЛОВИЯХ КУЛЬТУРЫ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

ИВАНОВА

Мария Ивановна

доктор сельскохозяйственных наук, ВНИИО - филиал ФГБНУ
ФНЦО, ivanova_170@mail.ru

БУХАРОВ

Александр Федорович

доктор сельскохозяйственных наук, ВНИИО - филиал ФГБНУ
ФНЦО, afb56@mail.ru

КАШЛЕВА

Анна Ивановна

кандидат сельскохозяйственных наук, ВНИИО - филиал ФГБНУ
ФНЦО, vniioh@yandex.ru

БАЛЕЕВ

Дмитрий Николаевич

кандидат сельскохозяйственных наук, ВНИИО - филиал ФГБНУ
ФНЦО, dbaleev@gmail.com

Ключевые слова:

лук алтынкольский
Allium altyncolicum N. Friesen
интродукция
признаки
урожайность

Аннотация: Несомненную ценность для создания новых, адаптированных к местным условиям сортов луковых культур представляют дикорастущие формы Урала, Сибири, Средней Азии, местные стародавние популяции и интродуцированные из других эколого-географических зон в течение длительного времени образцы. Всестороннее изучение биологических особенностей видов рода *Allium* при интродукции позволяет расширить ассортимент этих многолетников, используемых в пищевых и декоративных целях, и тем самым обогатить биоразнообразие культурной флоры России. Лук алтынкольский (*A. altyncolicum* N. Friesen) произрастает в Южном Алтае, узколокальный эндемик, мезогигрофит. Селекционных форм лука алтынкольского до сих пор не существует. Объектом исследования служили коллекция *A. altyncolicum* из шести образцов различного происхождения. Проведены опыты по изучению и описанию биологических и хозяйственных признаков лука алтынкольского. В условиях Московской области лук алтынкольский отличается зимостойкостью, не повреждается весенними и осенними заморозками, не отмечено повреждения вредителями. Выделены клоны № 2 и № 5, которые отличаются большим числом побегов и листьев, урожайностью 3.1–3.2 кг/м² за одну срезку, устойчивостью к ржавчине (*Puccinia alli* (DC.) F. Rudolphi), относительной устойчивостью к пероноспорозу (*Peronospora destructor* (Berk) Casp.) и высокой зимостойкостью. В фазу потребительской спелости содержание сухих веществ в листьях в среднем составило 17.9 %, аскорбиновой кислоты 128.8 мг%, каротина 23.7 мг/кг сырой массы, гидроксикоричных кислот 174 × 10⁻³ %, флавоноидов 295.2 × 10⁻³ % сухой массы. Клоновый отбор позволил создать новый исходный материал, перспективный для дальнейшей селекционной работы.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Т. Л. Егошина

Получена: 03 апреля 2020 года

Подписана к печати: 26 декабря 2020 года

Введение

На протяжении более 10 000 лет человек, окультуривая дикорастущие растения, часто отказывался от использования видов, казалось бы, бесполезных для него на тот момент. Это приводило к исчезновению из фонда первоначально освоенных растений большого числа видов и разновидностей, выращивание которых или сбор из дикой флоры сохранило только местное население локальных регионов. Многие такие виды, в том числе и рода *Allium* L., не будучи введенными в культуру, постепенно исчезают и в дикой природе. Предполагается, что из 7000 видов съедобных растений во всем мире только небольшая часть (около 150) реально выращивается и продается.

В сложившихся условиях необходимо бережное отношение к генетическим ресурсам дикой флоры, рациональное их использование путем создания специальных областей для сохранения биоразнообразия растений. Создание генных банков (*in vivo* и *in vitro*) способствует сохранению генетических ресурсов растений, представляет новую современную форму хранения зародышевой плазмы.

В практическом плане работа научных учреждений с генными банками очень сложна. Необходимо не только хранение для научных целей, но и исследование редких и исчезающих растений. Одним из таких мероприятий является фенотипическая оценка по комплексу хозяйственно ценных признаков. Оценка фенотипической изменчивости имеет некоторые ограничения, такие как затраты на персонал, трудности получения результатов в относительно короткий промежуток времени и затраты на выращивание.

Преимущества сохранения ценных видов *ex situ* в научных учреждениях заключаются в возможности всестороннего изучения биологии, биохимии, генетики растений, ускоренного их размножения, использования в селекции, всеобщего несложного доступа к коллекции и относительной гарантии ее сохранности. Очень важной является деятельность по сохранению агробиоразнообразия в условиях фермерских хозяйств (*on farm*) и на приусадебных участках.

Род *Allium* L. включает более 850 видов (Wheeler et al., 2013; Lin, Tan, 2017), является одной из самых разнообразных и таксономически сложных групп однодольных растений (Friesen et al., 2006; Fritsch et al., 2010).

Этот род распространен в северном полушарии (Friesen et al., 2006), его главный центр разнообразия находится в горных районах Юго-Западной и Центральной Азии (Friesen et al., 2006; Fritsch, Friesen, 2002). Виды рода *Allium* являются важнейшими из ключевых культур, определяющими агробиоразнообразие культивируемых растений. Создание и внедрение новых сортов будет способствовать созданию *ex situ* (в условиях культуры) генных коллекций для сохранения видов *Allium* (с учетом их изменчивости), распространение которых находится под угрозой исчезновения.

Лук алтынкольский (*A. altyncolicum* N. Friesen) – многолетнее растение. Этот вид представляет значительный интерес для использования в пищу. В природе вид встречается в Сибири – Алтай (Телецкое озеро). Телецкое озеро по-алтайски Алтынколь, что означает золотое озеро. Отсюда и название этого лука (Фризен, 1988). Произрастает в Южном Алтае, узколокальный эндемик, мезогигрофит. Растет в нижнем поясе гор, на чрезмерно прибрежных сырых лугах, окраинах болот и по галечниковым берегам рек Казахского Алтая (Котухов и др., 2011). Предложен для внесения в список охраняемых видов Томской области. Найден на галечниках по берегу р. Томи у сел Курлек и Тахтамышьево (Томский район) (Амельченко, Катаева, 2011).

Цель работы – изучить в условиях культуры Московской области основные показатели, характеризующие морфологические и хозяйственные признаки лука алтынкольского.

Материалы

Биоколлекция рода *Allium* во Всероссийском научно-исследовательском институте овощеводства – филиале ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства» (ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО) насчитывает более 80 видов (Московская область, N 55°36' E 38°1'). Объектом исследования служила *ex situ* шести образцов *A. altyncolicum*, выращенных из семян, предоставленных шестью ботаническими садами РФ. В каждом образце насчитывалось 25 растений. Семена посеяли 15 марта, рассаду высаживали в открытый грунт 25 апреля 2015 г. Схема посадки рассады – 70 x 30 см. Площадь учетной делянки составляла 5 м². Повторность – 4-кратная.

Методы

Изучение фенологии вида проводили по методике Бейдемана (Бейдеман, 1974), морфологических признаков – по методике ВИР (Изучение..., 2005).

Проведение нескольких срезов зелени в течение сезона основано на способности растений к регенерации в результате развития листовых зачатков меньшего возраста, отрастания побегов из боковых почек более высоких порядков ветвления. Кроме того, срезанные у основания листья лука часто продолжают нарастать. Лимитирующим фактором для завершения срезов является необходимость возобновления листовой массы растений и подготовка к перезимовке.

Пробы листьев отбирали в утренние часы в фазу массового отрастания растений (май) у взрослых генеративных особей, 5 лет произрастающих в условиях интродукции.

Содержание сухого вещества, моносахаров, витамина С, нитратов и каротина определяли по общепринятым методикам (Ермаков и др., 1972).

Определение суммы гидроксикоричных кислот (ГКК) проводили при длине волны 328 нм. В качестве холостого опыта использовали 96 % спирт. Долю определяемого компонента устанавливали по формуле:

$$ХГКК = D \cdot V \cdot p / (m \cdot 507), \quad [1]$$

где D – оптическая плотность; V – объем экстракта, мл (100 мл); p – разведение (в 10 раз); m – масса навески, г; величина 507 – удельный показатель поглощения гидроксикоричных кислот в растворах.

Определение суммы флавоноидов проводили в спиртовых экстрактах. Аналитическую пробу измельчали до частиц не более 1 мм. Около 1 г (точная навеска) обрабатывали 50 мл этилового спирта (70 %): нагревали в колбе с обратным холодильником в течение 30 мин., периодически встряхивая для смывания частиц сырья со стенок. Колбу охлаждали и доводили до метки тем же раствором. Извлечение фильтровали в колбу на 100 мл и доводили до метки этиловым спиртом (70 %). Оптическую плотность измеряли при $\lambda = 338$ нм. Холостой опыт – этиловый спирт (70 %). Содержание (в %) суммы флавоноидов в пересчете на 2'-О-арабинозид изоветиксина устанавливали по формуле:

$$X = D \cdot 100 / (m \cdot 353), \quad [2]$$

где D – оптическая плотность раствора; m – масса навески, г; 100 – объем мерной кол-

бы, мл; 353 – удельный показатель поглощения.

Метод определения хлорофиллов в ацетоновых экстрактах основан на измерении оптической плотности ацетоновой вытяжки при $\lambda = 662$ нм (хлорофилл a), $\lambda = 645$ нм (хлорофилл b) с последующим расчетом концентрации пигментов по уравнениям Ветштейна и Хольма для 100 % ацетона. Навеску (0.25 ... 0.50 г) растирали с песком и мелом в небольшом количестве ацетона, к растертому материалу приливали 20 ... 25 мл ацетона, далее фильтровали и спектрофотометрировали. Концентрацию пигментов в растворе устанавливали по формулам:

$$Ca = 9.784 \times D_{662} - 0.99 \times D_{644} \quad [3]$$

$$Cb = 21.426 \times D_{644} - 4.650 \times D_{662} \quad [4]$$

$$Ca + b = 5.134 \times D_{622} + 20.436 \times D_{644} \quad [5]$$

$$C = 4.695 \times D_{440.5} - 0.268 (Ca + Cb), \quad [6]$$

где Ca – концентрация хлорофилла a , мкг/мл; Cb – концентрация хлорофилла b , мкг/мл.

Содержание пигментов в образце (мкг/г) находили по формуле:

$$X = C \times V / m, \quad [7]$$

где C – концентрация пигмента в растворе, мкг/мл; V – объем вытяжки, мл; m – масса навески, г.

Повторность опытов трехкратная. Статистическую обработку проводили с использованием программы Microsoft Excel 2007.

Почва опытного участка аллювиальная луговая, имеет высокий уровень естественного плодородия, pH солевой вытяжки 5.8 ... 6.0, содержание гумуса в пахотном слое колеблется от 2.71 до 3.34 %, общего азота – от 0.19 до 0.24 %, нитратного азота 4.21 ... 6.98 мг/100 г, содержание фосфора в почве – 15.27 ... 22.15 мг/100 г, обеспеченность калием – 6.95 ... 12.50 мг/100 г. Гидролитическая кислотность низкая – 0.7 ... 0.8 мг-экв./100 г, сумма поглощенных оснований средняя – 35.65 ... 36.42 мг-экв./100 г, степень насыщенности почвы основаниями высокая – 97.8 ... 98.9 %.

Результаты

A. altyncolicum – корневищно-луковичное растение. Луковицы по несколько сидят на коротком корневище, удлинено-яйцевидные, до 1 см диаметром, с серыми бумагообразными, почти кожистыми оболочками. Феноритмотип – длительновегетирующий, летнезеленый с вынужденным зимним покоем, раннелетнецветущий. В условиях

культуры Ботанического сада-института УНЦ РАН (г. Уфа) отрастает в I–II декаде апреля. Примерно через месяц появляется генеративный побег. Растения зацветают в начале июня. Цветение продолжается 20–22 дня. Среднецветущий вид, цветение одного соцветия длится 11 дней, а одного цветка – до 7 дней. Семена созревают в I–II декаде июля, черные, морщинистые, удлиненные, длиной 0.3–0.32 см, шириной 0.15–0.2 см, с

абсолютным весом 1.72 г. Период от начала отрастания до созревания семян по годам составляет 76–86 дней (Тухватуллина, Абрамова, 2013).

В условиях Московской области отрастание растений отмечено 15 апреля, когда средняя температура выше 0 °С. 8 июня появился генеративный побег, фаза отрастания его длилась 15 суток (табл. 1).

Таблица 1. Фенодаты *A. altyncolicum* в условиях культуры (растения 5-го года жизни, ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Раменский район, 2019 г.)

Начало весеннего отрастания	Начало отрастания цветоноса	Начало раскрытия чехлика	Начало цветения	Конец цветения	Начало созревания семян	Конец созревания семян	Межфазный период от начала отрастания до созревания семян, сутки
15.05	08.05	04.06	07.06	25.06	18.06	08.07	78–83

Фаза начала цветения зафиксирована 7 июня, массовое цветение – на 6–8-е сутки, конец цветения – 25 июня. Раскрытие цветков отмечено на 2-е сутки после разрыва чехлика соцветия. Чехол отдельного зонтика раскрывался в течение 2 суток, особи – за 17–19 суток. Продолжительность фазы цветения особи составила 20–22 суток, отдельного соцветия – 10–12 суток, цветка – 5–7 суток. По длительности цветения – среднецветущий вид (18 суток). Уборку семян провели 3 и 8 июля. Продолжительность от начала отрастания до созревания семян составила 78–83 суток.

A. altyncolicum – длительновегетирующее растение. Листья остаются зелеными до установления сильных заморозков. Стебель дудчатый, 40–50 см высоты, 5–7 мм ширины, гладкий. Листья в числе 2–3 цилиндрические, дудчатые, сизые, длиной от 22 до 50 см, шириной 0.5–1 см. Зонтик многоцветковый, полушаровидный, 4–5 см диаметром, рыхловатый. Цветоножки в 1.5–2 раза длиннее околоцветника, при основании без прицветников. Цветки узкоколокольчатые диаметром 0.7–1 см. Листочки околоцветника блестящие, бледно-розовые, с темной жил-

кой, 7–13 мм длины, линейно-ланцетные, острые (Тухватуллина, 2013). На одном соцветии насчитывается 32–84 цветка (в среднем 63.8 шт.), плодов – 30–70 шт. (в среднем 48.3), плодобразование составляет 75.8 %. Реальная семенная продуктивность на один генеративный побег – 166.8 шт., потенциальная семенная продуктивность – 382.8 шт. Среднее число семян в плоде – 3.4 шт., сенификация плода – 57.3 %, коэффициент продуктивности зонтика – 43.5 %. При семенном размножении растения зацветают на 2–3-й год. Коэффициент вегетативного размножения на 3-й год вегетации составляет в среднем 2.4. На 4-й год жизни каждый куст имеет 3–4 цветоноса (Тухватуллина, Абрамова, 2011).

В условиях Московской области цветоносный дудчатый стебель гладкий, достигает высоты 51 см, ширины 5–7 мм. Зонтик многоцветковый (20.8 шт./растение), полушаровидный, 4.0 см диаметром, рыхловатый. Цветки узкоколокольчатые, блестящие, фиолетовые, с темной жилкой, диаметром до 1 см. Число цветков в соцветии – до 100 шт. (табл. 2).

Таблица 2. Морфологические признаки *A. altyncolicum* (растения 5-го года жизни, ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Раменский район, 2019 г.)

Длина цветоноса, см	Число соцветий, шт./растение	Число цветков в соцветии, шт.	Диаметр соцветия, см	Продолжительность цветения, сутки	Окраска и форма цветка	Форма соцветия
51.0	20.8	100.4	4.0	18–20	Фиолетовая, узкоколокольчатая	Полушаровидная, рыхловатая

Взрослые особи представляют собой систему последовательно сменяющих друг друга монокарпических побегов. Возобновляется за счет почки в пазухе верхнего ассимилирующего листа. Благодаря естественному вегетативному размножению происходит ежегодное разрастание растения (формирует дернину). Искусственное вегетативное размножение путем деления дернины можно проводить рано весной или осенью.

На одном монокарпическом побеге 2–3 листа, цилиндрические, дудчатые, сизые, длиной до 46 см, шириной 0.9 см. Высота

растения в фазе потребительской спелости до 53 см, число монокарпических побегов у пятилетней особи в среднем до 26 шт./растение.

Образцы *A. altyncolicum* 5-го года жизни обеспечили в среднем за одну срезку урожайность зелени на уровне 2.6–3.2 кг/м². Было проведено 3 срезки. Максимальную урожайность обеспечили клоны № 2 и № 5 (3.1–3.2 кг/м² за одну срезку соответственно). Формирование максимального урожая зеленого пера у всех образцов отмечено при срезке в первой половине июня (табл. 3).

Таблица 3. Комплекс признаков, определяющих урожайность *A. altyncolicum* (растения 5-го года жизни, ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО, Московская область, Раменский район, 2019 г.)

Показатель	№ клона						HCP ₀₅
	1	2	3	4	5	6	
Высота растения перед срезкой, см	48.8	51.4	48.7	48.6	52.7	48.5	1.7
Число монокарпических побегов, шт./растение	25.6	26.2	25.4	25.5	26.9	25.1	0.5
Число листьев, шт./растение	47.0	49.5	46.8	46.9	49.8	46.7	1.2
Длина листа, см	45.3	45.2	45.3	45.4	46.0	45.1	0.2
Ширина листа, см	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.04
Урожайность за одну срезку, кг/м ²	2.8	3.1	2.7	2.7	3.2	2.6	0.2

Дикие пищевые луки рано и быстро отрастают весной и дают большое число листьев, которые можно использовать в пищу уже в начале мая. В этот период они богаты биологически активными соединениями (Тухватуллина, Абрамова, 2012; Иванова и др., 2019). Исторически сложилось, что эти растения в основном использовали для профилактики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний, гипертонии и сахарного диабета (Arreola et al., 2015; Ling et al., 2017). Листья диких пищевых луков служат источником важных вторичных метаболитов растений, включая стероидные сапонины и сапогенины, флавоноиды и сераоргани-

ческие соединения (аллицин, диаллилди-сульфид, диаллилтрисульфид и др.) (Mikaili et al., 2013). Флавоноиды обладают антиоксидантными, антибактериальными и фунгицидными свойствами (Голубкина и др., 2010). Из различных видов *Allium* выделены ценные фенольные соединения – производные коричной кислоты (Bagiu et al., 2012). Они обладают противогрибковой (Sadeghi et al., 2013), антиоксидантной (Голубкина и др., 2010), противовоспалительной (Bagiu et al., 2012), противоопухолевой (Tsubura et al., 2011) и цитотоксической (Wang et al., 2017) активностью. Хлорофилл и каротиноиды, содержащиеся в листьях, активизируют об-

менные процессы в клетках (Lachowicz et al., 2018). Установлено, что свойство растений рода *Allium* L. препятствовать свертыванию крови пропорционально как содержанию соединений серы, так и уровню аккумуляции полифенолов (Beretta et al., 2017). Гидроксикоричные кислоты, или производные кофейной кислоты, – наиболее распространенные полифенольные кислоты в высших растениях, играющие в них роль регуляторов роста.

Важным этапом работы при интродукции дикорастущих луков является установление их питательной ценности. В условиях культуры Ботанического сада-института УНЦ РАН (г. Уфа) в фазе потребительской спелости в листьях *A. altyncolicum* содержание составило (% в расчете на абсолютно сухое вещество): сухого вещества – 15.44, сахара – 8.2, протеи-

на – 13.5, липидов – 3.5, азота – 2.16, золы – 6.47, крахмала – 5.58, каротина – 116.50 мг/кг, аскорбиновой кислоты – 66.2 мг%. Содержание минеральных веществ в воздушно-сухой навеске листьев отмечено на уровне (%): Ca – 1.56, Mg – 0.49, P – 0.34, K – 2.07, S – 0.17; (мг/кг): Fe – 124.52, Cu – 7.22, Zn – 232.51, Mn – 37.60, Co – 0.29 (Тухватуллина, 2010).

В условиях Московской области в фазу потребительской спелости содержание сухих веществ в листьях составило 17.9 %; на сырое вещество: нитратов – 169.0 мг/кг, моносахаров – 2.6 %, витамина С – 128.8 %, каротина – 23.7 мг/кг; на сухое вещество: хлорофилла – 252.0 мг/100 г, гидроксикоричных кислот – 174.0×10^{-3} %, флавоноидов – 295.2×10^{-3} % (табл. 4).

Таблица 4. Биохимические показатели *A. altyncolicum* в фазу потребительской спелости

Показатель	Значение
Сухое вещество, %	17.9
Нитраты, мг/кг (сырое вещество)	169.0
Моносахара, % (сырое вещество)	2.6
Аскорбиновая кислота, мг% (сырое вещество)	128.8
Хлорофилл, мг/100 г (сухое вещество)	252.0
Каротин, мг/кг (сырое вещество)	23.7
Гидроксикоричные кислоты, 10^{-3} % (сухое вещество)	174.0
Флавоноиды, 10^{-3} % (сухое вещество)	295.2

Таким образом, высокое содержание витамина С и других биологически активных веществ в листьях *A. altyncolicum* свидетельствует о высокой питательной ценности этого вида и возможности использования его в пищу для коррекции дефицита витаминов с ранней весны до поздней осени.

Наиболее вредоносная болезнь лука – пероноспороз, или ложная мучнистая роса.

Низший гриб *Peronospora destructor* (Berk) Casp. является типичным облигатным паразитом – питается на вегетирующих растениях, поражая листья и семенные стрелки. В период проведения исследований в естественных условиях из-за обильных осадков в июле и августе образцы № 3 и № 4 значительно (вред был ощутим) поражались пероноспорозом (табл. 5).

Таблица 5. Пораженность *A. altyncolicum* пероноспорозом (*Peronospora destructor* (Berk) Casp.) и ржавчиной (*Puccinia allii* Rub.) в условиях Московской области

Клон	Пероноспороз	Ржавчина
1	+	+
2	+	-
3	++	+
4	++	-
5	+	-
6	+	-

Примечание. – заболевание не выявлено; + вред незначителен; ++ вред ощутим; +++ вред значителен.

Остальным изученным образцам болезнь нанесла незначительный вред. Клонам №1 и №3 был нанесен незначительный вред ржавчиной (*Puccinia allii* Rub.). На растениях других клонов признаков поражения ржавчиной не выявлено.

Зимостойкость всех испытанных образцов составила 100 %.

Заключение

В ходе исследований проведены опыты по изучению и описанию биологических и хозяйственных признаков *A. altynolicum*. В условиях Московской области растения отличаются зимостойкостью, не повреждаются весенними и осенними заморозками, не отмечено повреждения вредителями. Выделены клоны № 2 и № 5, которые отличаются большим числом побегов и листьев, урожайностью 3.1–3.2 кг/м² за одну срезку, устойчивостью к *P. allii*, относительной устойчивостью к *P. destructor* и высокой зимостойкостью. Содержание сухих веществ в листьях в среднем составило 17.9 %, аскорбиновой кислоты 128.8 мг%, каротина 23.7 мг/кг сырой массы, гидроксикоричных кислот 174 x 10⁻³ %, флавоноидов 295.2 x 10⁻³ % сухой массы. Клоновый отбор позволил создать новый исходный материал, перспективный для дальнейшей селекционной работы. Использование изученных параметров обеспечит вклад новых знаний в теорию и практику селекции и семеноводства, позволит ускорить получение новых сортов и гетерозисных гибридов, оценить возможности и результативность селекционной работы по повышению урожайности, улучшению качества продукции и повышению устойчивости новых сортов к действию неблагоприятных факторов среды, в т. ч. к *P. destructor* и *P. allii* для Нечерноземной зоны России.

Библиография

- Амельченко В. П., Катаева Т. Н. Новые местонахождения редких видов растений на юге Томской области // Ботанические исследования Сибири и Казахстана. 2011. № 17. С. 40–42.
- Бейдеман И. Н. Методика изучения фенологии растений и растительных сообществ. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1974. 155 с.
- Голубкина Н. А., Маланкина Е. Л., Кошелева О. В., Соловьева А. Ю. Содержание биологически активных веществ – селена, флавоноидов, аскорбиновой кислоты и хлорофилла – в различных видах черемши // Вопросы питания. 2010. Т. 79. № 1. С. 78–81.
- Ермаков А. И., Арасимович В. В., Смирнова-Иконникова М. И., Ярош Н. П., Луковникова Г. А. Методы биохимического исследования растений. Л.: Колос, 1972. С. 88–92.
- Иванова М. И., Бухаров А. Ф., Балеев Д. Н., Бухарова А. Р., Кашлева А. И., Середин Т. М., Разин О. А. Биохимический состав листьев видов *Allium L.* в условиях Московской области // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 5. С. 47–50. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10511.
- Изучение и поддержание в живом виде мировой коллекции лука и чеснока (методические указания) / Сост. В. В. Пережогина, В. И. Кривченко, А. Е. Соловьева, В. В. Шумилина, Ю. В. Погромский. СПб.: ГНЦ РФ ВИР, 2005. 109 с.
- Котухов Ю. А., Данилова А. Н., Ануфриева О. А. Конспект луков (*Allium L.*) Казахстанского Алтая, Саура-Манрака и Зайсанской котловины // Ботанические исследования Сибири и Казахстана. 2011. № 17. С. 3–33.
- Тухватуллина Л. А. Изучение хозяйственно ценных качеств дикорастущих луков в условиях культуры // Вестник Оренбургского государственного университета. 2010. № 6 (112). С. 160–162.
- Тухватуллина Л. А., Абрамова Л. М. Биохимический состав листьев у дикорастущих видов лука в Республике Башкортостан // Сельскохозяйственная биология. 2012. № 3. С. 109–113.
- Тухватуллина Л. А., Абрамова Л. М. Редкие виды рода *Allium L.* в интродукции // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2011. № 14-1 (98). С. 68–74.
- Тухватуллина Л. А., Абрамова Л. М. Среднепогодные фенодаты и сезонный ритм роста и развития луков в условиях интродукции // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2013. № 10 (153). С. 45–50.
- Фриезен Н. В. Луковые Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 185 с.
- Arreola R., Quintero-Fabián S., López-Roa R. I., Flores-Gutiérrez E. O., Reyes-Grajeda J. P., Carrera-Quintanar L., Ortuño-Sahagún D. Immunomodulation and Anti-Inflammatory Effects of Garlic Compounds // J. Immunol. Res. 2015. DOI: 10.1155/2015/401630.
- Bagiu R. V., Vlaicu B., Butnariu M. Chemical Composition and *in vitro* Antifungal Activity Screening of the *Allium ursinum L.* (Liliaceae) // Int. J. Mol. Sci. 2012. Vol. 13. P. 1426–1436. DOI: 10.3390/ijms13021426.
- Beretta H. V., Bannoud F., Insani M., Berli F., Hirscheegger P., Galmarini C. R., Cavagnaro P. F. Relationships Between Bioactive Compound Content and the Antiplatelet and Antioxidant Activities of Six *Allium*

- Vegetable Species // Food Technol. Biotechnol. 2017. Vol. 55 (2). P. 266–275. DOI: 10.17113/ftb.55.02.17.4722.
- Fritsch R. M., Blattner F. R., Gurushidze M. New classification of *Allium* L. subg. *Melanocrommyum* (Webb & Berthel) Rouy (Alliaceae) based on molecular and morphological characters // Phyton. 2010. № 49. P. 145–220.
- Fritsch R. M., Friesen N. Evolution, domestication, and taxonomy // Rabinowitch H. D., Currah L. (Eds.). *Allium Crop Science: Recent Advances*. New York, 2002. P. 5–30.
- Friesen N., Reinhard M. F., Frank R. Phylogeny and new intrageneric classification of *Allium* (Alliaceae) based on nuclear ribosomal DNA its sequences // Aliso. 2006. № 22. P. 372–395.
- Lachowicz S., Oszmiański J. & Wiśniewski R. Determination of triterpenoids, carotenoids, chlorophylls, and antioxidant capacity in *Allium ursinum* L. at different times of harvesting and anatomical parts // Eur. Food Res. Technol. 2018. Vol. 244. P. 1269–1280. DOI: 10.1007/s00217-018-3042-3.
- Lin C.-Y. and Tan D.-Y. Seed testa micromorphology of thirty-eight species of *Allium* (Amaryllidaceae) from central Asia, and its taxonomic implications // Nordic Journal of Botany. 2017. № 35. P. 189–200.
- Ling H., He J., Tan H., Yi L., Liu F., Ji X., Wu Y., Hu H., Zeng X., Ai X., Jiang H., Su Q. Identification of potential targets for differentiation in human leukemia cells induced by diallyl disulfide // Int. J. Oncol. 2017. Vol. 50. № 2. P. 697–707. DOI: 10.3892/ijo.2017.3839.
- Mikaili P., Maadirad S., Moloudizargari M., Aghajanshakeri S., Sarahroodi S. Therapeutic uses and pharmacological properties of garlic, shallot, and their biologically active compounds // Iran J. Basic Med. Sci. 2013. Vol. 16. № 10. P. 1031–1048.
- Sadeghi M., Zolfaghari B., Senatore M., Lanzotti V. Antifungal cinnamic acid derivatives from Persian leek (*Allium ampeloprasum* subsp. *persicum*) // Phytochem. Lett. 2013. № 6. P. 360–363.
- Tsubura A., Lai Y. C., Kuwata M., Uehara N., Yoshizawa K. Anticancer effects of garlic and garlic-derived compounds for breast cancer control // Anticancer Agents Med Chem. 2011. Vol. 11. № 3. P. 249–253. DOI: 10.2174/187152011795347441.
- Wang S., Li M., Wang X., Li X., Yin H., Jiang L., Han W., Irving G., Zeng T., Xie K. Diallyl trisulfide attenuated nhexane induced neurotoxicity in rats by modulating P450 enzymes // Chem. Biol. Interact. 2017. Vol. 16. P. 30565–30568. DOI: 10.1016/j.cbi.2017.01.013.
- Wheeler E. J., Mashayekhi S., McNeal D. W., Columbus J. T. and Pires J. C. Molecular systematics of *Allium* subgenus *Amerallium* (Amaryllidaceae) in North America // Am. J. Bot. 2013. № 100. P. 701–711.

ALTYNKOLSKY UNION IN THE CULTURAL CONDITIONS OF THE MOSCOW REGION

IVANOVA
Maria Ivanovna

[illegible]

BUKHAROV
Aleksander Fedorovich

*D.Sc., All-Russian Research Institute of Vegetable Growing - a branch of
the Federal State Budget Research Institution &&&&&
&&&&&&&&&&&&&&&&"Federal
Research Center for Vegetable Growing, afb56@mail.ru*

KASHLEVA
Anna Ivanovna

[illegible]

BALEEV
Dmitry Nikolaevich

PhD, All-Russian Research Institute of Vegetable Growing - a branch of the Federal State Budget Research Institution ;Federal Research Center for Vegetable Growing, dbaleev@gmail.com

Keywords:
altynkolsky onion
Allium altynolicum N. Friesen
introduction
characteristics
productivity

Summary: The wild-growing forms of the Urals, Siberia, Central Asia, local ancient populations, and samples introduced from other ecological and geographical zones for a long time are of undoubted value to create new, locally adapted varieties of onion crops. A comprehensive study of the biological characteristics of species of the genus *Allium* during introduction allows us to expand the range of these perennials used for food and decorative purposes, and thereby enrich the biodiversity of the cultural flora of Russia. Altynkolsky onion (*A. altynolicum* N. Friesen) grows in Southern Altai, it is narrow-local endemic, mesogyrophyte. Selection forms of altynkolsky onion still do not exist. The object of the study was a collection of *A. altynolicum* from six samples of various origins. Experiments were carried out to study and describe the biological and economic characteristics of Altynkolsky onion. In the conditions of the Moscow region, Altynkolsky onion is characterized by winter hardiness; it is not damaged by spring and autumn frosts, and no damage by pests is noted. Clones No. 2 and No. 5 were distinguished, which are distinguished by a large number of shoots and leaves, yields of 3.1–3.2 kg/m² per cut. At that they are characterized by resistance to rust (*Puccinia alli* (DC.) F. Rudolphi), relative resistance to peronosporosis (*Peronospora destructor* (Berk) Casp.), as well as high winter hardiness. In the economic maturity phase, the dry matter content in the leaves averaged 17.9 %, the dry matter content in the leaves averaged 17.9 %, ascorbic acid 128.8 mg%, carotene 23.7 mg/kg wet weight, hydroxycinnamic acids 174×10^{-3} % and flavonoids 295.2×10^{-3} % dry mass. Clone selection allowed us to create new source material promising for further breeding work.

Reviewer: T. L. Egoshina

Received on: 03 April 2020

Published on: 26 December 2020

References

- Amel'chenko V. P. Kataeva T. N. New locations of rare plant species in the South of the Tomsk Region, *Botanicheskie issledovaniya Sibiri i Kazahstana*. 2011. No. 17. P. 40–42.
- Arreola R., Quintero-Fabián S., López-Roa R. I., Flores-Gutiérrez E. O., Reyes-Grajeda J. P., Carrera-Quintanar L., Ortuño-Sahagún D. Immunomodulation and Anti-Inflammatory Effects of Garlic Compounds, *J. Immunol. Res.* 2015. DOI: 10.1155/2015/401630.
- Bagiu R. V., Vlaicu B., Butnariu M. Chemical Composition and in vitro Antifungal Activity Screening of the *Allium ursinum* L. (Liliaceae), *Int. J. Mol. Sci.* 2012. Vol. 13. P. 1426–1436. DOI: 10.3390/ijms13021426.
- Beretta H. V., Bannoud F., Insani M., Berli F., Hirscheegger P., Galmarini C. R., Cavagnaro P. F. Relationships Between Bioactive Compound Content and the Antiplatelet and Antioxidant Activities of Six *Allium* Vegetable Species, *Food Technol. Biotechnol.* 2017. Vol. 55 (2). P. 266–275. DOI: 10.17113/ftb.55.02.17.4722.
- Beydeman I. N. Methodology for studying the phenology of plants and plant communities. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1974. 155 p.
- Ermakov A. I. Arasimovich V. V. Ikonnikova M. I. Yarosh N. P. Lukovnikova G. A. Biochemical research methods of plants. L.: Kolos, 1972. P. 88–92.
- Friesen N., Reinhard M. F., Frank R. Phylogeny and new intrageneric classification of *Allium* (Alliaceae) based on nuclear ribosomal DNA its sequences, *Aliso*. 2006. No. 22. R. 372–395.
- Friezen N. V. *Alliums of Siberia*. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1988. 185 p.
- Fritsch R. M., Blattner F. R., Gurushidze M. New classification of *Allium* L. subg. *Melanocrommyum* (Webb & Berthel) Rouy (Alliaceae) based on molecular and morphological characters, *Phyton*. 2010. No. 49. R. 145–220.
- Fritsch R. M., Friesen N. Evolution, domestication, and taxonomy, Rabinowitch H. D., Currah L. (Eds.). *Allium Crop Science: Recent Advances*. New York, 2002. R. 5–30.
- Golubkina N. A. Malankina E. L. Kosheleva O. V. Solov'eva A. Yu. The content of biologically active substances – selenium, flavonoids, ascorbic acid and chlorophyll – in various types of wild garlic, *Voprosy pitaniya*. 2010. T. 79. No. 1. P. 78–81.
- Ivanova M. I. Buharov A. F. Baleev D. N. Buharova A. R. Kashleva A. I. Seredin T. M. Razin O. A. *Allium* L. Biochemical composition of leaves of *Allium* L. species under conditions of the Moscow region, *Dostizheniya nauki i tehniki APK*. 2019. T. 33. No. 5. P. 47–50. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10511.
- Kotuhov Yu. A. Danilova A. N. Anufrieva O. A. *Allium* L. Abstract of onions (*Allium* L.) of Kazakhstan Altai, Sauro-Manrak and Zaisan depression, *Botanicheskie issledovaniya Sibiri i Kazahstana*. 2011. No. 17. P. 3–33.
- Lachowicz S., Oszmiański J. & Wiśniewski R. Determination of triterpenoids, carotenoids, chlorophylls, and antioxidant capacity in *Allium ursinum* L. at different times of harvesting and anatomical parts, *Eur. Food Res. Technol.* 2018. Vol. 244. R. 1269–1280. DOI: 10.1007/s00217-018-3042-3.
- Lin C, Y. and Tan D, Y. Seed testa micromorphology of thirty-eight species of *Allium* (Amaryllidaceae) from central Asia, and its taxonomic implications, *Nordic Journal of Botany*. 2017. No. 35. R. 189–200.
- Ling H., He J., Tan H., Yi L., Liu F., Ji X., Wu Y., Hu H., Zeng X., Ai X., Jiang H., Su Q. Identification of potential targets for differentiation in human leukemia cells induced by diallyl disulfide, *Int. J. Oncol.* 2017. Vol. 50. No. 2. P. 697–707. DOI: 10.3892/ijo.2017.3839.
- Mikaili P., Maadirad S., Moloudizargari M., Aghajanshakeri S., Sarahroodi S. Therapeutic uses and pharmacological properties of garlic, shallot, and their biologically active compounds, *Iran J. Basic Med. Sci.* 2013. Vol. 16. No. 10. P. 1031–1048.
- Sadeghi M., Zolfaghari B., Senatore M., Lanzotti V. Antifungal cinnamic acid derivatives from Persian leek (*Allium ampeloprasum* subsp. *persicum*), *Phytochem. Lett.* 2013. No. 6. R. 360–363.
- Studying and keeping alive the world's onion and garlic collection (guidelines), Sost. V. V. Perezhogina, V. I. Krivchenko, A. E. Solov'eva, V. V. Shumilina, Yu. V. Pogromskiy. SPb.: GNC RF VIR, 2005. 109 p.
- Tsubura A., Lai Y. C., Kuwata M., Uehara N., Yoshizawa K. Anticancer effects of garlic and garlic-derived compounds for breast cancer control, *Anticancer Agents Med Chem.* 2011. Vol. 11. No. 3. P. 249–253. DOI: 10.2174/187152011795347441.
- Tuhvatullina L. A. Abramova L. M. *Allium* L. Rare species of the genus *Allium* L. in introduction, *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. 2011. No. 14-1 (98). P. 68–74.
- Tuhvatullina L. A. Abramova L. M. Average perennial phenodates and seasonal rhythm of growth and development of onions under conditions of introduction, *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. 2013. No. 10 (153). P. 45–50.
- Tuhvatullina L. A. Abramova L. M. Biochemical composition of leaves of wild onion species in the Republic of Bashkortostan, *Sel'skohozyaystvennaya biologiya*. 2012. No. 3. P. 109–113.

- Tuhvatullina L. A. Study of economically valuable qualities of wild-growing onions in cultural conditions, Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2010. No. 6 (112). P. 160–162.
- Wang S., Li M., Wang X., Li X., Yin H., Jiang L., Han W., Irving G., Zeng T., Xie K. Diallyl trisulfide attenuated nhexane induced neurotoxicity in rats by modulating P450 enzymes, Chem. Biol. Interact. 2017. Vol. 16. P. 30565–30568. DOI: 10.1016/j.cbi.2017.01.013.
- Wheeler E. J., Mashayekhi S., McNeal D. W., Columbus J. T. and Pires J. C. Molecular systematics of Allium subgenus Amerallium (Amaryllidaceae) in North America, Am. J. Bot. 2013. No. 100. P. 701–711.



УДК 504:064:57.084.1(470.25)

БИОТЕСТИРОВАНИЕ ПОЧВ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТЕНИЙ

КУЛЬНЕВ
Вадим Вячеславович

кандидат географических наук, Центрально-Черноземное межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, kulneff.vadim@yandex.ru

НАСОНОВ
Андрей Николаевич

кандидат технических наук, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, adn22@yandex.ru

ЦВЕТКОВ
Илья Викторович

доктор технических наук, ФГБОУ ВО Тверской государственный университет, тапси@mail.ru

КОРОЛЬ
Татьяна Степановна

кандидат биологических наук, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, tskorol@gmail.com

ШАХОВСКАЯ
Кира Александровна

ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, sh.kira2014@yandex.ru

Ключевые слова:
биотестирование
лимитирующие факторы
показатель Херста
почва
поллютанты
самоорганизация
фрактал
фрактальная размерность

Аннотация: Интенсивное техногенное воздействие на компоненты окружающей среды очередной раз объясняет необходимость детального анализа взаимодействия человека и природы. Оценка степени загрязнения окружающей среды может быть построена на реакции биологических тест-объектов на внешнее воздействие, в том числе и на такое, как химическое, реализуемое через поступление из почвы в вегетативные части растений широкого спектра загрязняющих веществ. Целью исследования является разработка новых моделей, повышающих информативность биотестирования почв за счет описания самоорганизации как переходного процесса. При этом одним из перспективных методов определения загрязнения почвы является метод биотестирования, при котором оценивается динамика изменения параметров структуры тест-объекта во времени (длина проростка, развитость корневой системы). В этом аспекте фракталы оказались чрезвычайно удобным математическим инструментом описания динамики развития природного объекта в изменяющихся условиях среды, в которых природный объект сохраняет свое самоподобие, т. е. ведет себя как одно целое. В отличие от детерминированного подхода, который позволяет оценить лишь вероятность наступления кризисного

состояния в развитии растения, предложенное авторами моделирование показывает динамику и направление развития процесса: либо синтез, либо деструкция. Эта особенность является методической основой оценки влияния техногенного загрязнения почв на динамику метаболизма используемого тест-объекта. В данной работе исследовалась зависимость фрактальных характеристик проростков овса в зависимости от места его прорастания и почвы. В нашем случае фрактальные параметры позволяют судить о степени развитости растения и о том, насколько благоприятны внешние условия для его роста.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 18 мая 2020 года

Подписана к печати: 27 декабря 2020 года

Введение

Общеизвестно, что почвы являются основой экологической пирамиды и базисом развития наземных экосистем. В условиях техногенно нагруженных территорий почвы претерпевают значительные качественные изменения вследствие негативного воздействия химического, бактериологического и других видов загрязнения, так и вследствие механического преобразования, а именно уплотнения и разубоживания почвенного покрова. В этой связи в геоэкологию было введено понятие «урбоземы» – почвы селитебных территорий и городских агломераций.

Биотестирование почв методологически является определением их экологического состояния в лабораторных условиях (*in vitro*). В отечественной и зарубежной научной литературе описываются методические подходы к биотестированию экологического качества почв.

В исследовании О. А. Пестовой и А. И. Чупахиной описаны специфические физиологические группы микроорганизмов, которые встречаются лишь в присутствии определенных загрязняющих веществ и реагируют только на специальные химические соединения, например на содержание тяжелых металлов в почве (Пестова, Чупахина, 2017).

В работе самарских авторов показано, что наиболее информативным показателем качества почвы, загрязненной нефтепродуктами, является соотношение длин надземной и подземной частей фасоли. Загрязненность почвы нефтью проявляется в уменьшении данного показателя: 0.8 в нефтезагрязненной почве, 1.2 – в рекультивированной почве и 1.5 – в контрольной пробе (Баландина, Шабанова, 2007).

Исследование авторского коллектива из Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина посвящено оценке качества городских почв с использованием в качестве тест-объектов

червей энхитреид (*Enchytraeus crypticus*). Тест-реакции, регистрируемые в процессе проведения эксперимента, включают в себя смертность и изменение прироста численности особей (Смирнова и др., 2020).

Учеными из Лотарингии (Франция) в горнодобывающих районах, расположенных на юге Марокко, были отобраны пробы почв для проведения исследования с помощью набора для биотестирования MetPAD™. При этом тест на токсичность проводился одновременно с химическим анализом водных экстрактов хвостового материала и почв с целью оценки потенциальной доступности тяжелых металлов. Показано, что основными поллютантами являются цинк, медь и кадмий. Выявлено, что общая тенденция заключалась в увеличении токсичности металлов, измеряемой биотестом, с увеличением содержания доступных металлов в хвостохранилищах и грунтах. Поэтому испытание MetPAD™ может использоваться в качестве быстрого и чувствительного средства прогнозирования для оценки наличия тяжелых металлов в почвах, сильно загрязненных в результате горнодобывающей деятельности (Boularbah et al., 2005).

В работе исследователей из Монпелье (Франция) приведен сравнительный анализ модели активности свободных ионов (FIAM), модели наземного биотического лиганда (TBLM), модели диффузионных градиентов в тонких пленках (DGT) и биотеста растительного происхождения RHIZOtest по способности предсказывать концентрацию корневой меди в выращенной твердой пшенице (*Triticum turgidum durum* L.). Предполагалось, что ни один из методов не предусматривал адекватного прогноза концентрации корневой меди, что в основном коррелировало с общим количеством почвенной меди. Результаты измерений DGT и тем более прогноза FIAM отрицательно коррелировали с pH почвы и завышенным содержанием корневой меди в кислых почвах. Внедрение

TBLM улучшило численное предсказание FIAM, но все же не смогло предсказать адекватную концентрацию корневой меди, т. к. формализм TBLM не учитывал щелочение ризосферы, как это наблюдалось на месте. Напротив, измерения RHIZOtest учитывали щелочение ризосферы и были в основном соотнесены с общим содержанием меди в почве (Bravin et al., 2010).

Учеными из Италии и Швейцарии в качестве тест-объектов почв, загрязненных нефтепродуктами, были использованы эктомикоризные грибы, произрастающие на саженцах норвежской ели и тополя. Продолжительность времени между загрязнением почвы и посевом влияет как на рост саженцев, так и на микоризальный инфекционный потенциал почвы. Полученные результаты подтверждают важность микоризальных грибов в биоремедиации почв, загрязненных сырой нефтью (Nicolotti, Egli, 1998).

Исследование польских ученых было направлено на определение степени снижения незначительного загрязнения почв бензином и дизельным топливом за счет внесения бентонита, компоста и оксида кальция. При этом в качестве тест-объектов были использованы культуры рапса и посевного овса, в которых проводилось измерение содержания азота. Показано, что добавление бентонита, окиси кальция или компоста в почву, загрязненную нефтепродуктами, обычно снижало отрицательное влияние бентонита и дизельного топлива на рост растений, содержание белкового азота и увеличивало общее содержание азота в растениях. Наиболее эффективным оказался бентонит, окись кальция и компост – чуть менее эффективными. Наиболее положительные результаты были получены для ярового рапса как основной культуры. Добавление в почву компоста, бентонита и окиси кальция оказало более сильное модифицирующее влияние на содержание азота в растениях на загрязненных дизельным топливом почвах, чем бензином (Wyszkowski, Ziolkowska, 2009).

Китайскими специалистами оценивалось влияние тяжелых металлов (Cd, Cu, Pb, Zn) на активность EROD и CYP3A4 с помощью дождевого червя (*Eisenia fetida*) для выяснения их возможной индукции и потенциала в качестве биомаркеров загрязнения почвы тяжелыми металлами. Показано, что среди четырех тяжелых металлов кадмий был наиболее сильно индуцирован EROD и CYP3A4. В то время как активность EROD и CYP3A4

показала схожую тенденцию, EROD является более чувствительным, чем активность CYP3A4 при использовании *E. fetida* в качестве биомаркера загрязнения тяжелыми металлами (Cao et al., 2012).

Все вышеперечисленные подходы к определению загрязнения почв объединяет детерминированный аспект, который позволяет оценить лишь вероятность наступления кризисного состояния в развитии растения или популяции особей животных – тест-объектов. Одним из перспективных методов определения загрязнения почвы является метод биотестирования, при котором оценивается динамика изменения параметров структуры тест-объекта во времени. В этом аспекте фракталы оказались чрезвычайно удобным математическим инструментом описания динамики развития природного объекта в изменяющихся условиях среды, в которых природный объект сохраняет свое самоподобие, т. е. ведет себя как одно целое.

Таким образом, одним из методов, позволяющим оценивать размер природного объекта или развитость его структуры в изменяющихся условиях внешней и внутренней среды, является фрактальная геометрия (Mandelbrot, Hudson, 2017). Такой подход широко применяется при оценке воздействия на биологические объекты, поскольку они обладают фрактальными свойствами, или самоподобием (рис. 1) (Розенберг, 2018; Насонов и др., 2018).

В основе предлагаемого метода лежит оценка фрактальной размерности – меры изменения сложности природного объекта в зависимости от масштаба. Математически это величина описывает статистическую меру сложности используемого шаблона фрактала при его масштабировании (Молчатский и др., 2016).

Материалы

Были выбраны три точки наблюдения, расположенные в различных локациях Москвы: ул. Фестивальная (Северный административный округ), Лосиный остров (Восточный административный округ) и станция метро Лермонтовский проспект (Юго-восточный административный округ).

10–14 января 2020 г. интегральные пробы почв отбирались с глубины от 0 до 20 см около жилого дома на ул. Фестивальной, у станции метро Лермонтовский проспект и в национальном парке «Лосиный остров» методом конверта (10 * 10 м). Масса

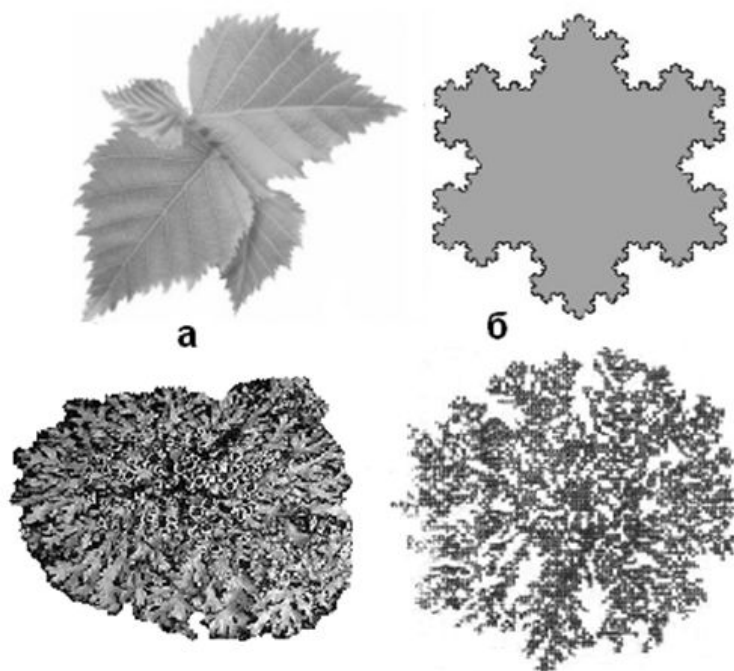


Рис. 1. Биоиндикаторы: лист березы и таллом лишайника (а) и моделирующие их фракталы (б)
Fig. 1. Bioindicators: birch leaf and lichen thalla (a) and fractals modeling them (b)

каждой объединенной пробы составила около 1 кг. Для исключения ситуаций вторичного загрязнения исследуемых материалов все образцы были помещены в отдельные герметичные пакеты, чтобы обеспечить защиту от внешнего воздействия. Эксперимент проходил с 16 по 25 января 2020 г. Для проращивания был взят овес посевной (*Avena sativa* L.). Заранее пророщенные семена овса по одному были посажены в стаканчики с почвой.

Применительно к нашему эксперименту динамика пророста овса посевного в почвах с различным содержанием поллютантов будет различаться значениями фрактальной размерности $D_{\square}(1;2)$, которые для удобства можно нормировать к показателю Херста $H = 2 - D$, отражающему динамику системного метаболизма (Насонов и др., 2019).

При этом развитость структуры проростков овса, последовательно оцениваемых в ходе эксперимента, связана с фрактальной размерностью степенной зависимостью:

$$M(\delta) = \mu\delta^{1-D}, \quad [1]$$

где $M(\delta)$ – размер проростков; $\mu\delta$ – масштабы измерения; D – фрактальная размерность.

Чрезмерное содержание загрязняющих веществ может приводить к нарушениям системного метаболизма (Жукова, 2010),

математически описываемого фракталом как статистическое нарушение самоподобия обменных процессов. Это означает, что природный объект не способен к своему воспроизведению как единого целого со средой существования: среда и объект существуют как отдельные системные целостности, не связанные друг с другом (Насонов и др., 2019).

При этом самоорганизация развития биотеста заключается в конкурентной динамике двух разнонаправленных процессов: ускорение метаболизма (при увеличении содержания биогенных компонентов – неорганических соединений азота, фосфора, серы и калия) и замедление обмена веществ (при увеличении концентрации, например, нефтепродуктов).

В работе (Корчагина, 2015) представлены результаты исследований особенностей пигментного аппарата, фотосинтетической активности листьев и продуктивной активности растений в условиях нефтяного загрязнения. В качестве объектов исследования были выбраны растения пушицы влагалищной (*Eriophorum vaginatum*), осоки острой (*Carex acuta*) и рогоза широколистного (*Typha latifolia*), произрастающие на территории Сомотлорского месторождения. Показано, что нефтяное загрязнение значительно снижает интенсивность фотосинтеза, общее количество пигментов в ассимилирующих органах растений и биологическую продуктивность.

То есть исследуется воздействие поллютантов, действующих вкупе с абиотическими факторами, в природных условиях.

В нашем случае при биотестировании загрязнения почв влияние абиотических факторов стремится к нулю. В ходе нашего эксперимента решается задача влияния загрязнения почв на динамику фрактальных параметров проростков овса посевного. При этом чрезмерное загрязнение приводит к хаотическим процессам роста овса, а умеренное – к балансу детерминированных и хаотических процессов в пределах экологической емкости среды, что порождает так называемый предельный экологический цикл воспроизводства овса в условиях загрязненной почвы.

При этом наблюдается устойчивая тенденция: чем выше загрязнение почвы, тем

более хаотичной становится динамика роста тест-объекта, и наоборот. Поэтому сравнение наблюдаемых динамик в ходе эксперимента на предмет усиления хаотичности (увеличение амплитуды и частоты колебаний до пределов устойчивости $D_d - D_k$) может являться критерием загрязненности почв, которую также можно ранжировать по степени опасности. То есть по характеру фрактальной динамики мы можем определить степень загрязненности почвы, получая тот же результат, что и при дорогостоящем количественном химическом анализе почв. Иными словами, в схеме техно-природного объекта пропадает контур обратной связи с внешней средой, и объект далее не может устойчиво воспроизводиться как системная целостность (рис. 2).



Рис. 2. Схема техно-природного объекта с обратной связью (Кульнев и др., 2020)

Fig. 2. Scheme of a techno-natural object with feedback (Kulnev et al., 2020)

В этом смысле фрактальность, как свойство природного объекта, обеспечивающее системно достаточную развитость структуры при изменении параметров внешней среды, объясняет биотическую компенсацию приносимых в него техногенных субстанций вещества и энергии за счет самоорганизации (Манжуров, 2002). Отсюда следует, что устойчивость природного объекта, обеспечиваемая самоорганизацией его развития, является первичным качеством, без которого он неизбежно погибает (Розенберг, 2018). В условиях техногенеза только сложноорганизованные природные объекты способны к самоорганизации за счет масштабно-инвариантной перестройки своей структуры (Насонов, Цветков, 2018).

В соответствии с принципом толерантности нарушение самоорганизации при-

родного объекта происходит в случае, когда значения системных показателей достигают лимитирующих значений, а именно:

- дефицита факторов, при котором объекту не хватает ресурсов для выживания в среде (показатель предельно низкого метаболизма, равносильного отсутствию обратной связи экосистемы с внешней средой);

- избыточности факторов, когда объект не успевает адаптироваться к частым изменениям внешней среды (показатель предельно высокого метаболизма с внешней средой, приводящего к нарушению функциональной целостности экосистемы) (Насонов и др., 2019).

В моделировании и анализе динамики сложноорганизованных техно-природных объектов ключевым атрибутом выступает их самоорганизация как компенсаторный био-

тический механизм внешних возмущений, который выстраивается на двух типах конкурирующих процессов: одни обеспечивают самосохранение системы, закрепляют ее строение и функциональные особенности за счет действия биотических факторов, другие обеспечивают развитие системы за счет действия техногенных факторов. Благодаря масштабно-инвариантной перестройке структуры экосистема имеет возможность балансировать эти процессы в обновляющейся среде существования (Иудин, Копосов, 2010).

С учетом принципа толерантности экосистемы уравнение самоорганизации техно-природных процессов задается соотношениями:

$$H(t) = \sum_{t=1}^n (\alpha_t F_1) + \beta t F_2, \quad [2]$$

$$(H_d < H(t) < H_k) \rightarrow (H_0) = 0.5, \quad [3]$$

где $H(t)$ – динамика метаболизма экосистемы в пределах лимитирующих факторов, измеренных в шкале показателя Херста; (H_0) – состояние экологического оптимума; H_d – состояние дефицита факторов; H_k – состояние избыточности факторов; $\sum_{t=1}^n (\alpha_t F_1)$ – возмущающие техногенные факторы; $\beta t F_2$ – компенсирующие возмущение биотические факторы; $(\alpha_t; \beta t)$ – весовые коэффициенты соответствующих факторов.

Уравнение самоорганизации говорит о том, что в устойчивой экосистеме после снятия нагрузки ее состояния всегда обратимы за счет действия биотического фактора. При этом соотношение [2] определяет состояние сбалансированности техно-природных процессов относительно экологического оптимума (H_0), а соотношение [3] определяет область устойчивости экосистемы и направленность процессов (рис. 3).

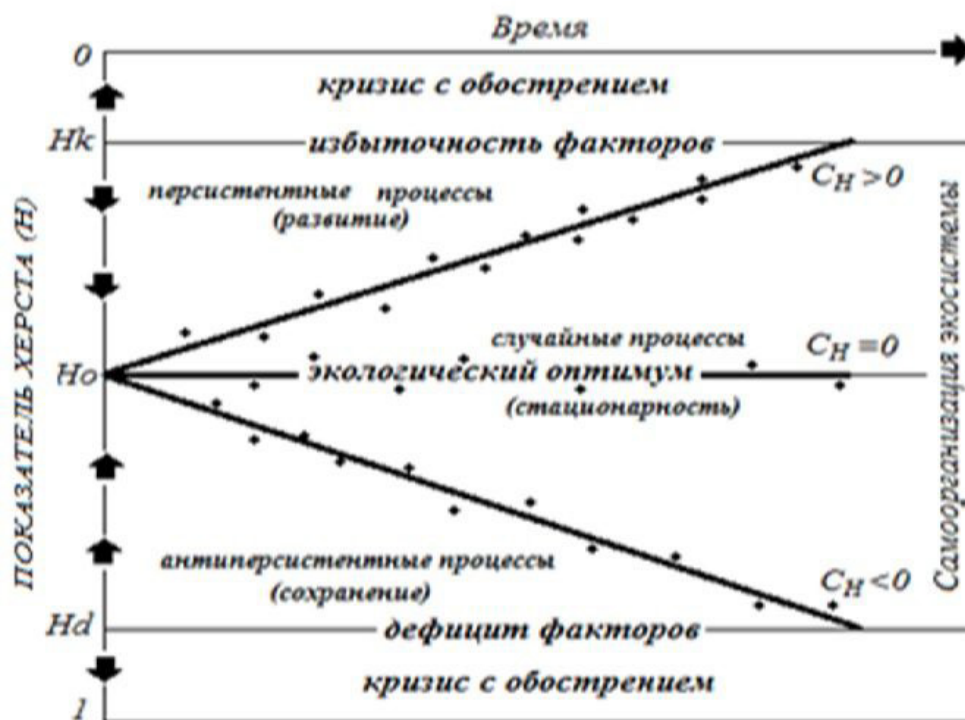


Рис. 3. Тренды метаболизма экосистемы. Стрелками на оси ординат обозначена направленность техно-природных процессов (Кульнев и др., 2020)

Fig. 3. Trends in ecosystem metabolism. The arrows on the ordinate axis indicate the orientation of techno-natural processes (Kulnev et al., 2020)

Очевидно, что аппроксимация полученной статистики фрактальных показателей дает тренд смещения развития овса от экологического оптимума, вызванного нарушением процессов техно-природного обмена, которое тем больше, чем выше загрязнение

почвы. При этом корреляция процессов, определяющая самоорганизацию параметров овса, задается соотношением:

$$C_H = 2^{H-1} - 1. \quad [4]$$

Корреляция процессов [4] происходит в

пределах устойчивого развития экосистемы, которая нарушается в точках H_k , H_d , когда они переходят в неустойчивое равновесие со средой, а их рост сменяется деградацией (Насонов и др., 2019).

В статистическом плане принципиальным отличием применяемых нами фрактальных

моделей является их большая информативность в сравнении с традиционно используемыми линейными детерминированными и случайными гауссовскими распределениями, являющимися частными случаями фрактальных моделей с показателями Херста $H = 1$ и $H = 1/2$ соответственно (рис. 4).

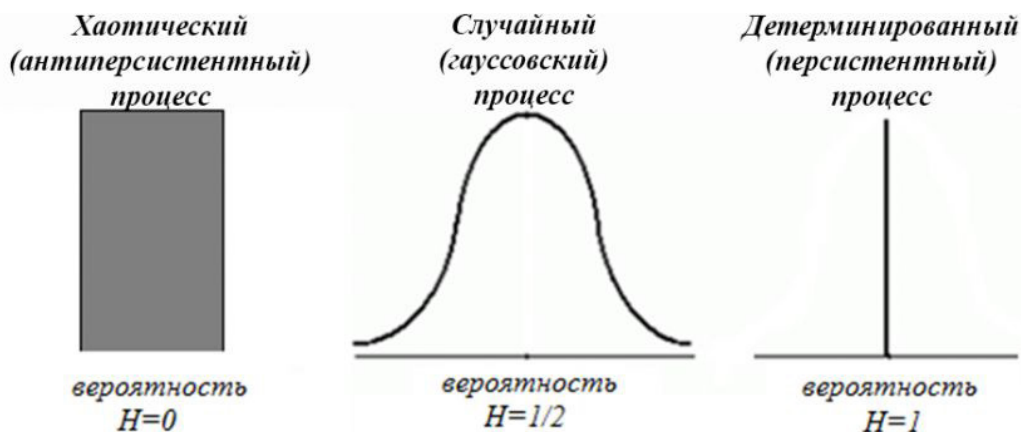


Рис. 4. Распределение вероятности статистических событий при различных значениях постоянной Херста (H)

Fig. 4. Probability distribution of of statistical events at different values of Hearst constant (H)

Поскольку случайные (гауссовские) процессы в шкале показателя Херста имеют параметры $C_H = 0; H = H_0 = 1/2$. (Подлазов, 2005), то такой режим трактуется нами как экологический оптимум, обеспечивающий устойчивость обменных взаимодействий природного объекта с внешней средой.

Динамические смещения статистических значений от экологического оптимума к показателю $H = H_k$ при $C_H > 0$ увеличивают вероятность развития детерминированных (трендоустойчивых) процессов, обуславливающих развитие природного объекта. И наоборот, приближение статистических значений к показателю $H = H_d$ при $C_H < 0$ увеличивает вероятность развития хаотических процессов со знакопеременным трендом, обуславливающих самосохранение природного объекта.

Если в динамике происходит резкое упрощение состояний экосистемы $H_k \Rightarrow H_d$, то наступает истощение (дефицит) ресурса экосистемы. Вероятностное наступление такого события говорит о том, что экосистема перешла в неустойчивое равновесие со средой и уже не может регулировать свое состояние. При этом резко возрастает роль случайностей в развитии кризисных процессов.

Методы

Схема эксперимента и обработка полученных статистических данных для верифи-

кации уравнения самоорганизации овса в различных образцах почв состояла в реализации следующих этапов:

1. В различных районах Москвы (Лосиный остров, Фестивальная ул., Лермонтовский пр-т) были отобраны пробы почвы для проращивания заранее подготовленных семян овса (рис. 5). В качестве модельных тест-растений были использованы семена Овса посевного (*Avéna satíva* L.).

2. Проращивание семян *Avéna satíva* L. на отобранных образцах почв производилось в течение 10 дней с ежедневной фотофиксацией образцов (рис. 6).

Важным обстоятельством является обеспечение для всех экспериментальных образцов одинаковых абиотических факторов: времени освещения, комнатной температуры 24 °C, ежедневного полива образцов 20 мл. Это необходимо для выделения влияния техногенного фактора, обусловленного наличием поллютантов в почвах.

3. Расчет фрактальных размерностей D по изображениям проростков овса через свободно распространяемую программу «Gwyddion» и построение графиков динамики фрактальных показателей в шкале постоянной Херста (рис. 7).

Результаты

В основе способа расчета фрактальной размерности, используемого в програм-

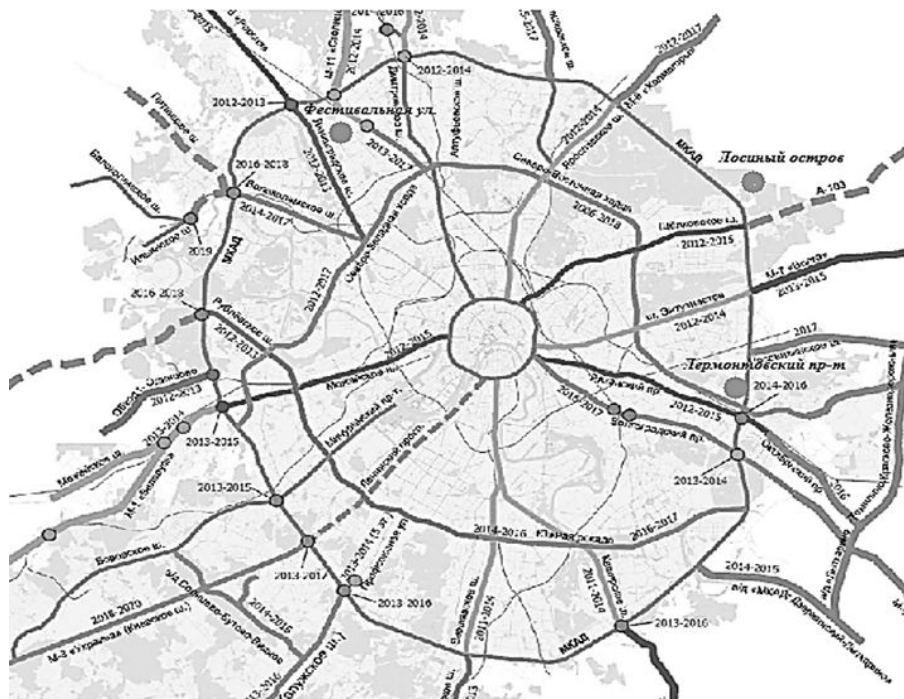


Рис. 5. Места отбора проб почв для проращивания овса
Fig. 5. Soil sampling sites for oat germination

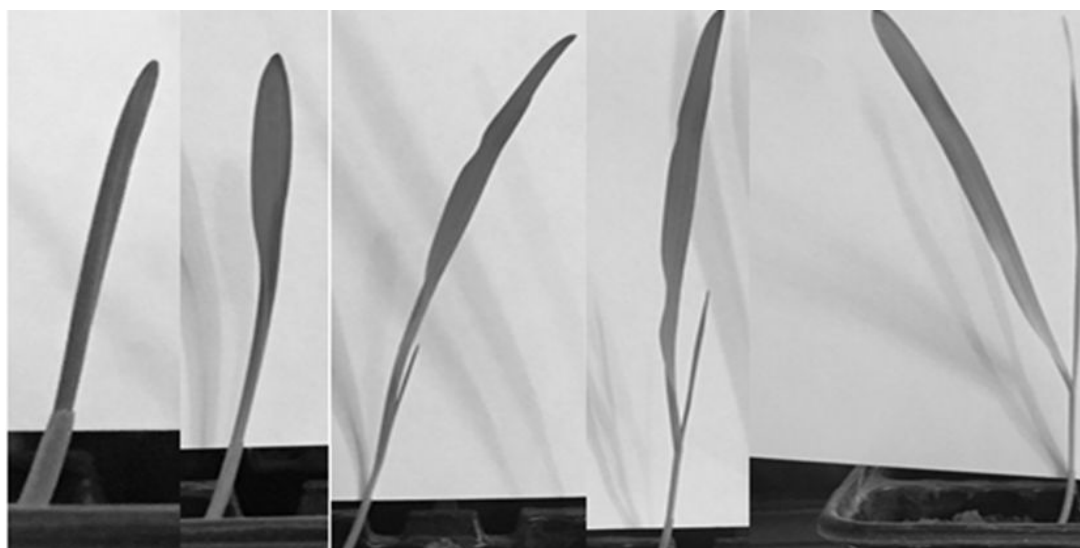


Рис. 6. Динамика проростков овса на отобранных пробах почв
Fig. 6. Dynamics of oats sprouts on selected soil samples

ме «Gwyddion», лежит наиболее распространенный клеточный метод: квадратная решетка с постоянной (δ) накладывается на поверхность изображения. Изначально (δ) задается равной $X/2$ (где X – это длина края поверхности). Тогда $N(\delta)$ – число всех квадратов, содержащих хотя бы один пиксель изображения. Постоянная решетки на каждом шаге уменьшается в два раза, и процесс повторяется до тех пор, пока (δ) не станет равной расстоянию между двумя соседними пикселями. Наклон аппроксимиру-

ющей прямой, выделяющий область скейлинга (область масштабов, в которых объект сохраняет самоподобие), позволяет определить фрактальную размерность D (Терехов, 2011).

Применительно к изображению проростков овса этот метод основан на подсчете числа квадратов, покрывающих его изображение:

$$\text{Log}N(\delta) = -D\text{Log}(\delta), \quad [5]$$

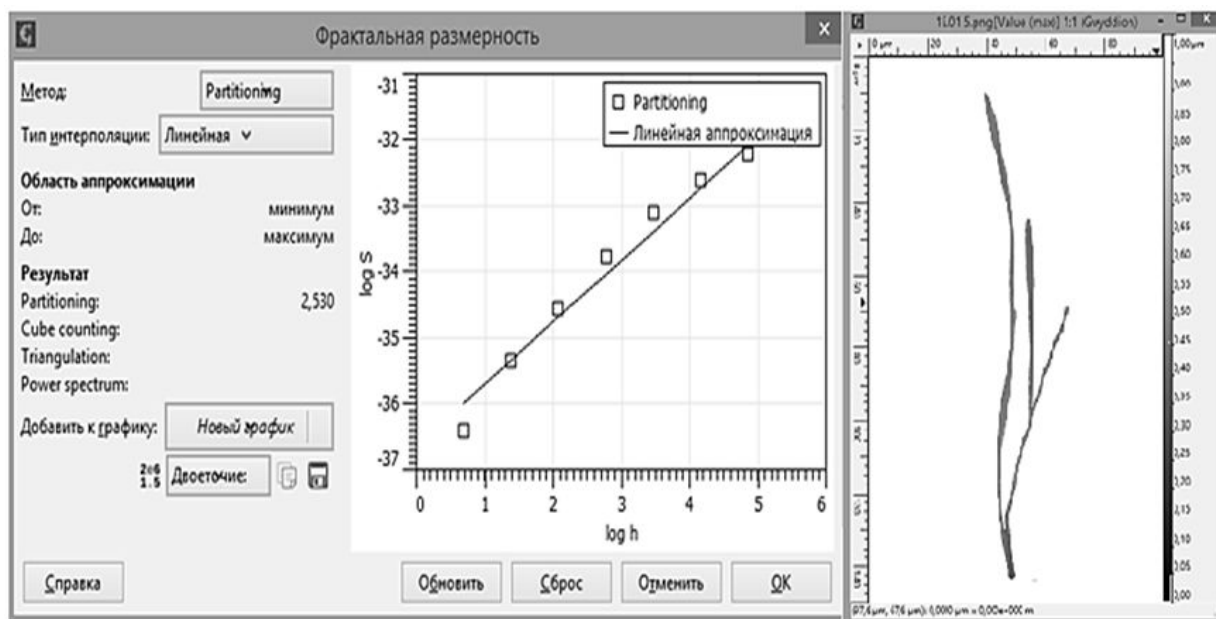


Рис. 7. Интерфейс программы «Gwyddion»

Fig. 7. Gwyddion Interface

где D – фрактальная размерность; $N(\delta)$ – число квадратов, покрывающих изображение проростков овса; (δ) – варьируемый масштаб решетки покрытия.

Для нашего случая уравнение самоорганизации динамики роста овса, определяемое корреляцией процессов действующих факторов [2], задается уравнением тренда:

$$\text{Log}N(\delta) = -D\text{Log}(\delta), \quad [6]$$

где $\alpha; \beta$ – весовые коэффициенты действующих факторов (техногенных и биотических).

В нашем эксперименте мы анализируем прямое влияние загрязнений почв на адаптационные возможности овса посевного (*Avena sativa* L.) и по характеру этого влияния делаем вывод о способности почв (при прочих благоприятных условиях) поддержи-

вать сложившееся биоразнообразие. Решение таких задач в настоящее время входит в проблему формирования экологического каркаса территории (Манжуров, 2002).

Обсуждение

4. На основании расчетных статистических динамик геометрических параметров проростков овса строим тренды смещений от экологического оптимума и по характеру их направленности и весовым коэффициентам делаем формальную оценку влияний загрязнения почв на развитие биотеста.

Для почвы, отобранной на Лосином острове, функция фрактальных показателей для овса имеет вид:

$$H(t) = 0.003t + 1.41. \quad [7]$$

Соответствующий график функции [7] изображен на рис. 8.

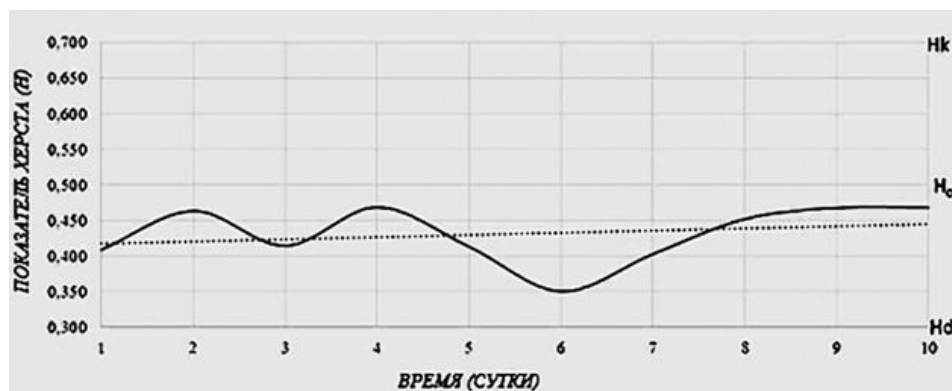


Рис. 8. Динамика фрактальных показателей биоиндикатора для почвы, отобранной на Лосином острове

Fig. 8. Dynamics of fractal parameters of the test object for the soil selected on Losiny Island

Характер динамики тренда говорит о том, что здесь мы имеем наименее загрязненную из всех образцов почву, практически не влияющую на динамику развития проростков овса, поскольку обменные процессы имеют слабо выраженную тенденцию приближения к экологическому оптимуму, а адаптационный процесс проходит в пределах устойчивости.

Более выраженная реакция тест-объекта на загрязнения почвы наблюдается на Фестивальной улице, для образцов которых уравнение динамики фрактальных показате-

телей имеет вид:

$$H(t) = 0.016t + 1.30. \quad [8]$$

Характер динамики аппроксимирующего тренда уравнения [8] говорит о том, что здесь среда развития овса оказывается менее благоприятна, чем на Лосином острове, что может быть следствием наличия в таких почвах более токсичных поллютантов. Однако образец демонстрирует стабилизацию процесса к концу эксперимента, что не свидетельствует о критичности загрязнений (рис. 9).

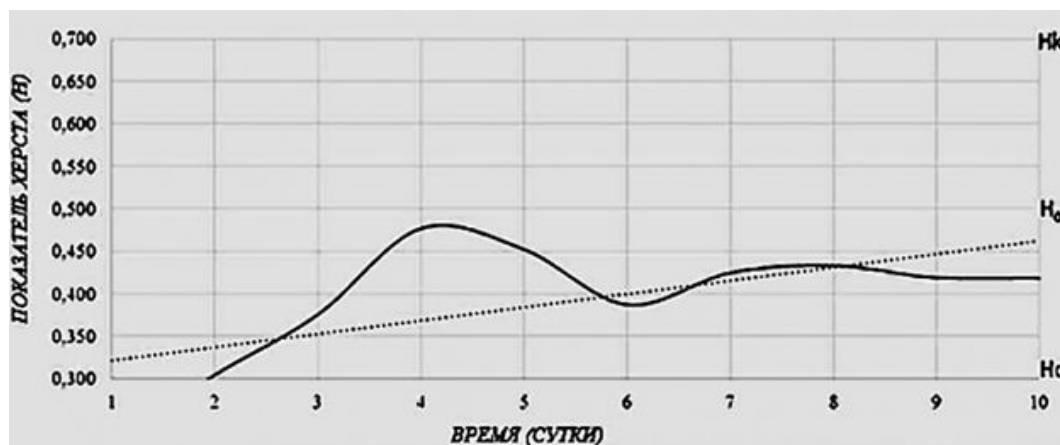


Рис. 9. Динамика самоорганизации биоиндикатора для почвы, отобранной на ул. Фестивальной
Fig. 9. Dynamics of self-organization of the test object for the soil selected on Festival Street

Наиболее загрязненная почва, оказывающая слабо выраженный отрицательный эффект на развитие *Аvena sativa* L., отмечается для образцов почв, отобранных на Лермонтовском проспекте (рис. 10). Здесь уравнение самоорганизации имеет вид

$$H(t) = -0.002t + 1.42. \quad [9]$$

Слабо выраженная направленность тренда к показателю $H = H_d$ говорит о том, что

процессы стабилизации тест-объекта незначительно преобладают над процессами его развития. Однако, находясь в области знакопеременных трендов, ситуация, скорее всего, придет к стабилизации за более длительный промежуток времени, чем время эксперимента. Поэтому с точки зрения критичности загрязнения почвы ситуация здесь равнозначна ситуации на ул. Фестивальной.

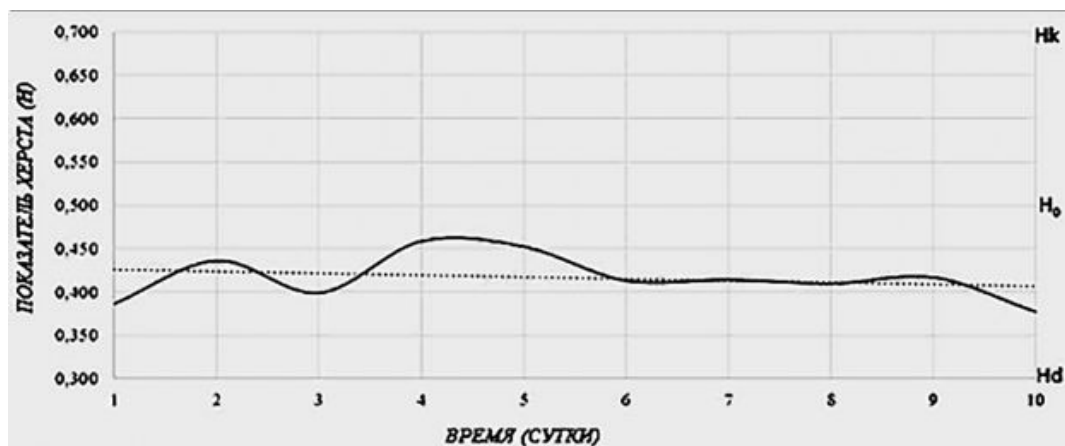


Рис. 10. Динамика самоорганизации тест-объекта для почвы, отобранной на Лермонтовском проспекте
Fig. 10. Dynamics of self-organization of the test object for the soil selected on Lermontovsky Avenue

Результаты эксперимента наглядно демонстрируют прямое влияние загрязнений почв на адаптационные возможности тест-объекта, по характеру влияния которых можно делать вывод об их способности (при прочих благоприятных условиях) поддерживать необходимое биоразнообразие, что наиболее актуально в условиях техногенной нагруженности территорий.

Заключение

Результаты полностью соотносятся с местами отбора проб почв. Лосиный остров относится к особо охраняемым природным территориям (национальный парк), наименее подверженным техногенному загрязнению. Территории, относящиеся к Фестивальной улице и Лермонтовскому проспекту, демонстрируют более загрязненные почвы, однако ситуация на них далека от критической. Показателен факт, что на почвах, ото-

бранных на границе Лосиногостинского острова, примыкающей к автодороге и жилому сектору, ситуация по загрязнению почвы оказалась равнозначна Фестивальной улице.

Описанный метод может также эффективно использоваться при мониторинге загрязнения почв, а при дополнении – в уточнении границ санитарно-защитных зон через распределения плотности поверхностных загрязнений почв от стационарных и передвижных источников (Манжуров, 2002).

Таким образом, мы получаем возможность оценки влияния и классификации загрязнений почв урбанизированных территорий по характеру самоорганизации динамики развития тест-объекта. Это становится возможным благодаря определению структурных параметров биологических объектов в динамике, которые дают основу для разработки новых малозатратных и более информативных методов биотестирования.

Библиография

- Баландина Л. П., Шабанова А. В. Опыт оценки качества рекультивации нефтезагрязненных почв методом биотестирования // Экология и промышленность России. Т. 11. № 11. М.: Калвис, 2007. С. 46–47.
- Жукова Л. А. Экологические шкалы и методы анализа экологического разнообразия растений : Монография. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского ун-та, 2010. 368 с.
- Иудин Д. И., Копосов Е. В. Фракталы: от простого к сложному : Монография. Н. Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2012. 200 с.
- Кульнев В. В., Насонов А. Н., Жогин И. М., Цветков И. В., Грабарник В. Е., Карелин Н. В. Об опыте проведения управляемой альгоремедиации рекреационного водоема // Экология и промышленность России. Т. 24. № 3. М.: Калвис, 2020. С. 58–64. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-3-58-64.
- Манжуров И. Л. Фрактальная модель распределения плотности поверхностных загрязнений : Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2002. 24 с.
- Молчатский С. Л., Казанцев И. В., Матвеева Т. Б. Применение метода фрактального анализа для биоиндикационной оценки состояния окружающей среды . // Самарский научный вестник. 2016. № 4 (17). С. 28–31.
- Насонов А. Н., Цветков И. В. Особенности управления развитием техно-природных процессов на основе мультифрактальной динамики // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2018: Труды одиннадцатой Международной конференции: В 3 т. / Под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. М.: Изд-во ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова, 2018. С. 83–88.
- Насонов А. Н., Кульнев В. В., Графкина М. В. Моделирование динамики и прогноза экологических состояний воздушной среды селитебных территорий // Экология и развитие общества. 2019. № 2 (29). С. 56–64.
- Насонов А. Н., Цветков И. В., Кизеев А. Н., Кульнев В. В., Мартынов Д. Ю., Сметанин В. И. Применение фрактального анализа в лихеноиндикации загрязнения атмосферного воздуха техногенно нагруженных территорий // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 3. С. 34–38. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-34-38.
- Насонов А. Н., Цветков И. В., Жогин И. М., Кульнев В. В., Репина Е. М., Кирилов С. Л., Звягинцева А. В., Базарский О. В. Фракталы в науках о Земле : Учеб. пособие. Воронеж: Ковчег, 2018. 82 с.
- Пестова О. А., Чупахина А. И. Биотестирование почв с помощью микроорганизмов // Декада экологии: Материалы XI Международного конкурса. Омск, 2017. С. 39–43.
- Подлазов А. В. Будущее прикладной математики: Лекции для молодых исследователей . М.: Эдиториал УРСС, 2005. С. 404–426.
- Розенберг Г. С. Фрактальные методы анализа структуры сообществ // Принципы экологии. 2018. № 4. С. 4–43. DOI: 10.15393/j1/art.2018.8406.
- Смирнова Т. С., Челознова К. В., Галкина А. А. Применение червей энхитреид в биодиагностике состояния городских почв // Экологические системы и приборы. 2020. № 2. С. 15–22.

- Терехов С. В. Фракталы и физика подобия . Донецк, 2011. 255 с.
- Benoit B. Mandelbrot, Richard L. Hudson. The (mis) Behavior of Markets. A Fractal View of Risk, Ruin, and Reward. Basic Books, 2017.
- Boularbah A., Schwartz C., Bitton G., Morel J. L. Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils // Chemosphere. 2006. Vol. 63. Issue 5. P. 802–810. DOI: 1016/j.chemosphere.2005.07.079.
- Matthieu N. Bravin, Aurélia M. Michaud, Bourane Larabi. Philippe Hinsinger RHIZOtest: A plant-based biotest to account for rhizosphere processes when assessing copper bioavailability // Environmental Pollution. 2010. Vol. 158. Issue 10. P. 3330–3337. DOI: 1016/j.envpol.2010.07.029.
- Nicolotti G., Egli S. Soil contamination by crude oil: impact on the mycorrhizosphere and on the revegetation potential of forest trees // Environmental Pollution. 1998. Vol. 99. Issue 1. P. 37–43. DOI: 10.1016/S0269-7491(97)00179-6.
- Wyszkowski M., Ziolkowska A. Role of compost, bentonite and calcium oxide in restricting the effect of soil contamination with petrol and diesel oil on plants // Chemosphere. 2009. Vol. 74. Issue 6. P. 860–865. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.10.035.
- Xiufeng Cao, Yufang Song, Jianrong Kai, Xiaoxia Yang, Puhui Ji. Evaluation of EROD and CYP3A4 activities in earthworm *Eisenia fetida* as biomarkers for soil heavy metal contamination // Journal of Hazardous Materials. 2012. Vol. 243. P. 146–151. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.012.

Благодарности

Авторский коллектив выражает глубокую признательность Владимиру Николаевичу Большакову за поддержку и стимул к проведению исследований.

SOIL BIOTESTING BASED ON FRACTAL CHARACTERISTICS OF PLANTS

KUL'NEV
Vadim Vyacheslavovich *PhD, Central Black Earth Interregional Office of the Federal Service for Supervision of Natural Resources, kulneff.vadim@yandex.ru*

NASONOV
Andrey Nikolaevich *PhD, Russian State Agrarian University - K.A. Timiryazev Moscow Academy of Agricultural Sciences, adn22@yandex.ru*

TSVETKOV
Ilya Viktorovich *D.Sc., Tver State University, mancu@mail.ru*

KOROL'
Tatyana Stepanovna *PhD, Russian State Agrarian University - K.A. Timiryazev Moscow Academy of Agricultural Sciences, tskorol@gmail.com*

SHAKHOVSKAYA
Kira Aleksandrovna *Russian State Agrarian University - K.A. Timiryazev Moscow Academy of Agricultural Sciences, sh.kira2014@yandex.ru*

Keywords:
biotesting
limiting factors
Hearst index
soil
pollutants
self-organization
fractal
fractal dimension

Summary: Intense technological impact on the components of the environment once again explains the need for a detailed analysis of interaction between man and nature. Assessment of the degree of environmental pollution can be based on the reaction of biological test objects to external influences, including such as chemical ones, implemented through the flow of a wide range of pollutants from the soil to the vegetative parts of plants. The aim of the study is to develop new models that increase the informativity of soil biotesting by describing self-organization as a transitional process. One of prospective methods for determining soil pollution is a method of biotesting, in which the dynamics of changes in the structural parameters of the test object is evaluated in time (length of germ, development of root system). In this aspect, fractals have proved to be an extremely convenient mathematical tool for describing the dynamics of the development of a natural object in changing environmental conditions, in which a natural object retains its self-similarity, i.e. behaves as a single unite. In contrast to the deterministic approach, which allows us to evaluate only the probability of a crisis state in the development of a plant, the modeling proposed by the authors shows the dynamics and direction of the process: either synthesis or destruction. This feature is a methodological basis for assessing the impact of technogenic pollution of soils on the dynamics of metabolism of the test-object under examination. In this work, the dependence of the fractal characteristics of oat seedlings on the place of its germination and soil was studied. In our case, the fractal parameters allow us to judge the degree of development of the plant and how favorable the external conditions are for its growth

Received on: 18 May 2020

Published on: 27 December 2020

References

- Balandina L. P. Shabanova A. V. Experience in assessing the quality of reclamation of oil-contaminated soils using bio-testing method, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. T. 11. No. 11. M.: Kalvis, 2007. P. 46–47.
- Benoit B. Mandelbrot, Richard L. Hudson. The (mis) Behavior of Markets. A Fractal View of Risk, Ruin, and Reward. Basic Books, 2017.
- Boularbah A., Schwartz C., Bitton G., Morel J. L. Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils, *Chemosphere*. 2006. Vol. 63. Issue 5. P. 802–810. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.07.079.
- Iudin D. I. Koposov E. V. Fractals: from simple to complex: Monografiya. N. Novgorod: Izd-vo NNGASU,

2012. 200 p.
- Kul'nev V. V. Nasonov A. N. Zhogin I. M. Cvetkov I. V. Grabarnik V. E. Karelin N. V. On the experience of managed algoremediation of a recreational pond, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. T. 24. No. 3. M.: Kalvis, 2020. P. 58–64. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-3-58-64.
- Manzhurov I. L. Fractal model of surface contamination density distribution: Avtoref. dip. ... kand. fiz, mat. nauk. Ekaterinburg, 2002. 24 p.
- Matthieu N. Bravin, Aurélie M. Michaud, Bourane Larabi. Philippe Hinsinger RHIZOtest: A plant-based biotest to account for rhizosphere processes when assessing copper bioavailability, *Environmental Pollution*. 2010. Vol. 158. Issue 10. P. 3330–3337. DOI: 10.1016/j.envpol.2010.07.029.
- Molchatskiy S. L. Kazancev I. V. Matveeva T. B. Application of the fractal analysis method for bioindication environmental assessment., *Samarskiy nauchnyy vestnik*. 2016. No. 4 (17). P. 28–31.
- Nasonov A. N. Cvetkov I. V. Kizeev A. N. Kul'nev V. V. Martynov D. Yu. Smetanin V. I. Application of fractal analysis in lichenoid indication of atmospheric air pollution of anthropogenically loaded territories, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019. T. 23. No. 3. P. 34–38. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-34-38.
- Nasonov A. N. Cvetkov I. V. Zhogin I. M. Kul'nev V. V. Repina E. M. Kirnosov S. L. Zvyaginceva A. V. Bazarskiy O. V. *Fractals in Earth Sciences: Ucheb. posobie*. Voronezh: Kovcheg, 2018. 82 p.
- Nasonov A. N. Cvetkov I. V. Peculiarities of management of technological processes development based on multifractal dynamics, *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem MLSD'2018: Trudy odinnadcatoy Mezhdunarodnoy konferencii: V 3 t., Pod obsch. red. P. N. Vasil'eva, A. D. Cvirikuna*. M.: Izd-vo IPU RAN im. V. A. Trapeznikova, 2018. P. 83–88.
- Nasonov A. N. Kul'nev V. V. Grafkina M. V. Simulation of dynamics and forecast of ecological conditions of the air environment in residential areas, *Ekologiya i razvitie obschestva*. 2019. No. 2 (29). P. 56–64.
- Nicolotti G., Egli S. Soil contamination by crude oil: impact on the mycorrhizosphere and on the revegetation potential of forest trees, *Environmental Pollution*. 1998. Vol. 99. Issue 1. P. 37–43. DOI: 10.1016/S0269-7491(97)00179-6.
- Pestova O. A. Chupahina A. I. Soil biotesting with microorganisms, *Dekada ekologii: Materialy XI Mezhdunarodnogo konkursa*. Omsk, 2017. P. 39–43.
- Podlazov A. V. The future of applied mathematics: Lectures for young researchers. M.: Editorial URSS, 2005. P. 404–426.
- Rozenberg G. S. Fractal methods for community structure analysis, *Principy ekologii*. 2018. No. 4. P. 4–43. DOI: 10.15393/j1/art.2018.8406.
- Smirnova T. S. Cheloznova K. V. Galkina A. A. Application of enchytraeid worms in biodiagnostics of urban soil conditions, *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2020. No. 2. P. 15–22.
- Terehov S. V. Fractals and similarity physics. Doneck, 2011. 255 p.
- Wyszkowski M., Ziolkowska A. Role of compost, bentonite and calcium oxide in restricting the effect of soil contamination with petrol and diesel oil on plants, *Chemosphere*. 2009. Vol. 74. Issue 6. P. 860–865. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.10.035.
- Xiufeng Cao, Yufang Song, Jianrong Kai, Xiaoxia Yang, Puhui Ji. Evaluation of EROD and CYP3A4 activities in earthworm *Eisenia fetida* as biomarkers for soil heavy metal contamination, *Journal of Hazardous Materials*. 2012. Vol. 243. P. 146–151. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.012.
- Zhukova L. A. Ecological scales and methods of analysis of plant ecological diversity: Monografiya. Yoshkar-Ola: Izd-vo Mariyskogo un-ta, 2010. 368 p.



УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЕЙ ИЗ ИЛОВ СТОЧНЫХ ВОД НА РОСТ РАСТЕНИЙ, ПОЧВЕННЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ И СОДЕРЖАНИЕ АЗОТА В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ

РЯЗАНОВ
Станислав Сергеевич

к. б. н., Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (обособленное подразделение ГНБУ Академия наук Республики Татарстан), erydit@yandex.ru

КУЛАГИНА
Валентина Ивановна

к. б. н., Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (обособленное подразделение ГНБУ Академия наук Республики Татарстан), viksoil@mail.ru

ГРАЧЕВ
Андрей Николаевич

д. тех. н., Казанский национальный исследовательский технологический университет, energolesprom@gmail.com

СУНГАТУЛЛИНА
Люция Мансуровна

Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (обособленное подразделение ГНБУ Академия наук Республики Татарстан), sunlyc@yandex.ru

ЗАБЕЛКИН
Сергей Андреевич

к. тех. н., Казанский национальный исследовательский технологический университет, szabelkin@gmail.com

ШАГИДУЛЛИН
Рифгат Роальдович

д. хим. н., Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (обособленное подразделение ГНБУ Академия наук Республики Татарстан), shagidullin_@mail.ru

Ключевые слова:

биоуголь
биомасса и рост растений
группы микроорганизмов
температура пиролиза
илы сточных вод

Аннотация: Целью данного исследования было оценить воздействие биоугля, полученного из илов сточных вод при разной температуре пиролиза, на высоту и биомассу растений овса и горчицы, а также на микробиологические показатели серой лесной почвы. Биоуголь был получен на установке быстрого пиролиза FPP02 при температуре 300 + 20 °С и 500 + 20 °С. При проведении лабораторного вегетационного опыта в почву вносили 2 %, 5 % и 10 % биоугля от веса почвы. Растения выращивались в течение 42 дней. Высота и биомасса растений горчицы белой увеличились по сравнению с контролем при добавлении 2 % и 5 % биоугля, полученного при 500 °С, и 2 % биоугля, полученного при 300 °С. При внесении в почву 10 % трехсотградусного биоугля продуктивность овса и горчицы снижалась по сравнению с контролем. Внесение биоугля из илов сточных вод способствовало увеличению

содержания валового азота в почве. Численность большинства трофических групп микроорганизмов при внесении в почву биоугля из илов сточных вод возрастала, причем более значительно – при внесении трехсотградусного биоугля. Наибольшая корреляция между концентрацией трехсотградусного биоугля и численностью микроорганизмов наблюдалась для микроскопических грибов, наименьшая – для группы педотрофных микроорганизмов.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Н. П. Бучкина

Рецензент: Е. А. Жарикова

Получена: 03 Февраля 2020 года

Подписана к печати: 26 декабря 2020 года

Введение

Проблема утилизации осадков сточных вод стоит остро во всем мире, в том числе в России. Ориентировочно в Российской Федерации ежегодно производится 2.6 млн т. таких осадков в пересчете на сухое вещество (Плеханова, 2017). Невозможно бесконечно увеличивать площадь полигонов для складирования илов сточных вод, тем более что подобные отстойники являются источником экологических, экономических и социальных проблем. Все это заставляет искать пути безопасного применения и утилизации иловых осадков сточных вод (Кулагина и др., 2018а). Илы сточных вод часто рассматриваются как возможный источник питательных веществ для агроценозов, т. к. они содержат большое количество азота, фосфора, микроэлементов, органических веществ. Однако при внесении в почву необработанных осадков сточных вод существует опасность загрязнения почв и грунтовых вод тяжелыми металлами, патогенной микрофлорой, яйцами гельминтов, дурно пахнущими веществами, которые имеются в составе илов (Рэуце, Кырстя, 1986; Буренков и др., 2016).

Существуют разные методы переработки илов сточных вод: сжигание до золы, компостирование и др. Сжигание до минеральных веществ вносит свой вклад в увеличение содержания парниковых газов в атмосфере и загрязнение воздушного бассейна. Поэтому все более перспективной считается переработка органических отходов в биоуголь путем пиролиза с последующим внесением биоугля в почву (Грачев и др., 2013). При пиролизе илов сточных вод происходит их термическая стерилизация. Полученный таким образом биоуголь обеззаражен и не содержит патогенных микроорганизмов. Биоуголь разлагается очень медленно, не вызывая существенной эмиссии CO_2 в атмосферу. По данным многих исследователей, внесение биоугля в почву способствует уменьшению

эмиссии из почвы и другого парникового газа – закиси азота (Рижия и др., 2015; Krishnakumar et al., 2014; Lehman et al., 2003). Но не все так однозначно. Если биоуголь из остатков древесины в некоторых странах уже разрешается применять даже в органическом земледелии (Major, 2010), то биоуголь из илов сточных вод не считается настолько безопасным. Высокая концентрация тяжелых металлов является существенным препятствием, ограничивающим применение биоугля из илов сточных вод в сельском хозяйстве, хотя многие исследования показывают «капсуляцию» и уменьшение растворимости и доступности тяжелых металлов растениям при определенных режимах термической обработки (Рязанов и др., 2018; Song et al., 2014; Liu et al., 2014; Waqas et al., 2013).

Используя эколого-биологические показатели, основанные на реакции живых организмов (растений и почвенных микроорганизмов) на условия окружающей среды, можно дать интегральную оценку положительного или отрицательного влияния биоугля на свойства почв. Из-за непостоянства состава самих биоуглей, зависящих от исходного сырья и режима термической обработки, разнообразия почв и отличий в потребностях сельскохозяйственных культур, результаты множества проведенных исследований весьма противоречивы.

По данным Song с соавт. (2014), биоуголь из илов сточных вод способствовал увеличению урожайности чеснока. Особенно благоприятное воздействие на растения оказал биоуголь, полученный при температуре 450 °С. Соотношение биоуголь : почва было достаточно высоким – 1 : 4. При этом чеснок, посаженный в почву с добавлением этого вида биоугля, содержал самый низкий уровень тяжелых металлов по сравнению с вариантами опыта, в которых использовался биоуголь, полученный при температуре 400, 500 и 550 °С.

По данным Ábrego с соавт. (2015), изучавших последствия внесения в почву биоугля из илов сточных вод мадридской очистной станции, при дозе биоугля 20 т/га произошло уменьшение биомассы растений кукурузы на 50 % независимо от температуры получения биоугля. Авторы не выявили конкретную причину снижения биомассы, но предположили, что это может быть связано с выщелачиванием тяжелых металлов и органических соединений, а также с выделением токсичных летучих соединений из биоугля.

Исследования Liu с соавт. (2014) показали, что применение биоугля из осадка сточных вод на бесплодных и загрязненных тяжелыми металлами почвах способствовало росту растений и увеличению биомассы пекинской капусты.

Несмотря на то что исследования по применению биоугля в земледелии ведутся во многих странах, в настоящее время накоплено недостаточно информации, чтобы дать однозначный ответ о влиянии биоугля на свойства почв, а впоследствии разработать общие рекомендации по дозам внесения биоугля в почвы разных типов. Важным моментом является разработка таких норм, доз и методик внесения биоугля, которые не оказывали бы негативного воздействия

на почвы и растения, а способствовали улучшению эколого-биологического состояния почв.

Целью данного исследования была оценка воздействия биоуглей из илов сточных вод, полученных при температуре 300 + 20 °С и 500 + 20 °С, в сравнении с биоуглями, полученными из древесины березы, в разных концентрациях при внесении их в почву на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели серых лесных почв.

Материалы

Объектом исследования являлся биоуголь, полученный с применением установки быстрого пиролиза FPP02, которая является запатентованной разработкой компании ООО «Энерголеспром» г. Казань (Патент..., 2009). Производственный комплекс FPP02 предназначен для термохимической переработки и утилизации биомассы и других органических полимерных отходов с получением жидких органических продуктов и мелкодисперсного угля.

Переработка иловых осадков осуществлялась в диапазоне температур 300 ± 20 °С и 500 ± 50 °С. Состав продуктов переработки иловых осадков и древесных отходов при 500 °С представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав продуктов переработки, полученных при пиролизе илов сточных вод и древесных отходов на установке FPP02 при 500 ± 20 °С

Продукт	Иловые осадки	Древесные отходы
Биоуголь	28.57 %	21.46 %
Жидкие продукты	37.30 %	48.98 %
в т. ч. смола	22.38 %	22.04 %
Газ	34.13 %	29.56 %

Твердым продуктом пиролиза является углистый остаток, в данном случае представляющий собой мелкодисперсный черный порошок. Для определения его свойств

были проведены исследования согласно ГОСТ Р 53357-2013. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Свойства биоуглей, полученных при пиролизе илов сточных вод и древесных отходов при температуре 500 ± 20 °С

Свойство	Единицы	Биоуголь из иловых осадков	Биоуголь из древесных остатков
Зольность	%	19.3	2.4
Содержание летучих веществ	%	12.0	25.5
Содержание нелетучего углерода	%	68.7	72.1
Высшая теплота сгорания	кДж/кг	25335	31123

Изучались три вида биоугля: 1) биоуголь из илов сточных вод, полученный при температуре $300 \pm 20^\circ\text{C}$ (SB300); 2) биоуголь из илов сточных вод, полученный при температуре $500 \pm 20^\circ\text{C}$ (SB500); 3) древесный биоуголь из березовых опилок, пиролизированный при температуре $500 \pm 20^\circ\text{C}$ (WB500). Древесный биоуголь использовался в качестве контроля для сравнения биоуглей из осадков сточных вод с экологически чистым и безопасным биоуглем.

Методы

Дизайн эксперимента

Почва для вегетационного эксперимента была отобрана из пахотного горизонта на территории Верхнеуслонского района Республики Татарстан. Согласно классификации почв СССР 1977 г., почва определена как серая лесная. Согласно международной классификации почв – Harpic LUVISOL (World Reference Base..., 2015). Содержание гумуса в почве составляло 4.3 %, pH солевой вытяж-

ки (1N KCl в 1 : 2.5 пропорции по весу) – 5.6. Перед опытом почва была высушена, растерта и просеяна через сито с отверстиями 1 мм.

В вегетационные сосуды помещалось по 400 г смеси почвы и биоугля с содержанием биоугля 2 %, 5 % и 10 % по весу. В качестве контроля использовалась почва без биоугля. В одну половину вегетационных сосудов были высажены семена горчицы белой (*Sinápis álba* L.) по 20 шт. на сосуд, во вторую половину – овса посевного (*Avéna satíva* L.) по 12 шт. на сосуд. После высаживания растений сосуды содержались в вегетационной камере с контролируемой температурой и освещением. Влажность почвы в сосудах поддерживалась на уровне 60 % от полной влагоемкости. Эксперимент был проведен в тройной повторности, что в сумме составило 54 вегетационных сосуда, плюс 6 контрольных сосудов без биоугля (3 с овсом и 3 с горчицей белой) (рис. 1).

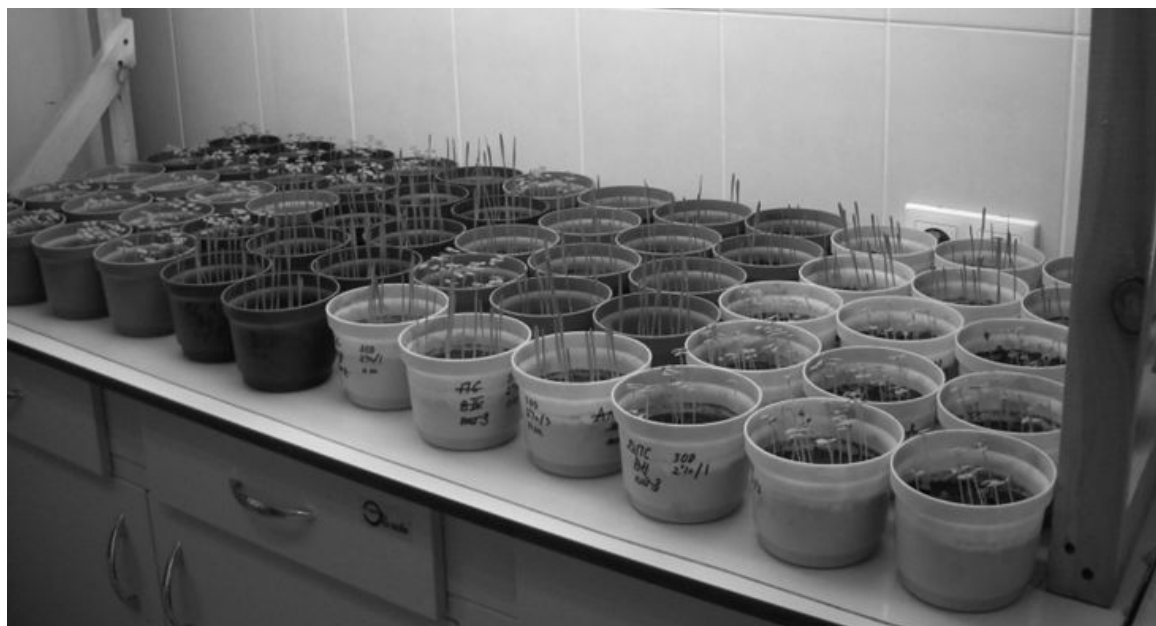


Рис. 1. Вегетационные сосуды с овсом (*Avéna satíva* L.) и горчицей (*Sinápis álba* L.) на 7-й день после посева

Fig. 1. Experimental pots with oat (*Avéna satíva* L.) and white mustard (*Sinápis álba* L.) plants on the 7th day after sowing

Овес посевной и горчица белая были выбраны в качестве тест-объектов, т. к. оба они являются сельскохозяйственными культурами, используемыми в Республике Татарстан. Кроме того, исследования целесообразно проверить как на однодольных, так и двудольных растениях.

Проводили измерения высоты растений и рассчитывали среднюю высоту растений в

каждом сосуде 8 раз, сначала каждый день с момента появления всходов, затем интервал увеличивался. На 14-й день половина растений была срезана для определения сухой биомассы. Оставшиеся растения выращивались до 42-го дня, после чего опыт был завершен. Растения были срезаны, для них также была измерена высота и определена сухая биомасса

Почвенные микроорганизмы и почвенные свойства

На 42-й день опыта из сосудов были отобраны образцы для определения микробиологической деятельности. Для оценки численности культивированных групп микроорганизмов были использованы стандартные методы посева на плотных питательных средах (Теппер и др., 1993):

- мясопептонный агар – для оценки общего микробного числа;
- крахмало-аммиачный агар – для определения числа амилолитических бактерий, утилизирующих минеральный азот, и актиномицетов;
- среда Чапека – для определения числа микроскопических грибов;
- почвенный агар – для культивирования педотрофов.

Численность групп микроорганизмов выражена в колониеобразующих единицах на грамм почвы (КОЕ/г). Направленность микробиологических процессов в почве определяли по коэффициенту минерализации-иммобилизации, рассчитанному как соотношение микроорганизмов-амилолитиков к общему микробному числу (Мишустин, 1956).

Содержание валового азота в почвенных образцах определяли колориметрически после разложения смесью серной и хлорной кислот (Мещеряков, 1963; Аринушкина, 1970).

Результаты

Влияние биоугля на массу растений

Установлено, что воздействие исследованных биоуглей на рост и развитие растений было различным на 14-й и 42-й день опыта. Также были установлены различия между овсом и горчицей по их реакции на внесение биоугля.

Средняя сухая масса одного растения овса на 14-й день опыта в большинстве вариантов не отличалась от контроля (рис. 2а). Исключение составлял только вариант SB500 с дозой внесения биоугля 2 %, оказавший статистически значимое воздействие на увеличение этого показателя.

На 42-й день опыта статистически достоверного воздействия древесного биоугля на среднюю сухую массу одного растения овса не наблюдалось, кроме варианта с 10 % биоугля (рис. 2б), где масса снижалась. Наблюдалась слабая тенденция к увеличению массы одного растения овса на вариантах опыта с внесением 2 % биоугля из илов сточных вод, но она была статистически недостоверна из-за большого различия в полученных данных и высокого стандартного отклонения. С увеличением концентрации любого из исследованных биоуглей до 10 % средняя масса растения овса снижалась. Самая низкая масса наблюдалась при внесении в почву 10 % биоугля SB300. Этот вариант статистически значимо отличается от контроля.

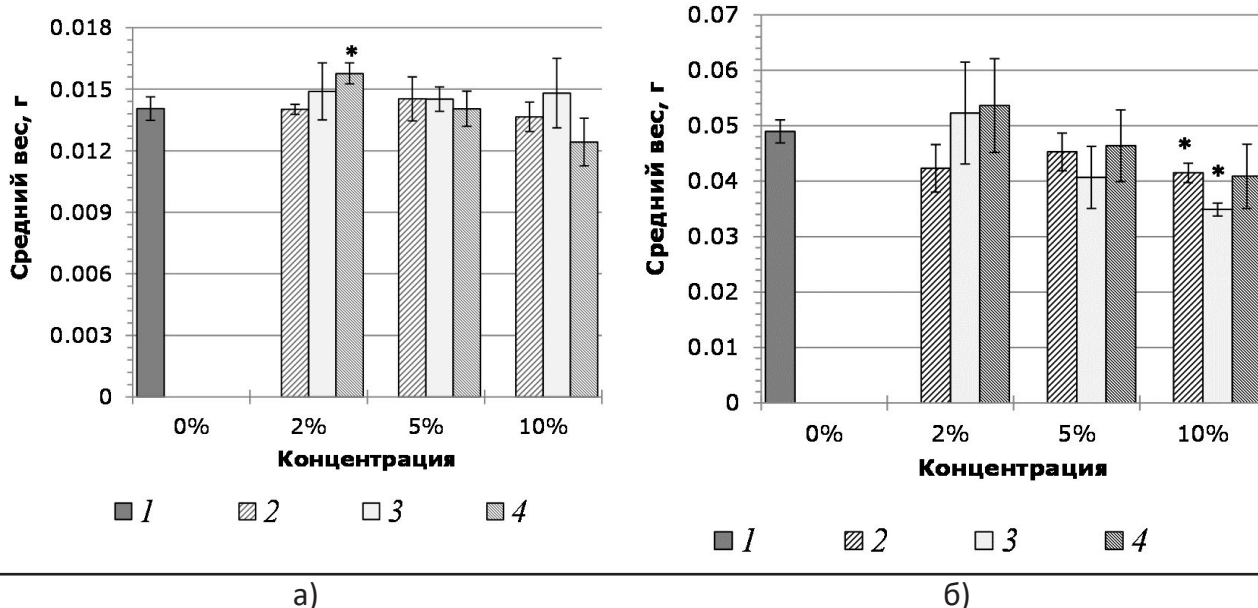


Рис. 2. Средняя сухая масса одного растения овса (*Avena sativa* L.): а) на 14-й день; б) на 42-й день со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. 1 – контроль; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

Fig. 2 Average dry mass of a single oat plant (*Avena sativa* L.): а) on the 14th day of the experiment; б) on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. 1 – control; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

Горчица белая была более чувствительна к внесению биоугля, чем овес. На 14-й день опыта самый высокий стимулирующий эффект на среднюю сухую массу растения горчицы наблюдался при внесении древесного биоугля (рис. 3а). Как показала статистическая обработка результатов, биомасса одного растения на варианте с 2 % WB500 была достоверно выше, чем на контроле. Для остальных вариантов концентрации WB500 также наблюдалась тенденция к увеличению средней сухой массы растения горчицы, но эта разница не была статистически значимой.

Биоуголь SB300 не оказал статистически значимого влияния на среднюю массу растения горчицы на 14-й день опыта при изучаемых вариантах концентрации. Биоуголь SB500 в дозе 2 % и 5 % от веса почвы не оказал статистически значимого воздействия на среднюю массу растения горчицы на 14-й день опыта, а в концентрации 10 % вызывал

снижение средней массы растения горчицы примерно в три раза (см. рис. 3а).

Однако снижение средней массы растения при добавлении SB500 было временным, и на 42-й день опыта именно для биоугля SB500 средняя масса растения горчицы увеличилась наиболее существенно (рис. 3б). При концентрации SB500 10 % средняя масса растения горчицы оказалась выше, чем для двух других видов биоугля, хотя наибольшая стимуляция развития биомассы растений наблюдалась при внесении SB500 в концентрациях 5 % и 2 % от веса почвы. Влияние WB500 на среднюю массу растения горчицы на 42-й день опыта не было отмечено, все варианты с внесением древесного биоугля не отличались от контроля. Наибольшую прибавку массы можно наблюдать при внесении SB300 в концентрации 2 % от веса почвы. Средняя масса одного растения горчицы возросла по сравнению с контролем почти в два раза.

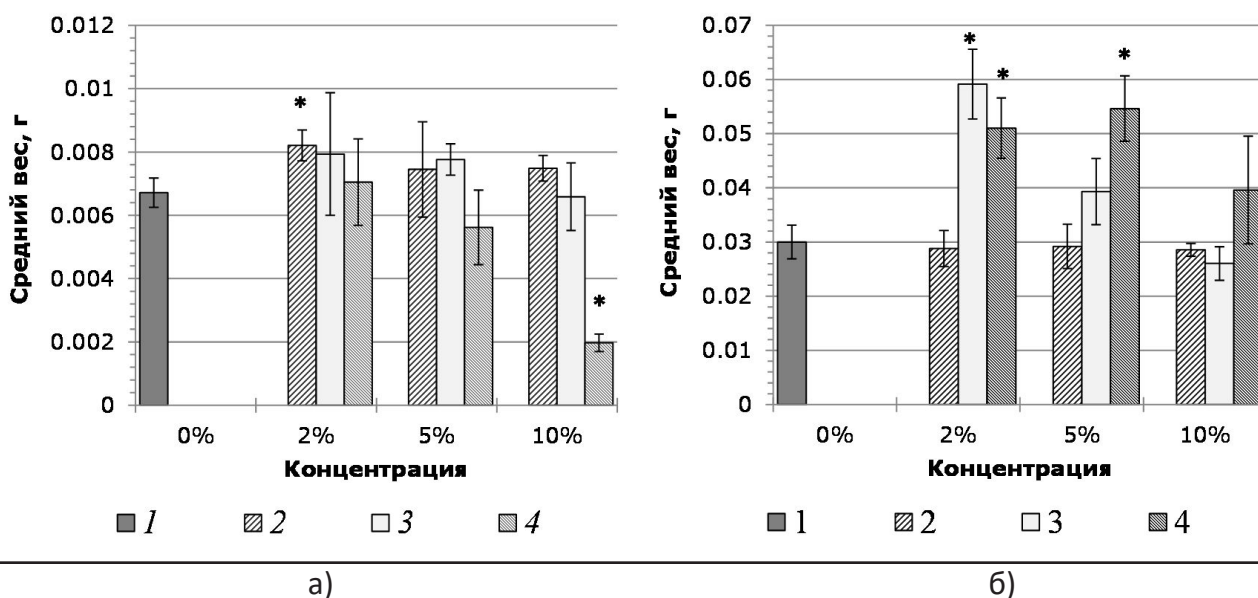


Рис. 3. Средняя сухая масса одного растения горчицы белой (*Sinapis alba* L.): а) на 14-й день; б) на 42-й день со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. 1 – контроль; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

Fig. 3. Average dry mass of a single white mustard plant (*Sinapis alba* L.): а) on the 14th day of the experiment; б) on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. 1 – control; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

Влияние биоугля на высоту растений

На рис. 4 показано изменение высоты растений горчицы с 4-го по 42-й день опыта при внесении SB300 и SB500 в разных дозах. В обоих случаях растения в вариантах с 10 % биоугля отстают в росте от контроля и большинства других вариантов. Однако на 42-й день опыта высота растений в вариантах опыта с внесением SB500 в концентрации 2 % и 5 % была значительно выше контроля.

Для биоугля SB300 стимулирующий эффект был отмечен только при концентрации 2 %.

По показателю высоты растений овес посевной оказался менее чувствителен к внесению биоугля, чем горчица. Высота растений на 42-й день при внесении SB300 и SB500 статистически значимо не отличалась от контроля (рис. 5). На графиках прослеживается тенденция к уменьшению высоты растений овса при внесении 10 % биоугля из илов сточных вод, но она статистически недостоверна.

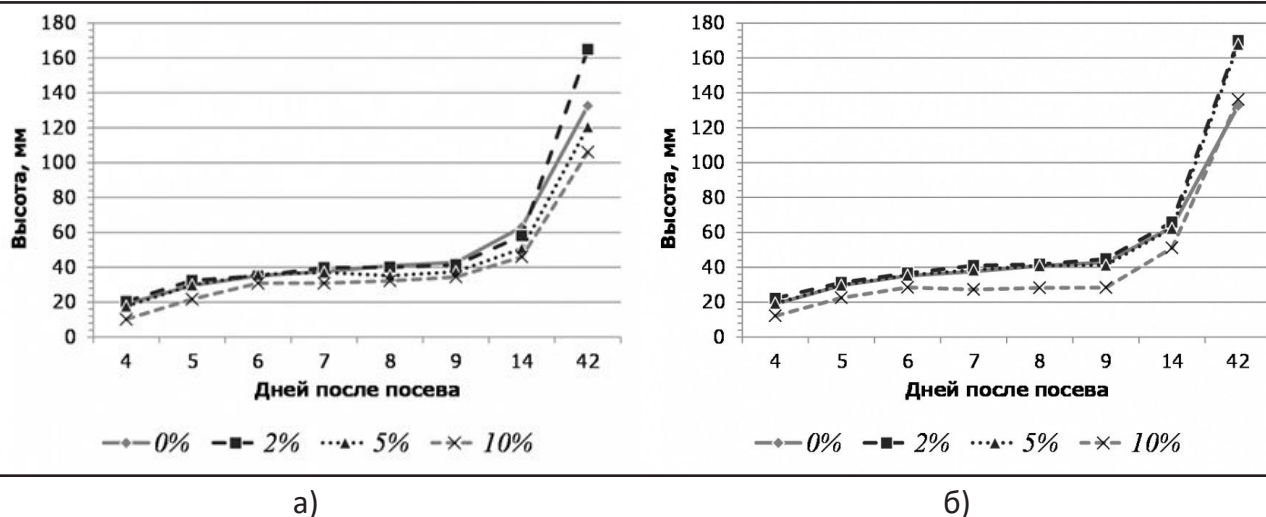


Рис. 4. Динамика высоты растений горчицы (*Sinapis alba* L.) в период с 4-го по 42-й день эксперимента при внесении различных доз биоугля из илов сточных вод: а) SB300; б) SB500

Fig. 4. Dynamics of white mustard (*Sinapis alba* L.) height during the period from 4th to 42nd day when applying different doses of biochar from sewage sludge : а) SB300; б) SB500

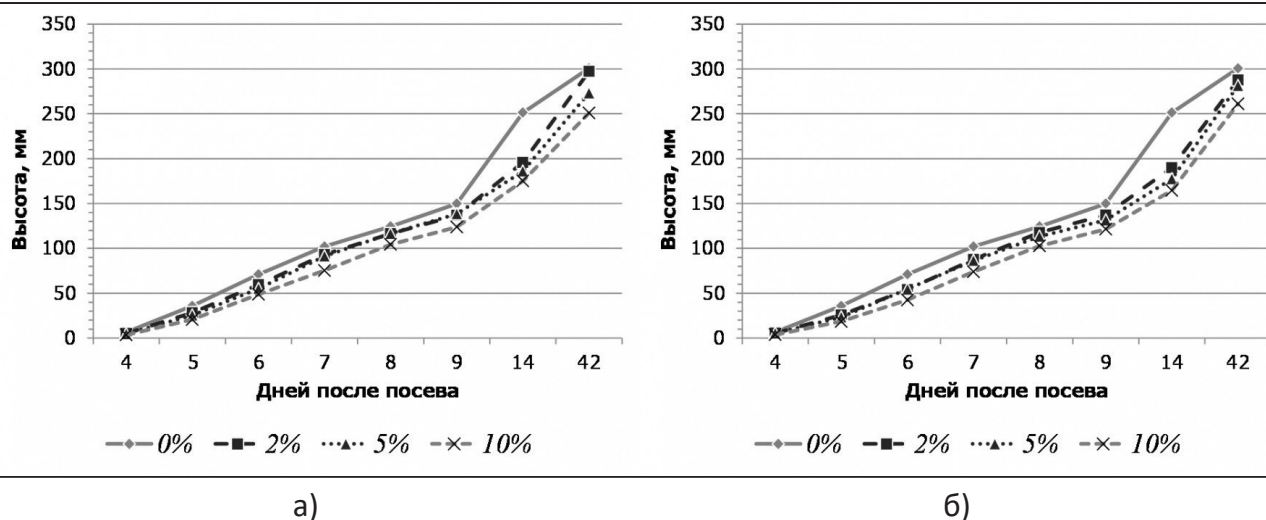


Рис. 5. Динамика высоты растений овса (*Avena sativa* L.) в период с 4-го по 42-й день эксперимента при внесении различных доз биоугля из илов сточных вод: а) SB300; б) SB500

Fig. 5. Dynamics of oat (*Avena sativa* L.) height during the period from 4th to 42nd day when applying different doses of biochar from sewage sludge : а) SB300; б) SB500

В вариантах опыта с внесением древесного биоугля высота растений горчицы и овса не отличалась от контрольных вариантов (данные не приводятся).

Содержание общего азота в почве

Внесение биоугля из илов сточных вод (как SB300, так и SB500) в почву приводит к статистически значимому по сравнению с контролем увеличению содержания в почве общего азота, что не наблюдается при внесении в почву древесного биоугля (рис. 6).

Микробиологические показатели

Согласно полученным данным, общее микробное число увеличивалось с ростом концентрации биоугля из илов сточных вод

(рис. 7). При внесении SB300 максимальная микробиологическая деятельность под посевами горчицы наблюдалась при концентрации угля 5 %, но и разброс данных на этом варианте опыта тоже был самый большой, поэтому разница с контролем была статистически недостоверна. Максимальное абсолютное значение общего микробного числа наблюдалось под посевами овса при внесении 10 % SB300, оно превышало аналогичный показатель в почве без биоугля почти в 20 раз. Статистически значимая разница с контролем наблюдается при внесении 10 % SB300 и SB500 в почву под обе культуры, а также при внесении 5 % SB500 под овес.

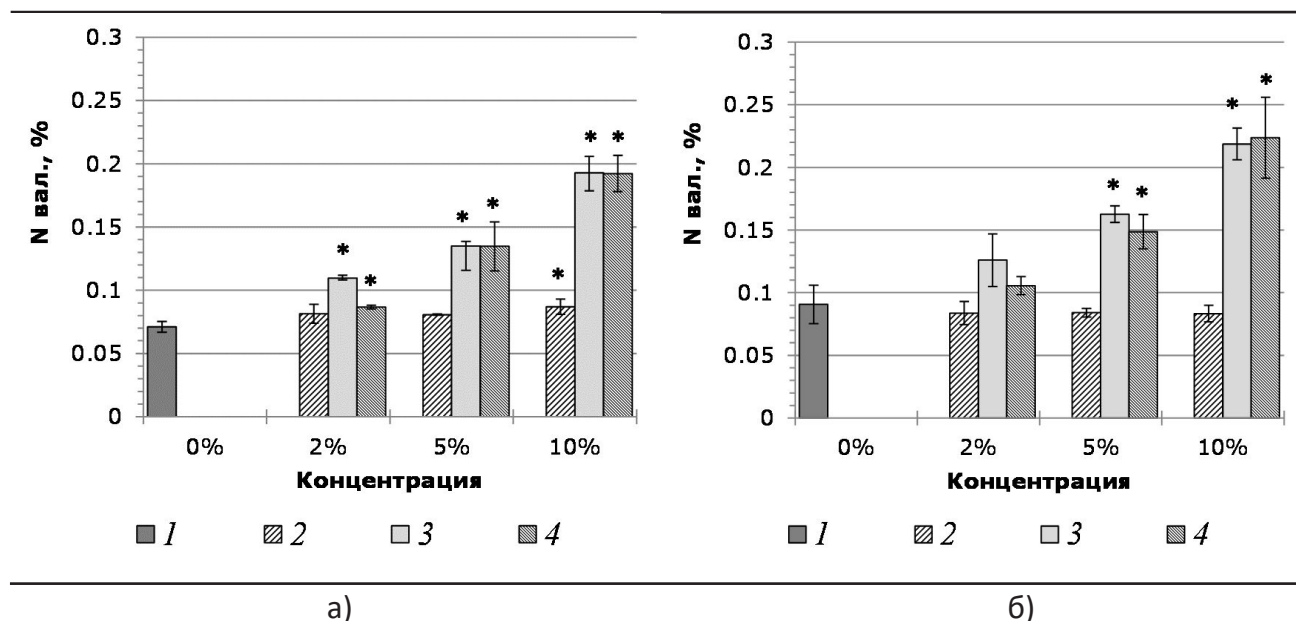


Рис. 6. Валовое содержание азота в почве на 42-й день опыта со стандартными отклонениями: а) горчица (*Sinapis alba* L.); б) овес (*Avena sativa* L.). Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. 1 – контроль; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

Fig. 6. Total nitrogen content in soil on the 42nd day of the experiment with standard deviations: a) white mustard (*Sinapis alba* L.); b) oat (*Avena sativa* L.). Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. 1 – control; 2 – WB500; 3 – SB300; 4 – SB500

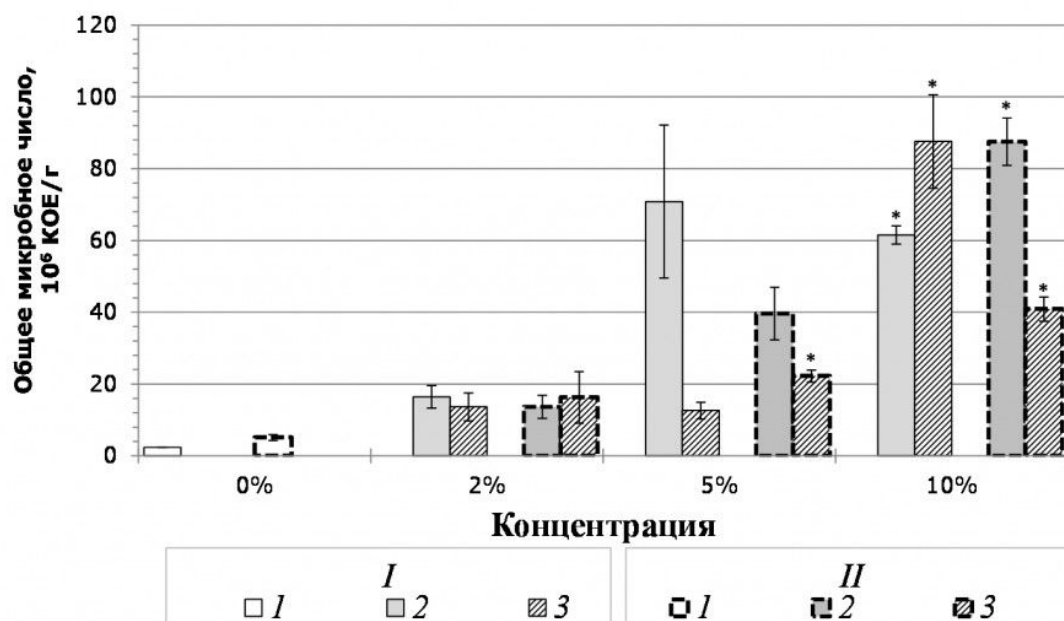


Рис. 7. Общее микробное число на 42-й день опыта со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. I – горчица белая (*Sinapis alba* L.); II – овес посевной (*Avena sativa* L.). 1 – контроль; 2 – SB300; 3 – SB500

Fig. 7. Total microbial number on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. I – white mustard (*Sinapis alba* L.); II – oat (*Avena sativa* L.). 1 – control; 2 – SB300; 3 – SB500

Внесение SB300 и SB500 вызывает увеличение численности амилалитических микроорганизмов, потребляющих минеральные формы азота (посев на крахмал-аммиачном агаре) по сравнению с контролем (рис. 8). Коэффициент корреляции между концен-

трацией биоугля и численностью амилалитических микроорганизмов колебался от 0.54 до 0.88 в зависимости от вида биоугля и выращиваемой культуры (коэффициент корреляции Пирсона при $p < 0.05$). Заметный всплеск численности амилалитических ми-

кроорганизмов наблюдался под посевами горчицы при внесении SB300 в количестве 5 % и 10 % (см. рис. 8). В остальных вариантах численность амилотических микроорганизмов была более чем в два раза ниже.

Хотя статистически значимая разница с контролем наблюдалась не только при внесении SB300 в количестве 5 % и 10 %, но и для других вариантов опыта.

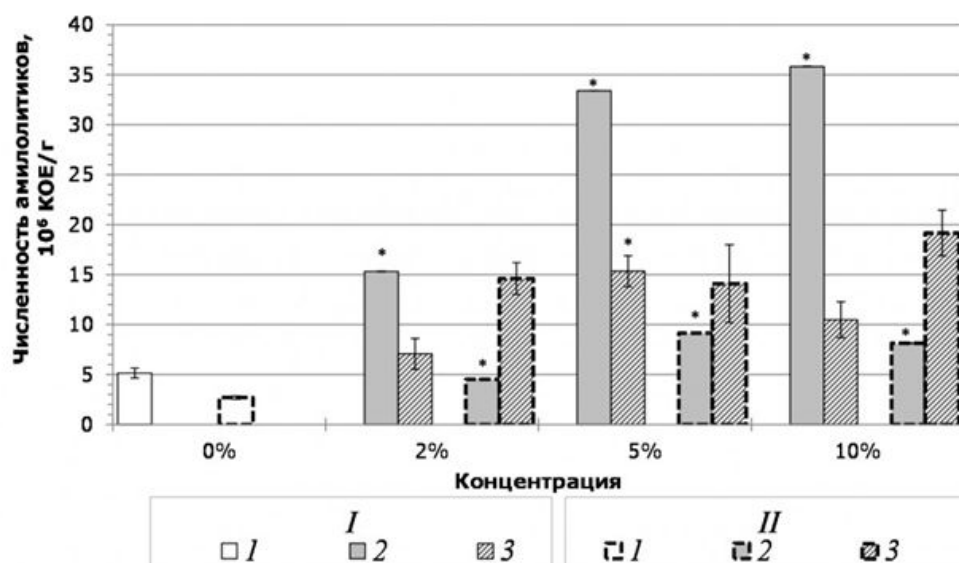


Рис. 8. Численность амилотических бактерий на 42-й день опыта со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. I – горчица белая (*Sinapis alba* L.); II – овес посевной (*Avena sativa* L.). 1 – контроль; 2 – SB300; 3 – SB500

Fig. 8. Number of amylolytic bacteria on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. I – white mustard (*Sinapis alba* L.); II – oat (*Avena sativa* L.). 1 – control; 2 – SB300; 3 – SB500

При внесении в почву биоугля из илов сточных вод численность микромицетов увеличивалась (рис. 9). Коэффициент корреляции между дозой внесения биоугля и численностью микромицетов колебался от 0.82 до 0.99 (коэффициент корреляции Пирсона

при $p < 0.05$) под разными культурами, что говорит о средней и высокой степени зависимости между этими показателями. Статистически значимая разница между вариантами с добавлением биоугля и контролем чаще наблюдалась для SB300.

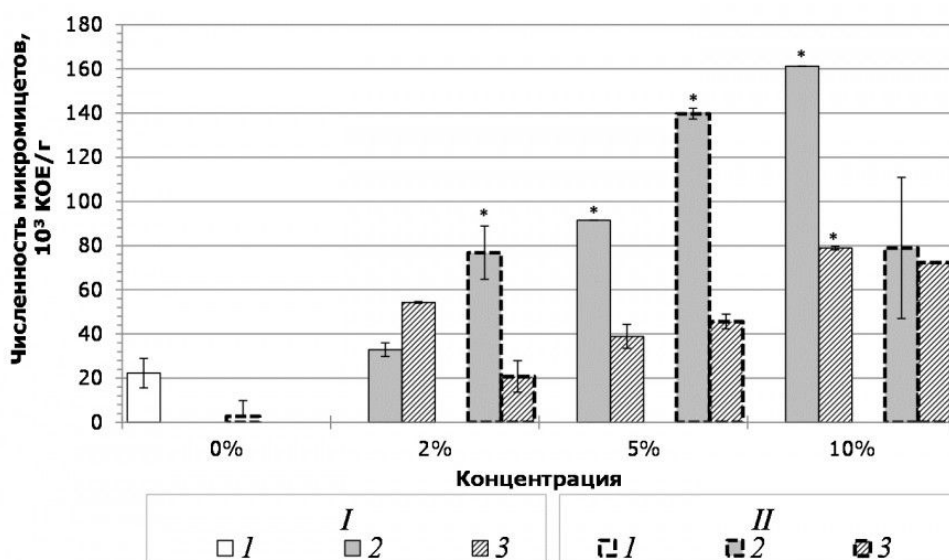


Рис. 9. Численность микромицетов на 42-й день опыта со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. I – горчица белая (*Sinapis alba* L.); II – овес посевной (*Avena sativa* L.). 1 – контроль; 2 – SB300; 3 – SB500

Fig. 9. Number of micromycetes on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. I – white mustard (*Sinapis alba* L.); II – oat (*Avena sativa* L.). 1 – control; 2 – SB300; 3 – SB500

Педотрофы, т. е. микроорганизмы, способные разлагать лабильное органическое вещество, выращенные на почвенном агаре, также показали всплеск численности на вариантах с SB300, однако максимум все же пришелся на низкие концентрации биоугля

(рис. 10). Все варианты с внесением SB300 статистически значимо отличались от контроля, при внесении в почву SB500 статистически значимые отличия наблюдались при больших концентрациях.

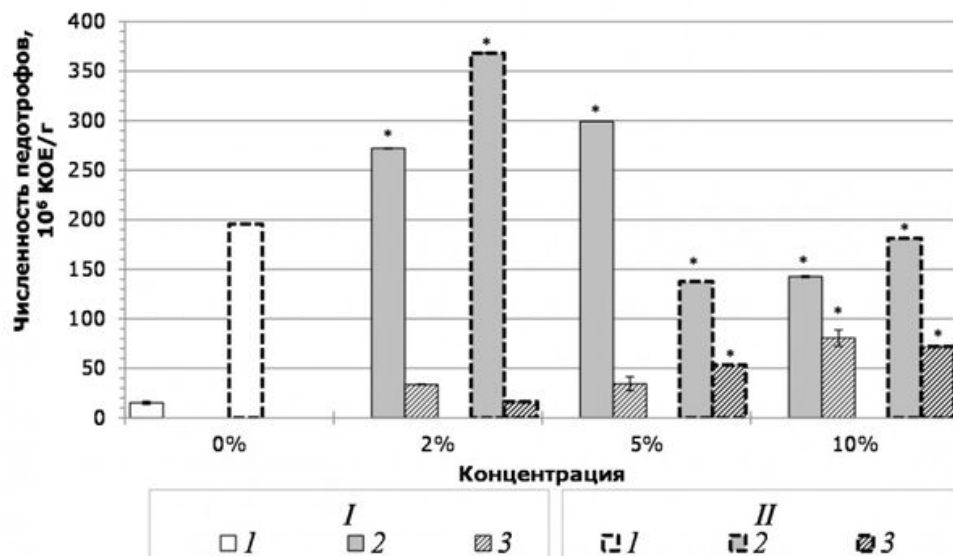


Рис. 10. Численность педотрофов на 42-й день опыта со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. I – горчица белая (*Sinapis alba* L.); II – овес посевной (*Avena sativa* L.). 1 – контроль; 2 – SB300; 3 – SB500

Fig. 10. Number of soil microorganisms on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. I – white mustard (*Sinapis alba* L.); II – oat (*Avena sativa* L.). 1 – control; 2 – SB300; 3 – SB500

Интересно, что наблюдается высокая степень зависимости между концентрацией SB500 и численностью педотрофов (коэффициент корреляции равен 0.95–0.98) и не наблюдается зависимости между концентрацией SB300 и численностью педотрофов (коэффициент корреляции Пирсона равен 0.04–0.17 при $p < 0.05$).

Коэффициент минерализации и иммобилизации по Е. Н. Мишустину (1956) даже без внесения биоугля под горчицей и овсом отличался в 4 раза (рис. 11). При внесении биоугля в почву под горчицей коэффициент уменьшился, под овсом статистически значимых изменений не произошло.

Обсуждение

Биоуголь из древесных остатков считается экологически и биологически чистым и безопасным почвенным мелиорантом (Major, 2010). Наши результаты не противостоят литературным данным, и WB500 не показал какого-либо значительного отрицательного воздействия на биомассу и рост растений, кроме растений овса при концентрации биоугля 10 %. В то же время стимулирование роста растений было довольно

кратковременным, и на 42-й день опыта уже не наблюдалось. Отсутствие отклика растений на добавление древесного биоугля без дополнительных азотных удобрений также отмечалось ранее (Chan et. al., 2007).

Вследствие более высокой зольности и, как следствие, большего содержания как полезных, так и вредных веществ уголь из осадков сточных вод показал более разнобразное воздействие на исследованные параметры. Две различные культуры, овес посевной и горчица белая, по-разному реагировали на добавление биоугля из осадков сточных вод в почву.

Растения овса оказались менее чувствительны к внесению биоугля из осадков сточных вод в почву. Стимулирующий эффект на высоту и биомассу растений, наблюдавшийся на 14-й день эксперимента, стал незначимым к 42-у дню. Внесение биоугля в концентрации 2 % и 5 % не привело к значимым различиям в массе и высоте растений овса, и только 10 % SB300 вызвало значительное снижение этих параметров. Ábrego с соавт. (2015) также отметили снижение развития растений кукурузы при слишком больших концентрациях биоугля из осадков сточных

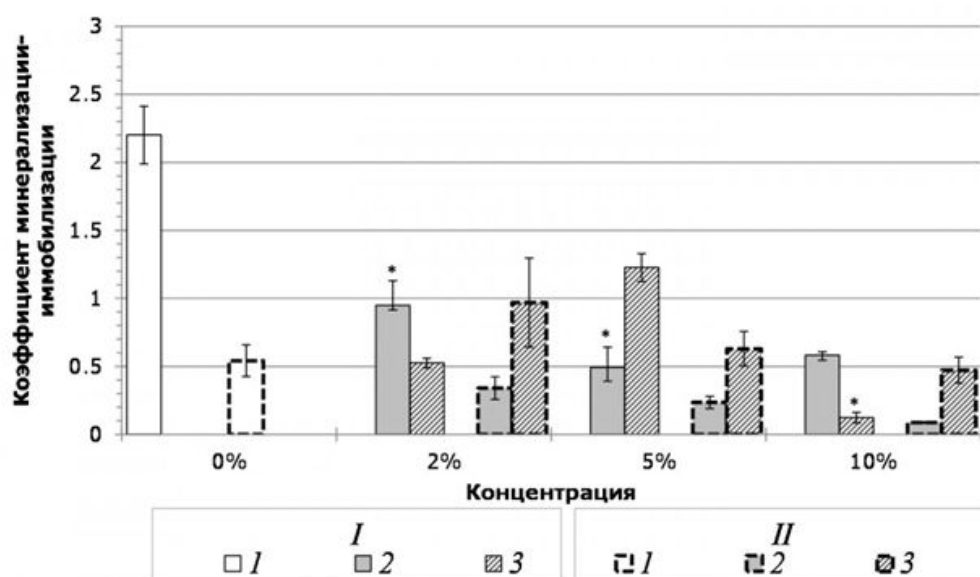


Рис. 11. Коэффициент минерализации-иммобилизации на 42-й день опыта со стандартными отклонениями. Варианты опыта, статистически значимо отличающиеся от контроля, отмечены звездочкой. I – горчица белая (*Sinapis alba* L.); II – овес посевной (*Avena sativa* L.). 1 – контроль; 2 – SB300; 3 – SB500

Fig. 11. Coefficient of nitrogen mineralization-immobilization on the 42nd day of the experiment with standard deviations. Experiment options significantly different from the control are marked with an asterisk. I – white mustard (*Sinapis alba* L.); II – oat (*Avena sativa* L.). 1 – control; 2 – SB300; 3 – SB500

вод. Что в свою очередь указывает на высокое содержание в биоугле из осадков сточных вод веществ, угнетающих развитие растений (Ábrego et al., 2015).

Горчица белая оказалась более чувствительной к добавлению биоугля. Стимуляция биомассы и высоты растений наблюдалась в вариантах с добавлением 2 % SB300 и 2–5 % SB500. Увеличение концентрации SB300 до 10 % привело к угнетению роста горчицы. Положительный эффект SB300 наблюдался при более низких концентрациях в сравнении с SB500, что может свидетельствовать о более высокой токсичности биоугля, полученного при 300 °C (Song et al., 2014).

Статистически значимое увеличение содержания валового азота в почве наблюдается только при внесении биоугля из илов сточных вод. Внесение древесного биоугля не приводит к увеличению содержания азота в почве (рис. 6). Вероятно, это связано с тем, что биоуголь из илов сточных вод содержит больше азота, чем почва и древесный биоуголь. Исследуемая почва содержит 0.075 % валового азота, березовый биоуголь – 0.27 %, биоуголь SB500 – 1.46 %, SB300 – 1.02 %. Таким образом, с SB500 и SB300 в почву вносится дополнительно больше азота.

Несмотря на увеличение содержания общего азота в почве при добавлении биоуглей из осадков сточных вод, не наблюдалось прямой зависимости между содержанием азота и биомассой и высотой растений.

Численность различных трофических групп микроорганизмов в большинстве случаев повышалась с увеличением концентрации биоуглей. Это согласуется с ранее полученными данными. Считается, что внесение в почву биоугля способствует развитию микроорганизмов благодаря дополнительным питательным веществам, оптимизации реакции среды и пористой структуре (Krishnakumar et. al., 2014; Singh et. al., 2010; Van Zwieten et. al., 2010).

Корреляция между количеством микроорганизмов, способных потреблять минеральный и органический азот, и концентрациями биоугля из осадков сточных вод была прямой и довольно высокой. Наибольшая численность этих двух групп микроорганизмов наблюдалась при добавлении SB300 под растения белой горчицы. Микробиологические показатели в вариантах с древесным биоуглем нами не определялись, т. к. были изучены ранее (Григорьян и др., 2016; Кулагина и др., 2018б). Результаты предыдущих исследований показали, что внесение древесного биоугля в ту же серую лесную почву в концентрациях 2–10 % не влияет на численность аммонификаторов, а максимальная численность амилотических бактерий наблюдалась при внесении 10 % древесного биоугля в почву (Кулагина и др., 2018б). Таким образом, биоуголь из илов сточных вод больше способствовал развитию в почве аммонифицирующих микроорганизмов, чем

древесный биоуголь.

Наиболее сильная зависимость между концентрациями SB300 и SB500 и численностью микроорганизмов наблюдалась для микромицетов, и наименьшая – для педотрофных бактерий.

Микроскопические грибы являются неотъемлемой частью почвенной микробиоты. Они принимают участие в разложении органических веществ, в том числе таких сложных соединений, как целлюлоза и лигнин (Емцев, Мишустин, 2008). Микромицеты активно участвуют в разложении органических остатков, синтезе и минерализации гумуса, освобождении элементов корневого питания растений, в круговороте азота (Шляужене, 1983; Gadd, 2017). Численность микромицетов была в два раза выше при добавлении SB300 в сравнении с SB500. Вероятная причина этого в том, что SB300 содержит больше органического вещества, пригодного для микромицетов, в связи с более низкими температурами в процессе пиролиза.

Количество педотрофов, способных разлагать лабильное органическое вещество, увеличивалось с добавлением биоугля из осадков сточных вод. При внесении SB500 численность возрастала не более чем в 3–4 раза по сравнению с контролем, но четко коррелировала с дозой вносимого биоугля.

В случае SB300 численность возрастала по сравнению с контролем в 10–15 раз, но корреляции с дозой вносимого биоугля не имела.

Причина, по-видимому, также в количестве вносимого с SB500 и SB300 лабильного органического вещества, пригодного для использования педотрофными микроорганизмами. В SB300 такого вещества было больше. Однако при высоких концентрациях SB300 сильнее начинают проявляться другие характеристики. Например, более высокое содержание доступных токсичных веществ.

Коэффициент минерализации и иммобилизации под горчицей без внесения биоугля был больше единицы, что свидетельствует о преобладании процессов иммобилизации азота. В то же время под посевами овса без внесения биоугля явно преобладали про-

цессы минерализации. То есть потребление азота данными растениями и состав их корневых выделений очень сильно отличаются. При внесении биоугля коэффициент минерализации только на одном варианте опыта оказался больше единицы (5 % SB500 под горчицей). Во всех остальных случаях процессы минерализации явно преобладали. По-видимому, причина все в том же – с биоуглем в почву попадает большое количество пригодного к разложению микроорганизмами лабильного органического вещества и общего азота. Этот результат значительно отличается от ранее полученных данных для WB500. Для древесного биоугля коэффициент минерализации-иммобилизации показал сдвиг от доминирования процессов минерализации в начале эксперимента к доминированию иммобилизации на 42-й день после посева растений (Кулагина и др., 2018б). Разница объясняется соотношением C/N, которое в древесном биоугле шире, чем в SB500 и SB300.

Заключение

Увеличение высоты и биомассы растений при внесении SB300 в почву проявляется при более низких концентрациях в сравнении с SB500. Эта зависимость, по-видимому, связана с меньшей токсичностью продуктов пиролиза, получаемых при более высоких температурах. Между тем стоит отметить, что не наблюдается значимой корреляции между валовым содержанием азота в смеси почвы и биоугля и развитием тестовых растений. Также отсутствует прямая зависимость между параметрами развития растений и почвенной микробиологической активностью. Добавление биоугля из осадков сточных вод в большинстве случаев сдвигает баланс микробиологической активности в сторону процессов минерализации азота.

Таким образом, результаты указывают, что стимуляция роста растений может быть достигнута при добавлении не более чем 5 % биоугля из осадков сточных вод. Эффект от добавления биоугля сильнее для горчицы белой, чем для овса. Как дополнительный эффект – биоуголь способствует усилению микробиологической активности.

Библиография

- Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв . М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.
- Буренков С. В., Грачев А. Н., Забелкин С. А. Термическая утилизация иловых осадков сточных вод методом быстрого пиролиза в сеточном реакторе // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 22. С. 40–43.
- ГОСТ Р 53357-2013. Топливо твердое минеральное. Технический анализ . URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/53375/> (дата обращения: 12.05.2020).

- Грачев А. Н., Макаров А. А., Забелкин С. А., Башкиров В. Н. Термохимическая переработка лигноцеллюлозного сырья в биотопливо и химические продукты // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 21. С. 109–111.
- Григорьян Б. Р., Грачев А. Н., Кулагина В. И., Сунгатуллина Л. М., Кольцова Т. Г., Рязанов С. С. Влияние биоугля на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели мало гумусированной почвы в условиях вегетационного опыта // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 11. С. 185–189.
- Емцев В. Т., Мишустин Е. Н. Микробиология. М.: Дрофа, 2008. 444 с.
- Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 225 с.
- Кулагина В. И., Грачев А. Н., Рязанов С. С., Кольцова Т. Г., Сунгатуллина Л. М., Рупова Э. Х. Оценка фитотоксичности как первый этап эколого-биологической оценки влияния продукта пиролиза илов сточных вод на почвы // Вестник технологического университета. 2018а. Т. 21. № 1. С. 164–168.
- Кулагина В. И., Сунгатуллина Л. М., Грачев А. Н., Шагидуллин Р. Р., Рязанов С. С., Забелкин С. А., Кольцова Т. Г. Оценка воздействия биоугля на микробиологические и некоторые физико-химические показатели серой лесной почвы // Российский журнал прикладной экологии. 2018б. № 2 (14). С. 21–25.
- Мещеряков А. М. Разложение почв серной и хлорной кислотами для определения азота и фосфора // Почвоведение. 1963. № 5. С. 21–30.
- Мишустин Е. Н. Микроорганизмы и плодородие почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 342 с.
- Патент 2395559 Рос. Федерация. Способ термической переработки органосодержащего сырья. 2009 / А. Н. Грачев, В. Н. Башкиров, С. А. Забелкин, А. А. Макаров, Д. В. Тунцев, Р. Г. Хисматов; Патентообладатель ООО "ЭнергоЛесПром". Заявл. 03.10.2009; Опубл. 27.07.2010.
- Плеханова И. О. Степень самоочищения агродерново-подзолистых супесчаных почв, удобренных осадком сточных вод // Почвоведение. 2017. № 4. С. 506–512.
- Рижия Е. Я., Бучкина Н. П., Мухина И. М., Белинец А. С., Балашов Е. В. Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент) // Почвоведение. 2015. № 2. С. 211–220.
- Рэуце К., Кырстя С. Борьба с загрязнением почвы. М.: Агропромиздат, 1986. 221 с.
- Рязанов С. С., Кулагина В. И., Грачев А. Н., Солодников О. М., Сунгатуллина Л. М. Влияние температуры пиролиза осадков муниципальных сточных вод на формы тяжелых металлов (Cu, Ni, Pb) // Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности: Сб. ст. по материалам Междунар. науч. экол. конф. / Сост. Л. С. Новопольцева; Под ред. И. С. Белюченко. Краснодар: КубГАУ, 2018. С. 31–33.
- Теппер Е. З., Шильникова В. К., Переверзева Г. И. Практикум по микробиологии. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1993. 175 с.
- Шляужене Д. Ю. Микромицеты в почвах, занятых бобовыми травами и кормовыми злаковыми культурами: Дис. ... канд. биол. наук. Вильнюс, 1983. 206 с.
- Ábrego J., Atienza-Martínez M., Gimeno J. R., Aibar J., Quílez D., Gea G. Phytotoxicity of sewage sludge biochars prepared at different pyrolysis condition // 23rd European Biomass Conference and Exhibition. Vienna, Austria, 2015.
- Chan K. Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. Agronomic Values of Greenwaste Biochar as a Soil Amendment // Soil Res. 2007. Vol. 45 (8). P. 629–634. DOI: 10.1071/SR07109.
- Gadd G. M. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation // Mycological research. 2017. Vol. 111 (1). P. 3–49. DOI: 10.1016/j.mycres.2006.12.001.
- Krishnakumar S., Rajalakshmi A. G., Balaganesh B., Manikandan P., Vinoth C., Rajendran V. Impact of Biochar on Soil Health // International Journal of Advanced Research. 2014. Vol. 2 (4). P. 933–950.
- Lehman J., Da Silva J. P., Steiner C., Nehls T., Zech W., Glaser B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments // Plant and Soil. 2003. Vol. 249. P. 343–357.
- Liu T., Liu B., Zhang W. Nutrients and Heavy Metals in Biochar Produced by Sewage Sludge Pyrolysis: Its Application in Soil Amendment // Pol. J. Environ. Stud. 2014. Vol. 23(1). P. 271–275.
- Major J. Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems // International Biochar Initiative. 2010. URL: <https://biochar-international.org/> (дата обращения: 03.02.2011).
- Singh B. P., Hatton B. J., Singh B., Cowie A. L., Kathuria A. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils // J. of Environmental Quality. 2010. Vol. 39 (4). P. 1224–1235.
- Song D., Xue X. Y., Chen D. Z., He P. J., Dai X. H. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and heavy metal accumulation // Chemosphere. 2014. Vol. 109. P. 213–220. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.070.
- Van Zwieten L., Kimber S., Morris S., Chan K. Y., Downie A., Rust J., Joseph S., Cowie A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility // Plant Soil. 2010. Vol. 327. P. 235–246. DOI: 10.1007/s11104-009-0050-x.

- Waqas M., Khan S., Qing H., Brian R., Cai C. The effects of sewage sludge and sewage sludge biochar on PAH and potentially toxic element bioaccumulation in *Cucumis sativa* L. // Chemosphere. 2013. Vol. 105. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.064.
- World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2015. 192 p.

EFFECT OF BIOCHARS FROM SEWAGE SLUDGE ON PLANT GROWTH, SOIL MICROORGANISMS, AND NITROGEN CONTENT IN GREY FOREST SOILS

RYAZANOV
Stanislav Sergeevich

PhD, Research Institute of Ecology and Mineral Management Problems of Tatarstan Academy of Sciences (separate subdivision of State institution Tatarstan Academy of Sciences), erydit@yandex.ru

KULAGINA
Valentina Ivanovna

PhD, Research Institute of Ecology and Mineral Management Problems of Tatarstan Academy of Sciences (separate subdivision of State institution Tatarstan Academy of Sciences), viksoil@mail.ru

GRACHEV
Andrey Nikolaevich

D.Sc, Kazan National Research Technological University; Energolesprom, LLC, energolesprom@gmail.com

SUNGATULLINA
Lutsia Mansurovna

Research Institute of Ecology and Mineral Management Problems of Tatarstan Academy of Sciences (separate subdivision of State institution Tatarstan Academy of Sciences), sunlyc@yandex.ru

ZABELKIN
Sergey Andreevich

Ph.D., Kazan National Research Technological University; Energolesprom, LLC, szabelkin@gmail.com

SHAGIDULLIN
Rifgat Roaldovich

Doctor of Chem. Sci., Institute of Ecology and Subsoil Use of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan (a separate subdivision of the State Scientific Institution of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan), shagidullin_@mail.ru

Keywords:

biochar
biomass and height of plants
groups of microorganisms
pyrolysis temperature
sewage sludge

Summary: The aim of this study was to assess the impact of biochar obtained from sewage sludge at different pyrolysis temperatures on the height and biomass of oat and mustard plants, as well as on the microbiological parameters of gray forest soil. The biochar was obtained at the fast pyrolysis unit FPP02 at a temperature of 300 + 20 °C and 500 + 20 °C. During the laboratory vegetation experiment, 2%, 5% and 10% of biochar from the soil weight were added to the soil. Oat and white mustard plants were grown in vegetational pots for 42 days. The height and biomass of white mustard plants increased compared to the control when adding 2 % and 5% of biochar obtained at 500 °C, and 2 % of biochar obtained at 300 °C. When 10% biochar obtained at 300° was added to the soil, the productivity of oat and mustard plants decreased compared to the control. The introduction of biochar from sewage sludge contributed to an increase in the total nitrogen content in the soil. At that the number of most trophic groups of microorganisms increased, and more significantly -- when biochar obtained at 300° was added. The highest correlation between the concentration of biochar obtained at 300° and the number of microorganisms was observed for microscopic fungi, the lowest -- for the group of pedotrophic microorganisms.

Reviewer: N. P. Buchkina
Reviewer: E. A. ZHarikova

Received on: 03 February 2020

Published on: 26 December 2020

References

- Ábrego J., Atienza-Martínez M., Gimeno J. R., Aibar J., Quílez D., Gea G. Phytotoxicity of sewage sludge biochars prepared at different pyrolysis condition, 23rd European Biomass Conference and Exhibition. Vienna, Austria, 2015.
- Arinushkina E. V. Guidelines for chemical analysis of Soils. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1970. 487 p.
- Burenkov S. V. Grachev A. N. Zabelkin S. A. Thermal utilization of sewage sludge by rapid pyrolysis in a grid reactor, *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*. 2016. T. 19. No. 22. P. 40–43.
- Chan K. Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. Agronomic Values of Greenwaste Biochar as a Soil Amendment, *Soil Res.* 2007. Vol. 45 (8). P. 629–634. DOI: 10.1071/SR07109.
- Classification and diagnostics of the USSR soils. M.: Kolos, 1977. 225 p.
- Emcev V. T. Mishustin E. N. Microbiology. M.: Drofa, 2008. 444 p.
- Gadd G. M. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation, *Mycological research*. 2017. Vol. 111 (1). P. 3–49. DOI: 10.1016/j.mycres.2006.12.001.
- Grachev A. N. Makarov A. A. Zabelkin S. A. Bashkirov V. N. Thermochemical processing of lignocellulosic raw material into biofuels and chemical products, *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2013. T. 16. No. 21. P. 109–111.
- Grigor'yan B. R. Grachev A. N. Kulagina V. I. Sungatullina L. M. Kol'cova T. G. Ryazanov S. S. The effect of biochar on plant growth, microbiological and physico-chemical parameters of low humus soil in conditions of vegetational experiment, *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*. 2016. T. 19. No. 11. P. 185–189.
- Krishnakumar S., Rajalakshmi A. G., Balaganesh B., Manikandan P., Vinoth C., Rajendran V. Impact of Biochar on Soil Health, *International Journal of Advanced Research*. 2014. Vol. 2 (4). P. 933–950.
- Kulagina V. I. Grachev A. N. Ryazanov S. S. Kol'cova T. G. Sungatullina L. M. Rupova E. H. Assessment of phytotoxicity as the first stage of environmental and biological assessment of the pyrolysis products of sewage sludge on soils, *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*. 2018a. T. 21. No. 1. P. 164–168.
- Kulagina V. I. Sungatullina L. M. Grachev A. N. Shagidullin R. R. Ryazanov S. S. Zabelkin S. A. Kol'cova T. G. Assessment of the impact of biochar on microbiological and some physicochemical parameters of gray forest soil, *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*. 2018b. No. 2 (14). P. 21–25.
- Lehman J., Da Silva J. P., Steiner C., Nehls T., Zech W., Glaser B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments, *Plant and Soil*. 2003. Vol. 249. P. 343–357.
- Liu T., Liu B., Zhang W. Nutrients and Heavy Metals in Biochar Produced by Sewage Sludge Pyrolysis: Its Application in Soil Amendment, *Pol. J. Environ. Stud.* 2014. Vol. 23(1). P. 271–275.
- Major J. Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems, International Biochar Initiative. 2010. URL: <https://biochar-international.org/> (data obrascheniya: 03.02.2011).
- Mescheryakov A. M. Soil decomposition with sulfuric and perchloric acids to determine nitrogen and phosphorus, *Pochvovedenie*. 1963. No. 5. P. 21–30.
- Mishustin E. N. Microorganisms and soil fertility. M.: Izd-vo AN SSSR, 1956. 342 p.
- Plehanova I. O. Self-remediation rate of agro-soddy-podzolic sandy loam soils fertilized by sewage sludge, *Pochvovedenie*. 2017. No. 4. P. 506–512.
- Reuce K. Kyrstya S. Fight against soil pollution. M.: Agropromizdat, 1986. 221 p.
- Rizhiya E. Ya. Buchkina N. P. Muhina I. M. Belinec A. S. Balashov E. V. The influence of biochar on the properties of samples of sod-podzolic sandy loam soil with varying degrees of cultivation (laboratory experiment), *Pochvovedenie*. 2015. No. 2. P. 211–220.
- Ryazanov S. S. Kulagina V. I. Grachev A. N. Solodnikova O. M. Sungatullina L. M. Influence of pyrolysis temperature of municipal wastewater sludge on forms of heavy metals (Cu, Ni, Pb), *Ekologicheskie problemy razvitiya agrolandshaftov i sposoby povysheniya ih produktivnosti: Sb. st. po materialam Mezhdunar. nauch. ekol. konf., Sost. L. P. Novopol'ceva; Pod red. I. P. Belyuchenko*. Krasnodar: KubGAU, 2018. P. 31–33.
- Shlyauzhene D. Yu. Micromycetes in soils occupied by legumes and forage cereals: Dip. ... kand. biol. nauk. Vil'nyus, 1983. 206 p.
- Singh B. P., Hatton B. J., Singh B., Cowie A. L., Kathuria A. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils, *J. of Environmental Quality*. 2010. Vol. 39 (4). P. 1224–1235.
- Solid mineral fuel. Technical analysis. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/55375/> (data obrascheniya: 12.05.2020).
- Song D., Xue X. Y., Chen D. Z., He P. J., Dai X. H. Application of biochar from sewage sludge to plant cultivation: Influence of pyrolysis temperature and biochar-to-soil ratio on yield and **heavy metal accumulation**,

- Chemosphere. 2014. Vol. 109. P. 213–220. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.01.070.
- Tepper E. Z. Shil'nikova V. K. Pereverzeva G. I. Microbiology workshop. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Kolos, 1993. 175 p.
- The method of thermal processing of organic containing raw materials. 2009, A. N. Grachev, V. N. Bashkirov, P. A. Zabelkin, A. A. Makarov, D. V. Tuncev, R. G. Hismatov; Patentobladatel' OOO «EnergoLesProm». Zayavl. 03.10.2009; Opubl. 27.07.2010.
- Van Zwieten L., Kimber S., Morris S., Chan K. Y., Downie A., Rust J., Joseph S., Cowie A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility, Plant Soil. 2010. Vol. 327. P. 235–246. DOI: 10.1007/s11104-009-0050-x.
- Waqas M., Khan S., Qing H., Brian R., Cai C. The effects of sewage sludge and sewage sludge biochar on PAH and potentially toxic element bioaccumulation in Cucumis sativa L., Chemosphere. 2013. Vol. 105. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.064.
- World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2015. 192 p.



УДК 591.524.12

РАЗВИТИЕ ПЛАНКТОННЫХ БИОЦЕНОЗОВ ЛИТОРАЛЬНОЙ ЗОНЫ В УСЛОВИЯХ АН- ТРОПОГЕННОЙ ГИДРОТЕРМАЛИ ВОДООЕ- МОВ-ОХЛАДИТЕЛЕЙ

ТАШЛЫКОВА

Наталья Александровна

к. б. н., Институт природных ресурсов, экологии и криологии
СО РАН, NatTash2005@yandex.ru

АФОНИНА

Екатерина Юрьевна

к. б. н., Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО
РАН, kataf@mail.ru

Ключевые слова:

планктон
литораль
антропогенная
гидротермаль
водоем-охладитель

Аннотация: Наиболее заметным изменением водной среды в результате воздействия работы электростанции является увеличение температуры воды. Любые участки, непосредственно испытывающие влияние сброса подогретых вод, можно рассматривать в качестве своеобразных антропогенных гидротермалей. Изучение взаимосвязи абиотических и биотических параметров таких экстремальных экосистем важно для понимания биологической эффективности экосистем гидротехнических сооружений и факторов изменения трофического статуса. В данной статье приводится анализ взаимосвязи факторов окружающей среды гидротермальной зоны и основных характеристик популяции планктона в водохранилище Харанорской ГРЭС и озере-охладителе Читинской ТЭЦ Кенон. Основными факторами, обуславливающими развитие планктонных биоценозов литоральной зоны антропогенной гидротермальной озера Кенон, являются (по убыванию значимости) электропроводность, pH, общее содержание растворенных веществ и температура; в Харанорском водохранилище – температура, прозрачность, содержание нитратов и растворенного кислорода. Наиболее чувствительны к воздействию факторов среды в озере Кенон цианобактерии и кладоцеры, в Харанорском водохранилище – желтозеленые водоросли, коловратки и копеподы.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 23 января 2020 года

Подписана к печати: 26 декабря 2020 года

Введение

Влияние электростанций различного типа на водные экосистемы, на которых они расположены, многосторонне (Безносков и др., 2002; Токарева, 2004; Poornima et al., 2005; Zębek, 2013; Лунева, 2014; Ponomareva et al., 2016; Korotkova et al., 2018). Наиболее выраженным изменением водной среды в результате воздействия работы энергетических станций является увеличение темпе-

ратуры воды. Изучение участков, непосредственно испытывающих влияние сброса подогретых вод, позволило выделить несколько зон, границы которых определяются по градиенту температуры (Суздалева, 2000). Для таких участков В. Н. Безносковым с соавторами (2001, 2002) было предложено понятие «антропогенная гидротермаль». Под данным термином понимают искусственно подогреваемый участок водоема, используемый объектами гидроэнергетики. В этих

специфических экосистемах основной антропогенный фактор – температура сбросных вод. Этот экзогенный постоянно действующий параметр является структурирующим, т. к. обуславливает сезонную смену видов и их пространственное распределение, определяя скорость протекания жизненных процессов гидробионтов, а также характер

воздействия других факторов среды (Суздалева, 2000; Лунева, 2014). Примером антропогенной гидротермали на территории Забайкальского края служат водохранилище-охладитель Харанорской ГРЭС (N 50°51'12", E 115°40'41") и озеро-охладитель Читинской ТЭЦ Кенон (N 52°2'20", E 113°22'52") (рис. 1).

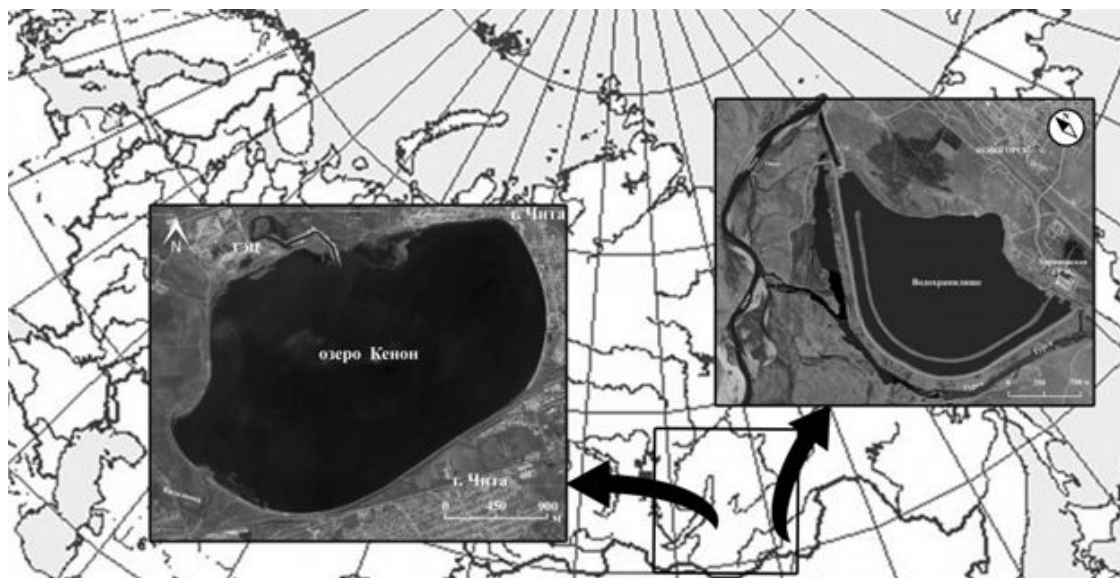


Рис. 1. Карта-схема водоемов с антропогенной гидротермальной на территории Забайкальского края
Fig. 1. Map-scheme of reservoirs with anthropogenic hydrothermal conditions in the Trans-Baikal Territory

Цель работы – определение взаимосвязи между факторами среды литорали гидротермальной зоны и основными характеристиками планктона водоемов-охладителей – Харанорского водохранилища и озера Кенон.

Бессточное озеро Кенон расположено в Читино-Ингодинской впадине, в западной части города Читы. Оно относится к бассейну реки Ингода. Площадь поверхности 16.2 км², длина 5.7 км, средняя ширина 2.8 км, максимальная глубина около 6.8 м. Объем водной массы – 77 млн м³. В озеро впадают на западе река Кадала, на севере – ручей Ивановский, берущие начало с Яблонового хребта.

Озеро Кенон включено в технологическую схему Читинской теплоэлектроцентрали. Техническое водоснабжение выполнено по прямоточно-оборотной схеме. Вода на теплоэлектроцентрали поступает из северной части водоема по подводящему каналу длиной около 500 метров. Интенсивность внутреннего водообмена составляет до 4 раз в год. В целях обеспечения нормального водоснабжения теплоэлектростанции производится периодическая перекачка в него воды из реки Ингода (до 15–16 млн м³/год), тем самым сохраняется абсолютная отметка уровня 653 м. Объем выбрасываемых те-

плых вод составляет более 109 млн м³/год (Экология..., 1998) (рис. 2).

Пруд-охладитель Харанорской ГРЭС – наливное равнинное водохранилище пойменно-долинно-типа сезонного регулирования. Площадь водного зеркала при нормальном подпорном уровне (574 м. б. с.) – 4.1 км², объем водной массы – 15.6 млн м³, средняя глубина – 3.8 м. Заполнение и подпитка водохранилища в период открытой воды происходит за счет подачи воды из р. Онон по водоподводящему каналу, в период ледостава – из дренажного канала (рис. 3). Система технического водоснабжения энергетической станции смешанная (прямоточно-оборотная) летом и полностью оборотная зимой. Круговая схема циркуляции потока водной массы обуславливает высокую интенсивность внутреннего водообмена (до 35 раз в год) (Афонин и др., 2014).

Материалы

Сбор полевого материала осуществляли в оз. Кенон в марте, мае – сентябре и декабре 2012–2013 гг. В Харанорском водохранилище отбор проб осуществляли в сентябре и октябре 2012 г. и в феврале, апреле, июне, августе, сентябре и октябре 2013 г. Количество станций, их координаты и число

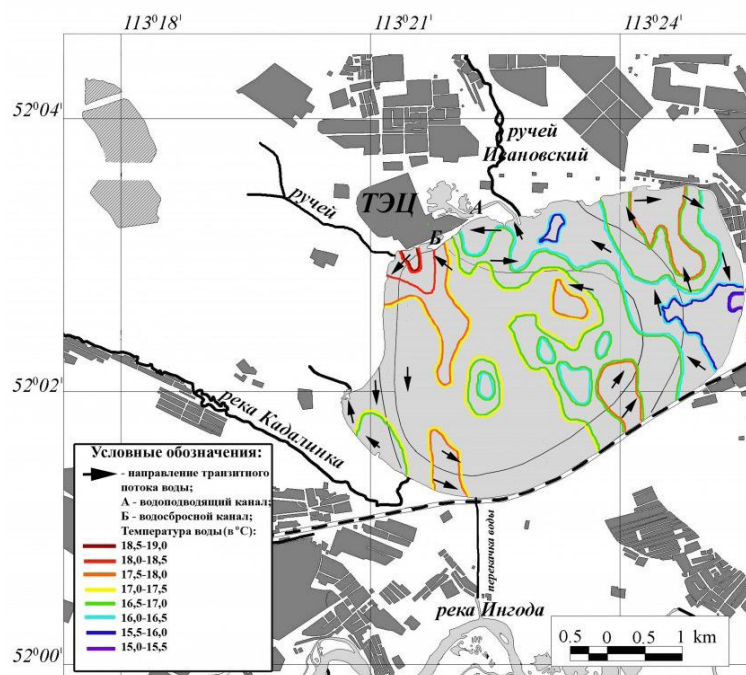


Рис. 2. Карта-схема оз. Кенон и изменения температуры поверхностного слоя воды в августе (карта-схема построена по материалам работы: Экология..., 1998)

Fig. 2. Map-scheme of Kenon Lake and changes in surface water temperature in August (schematic map is given on the material of the work: Ecology..., 1998)

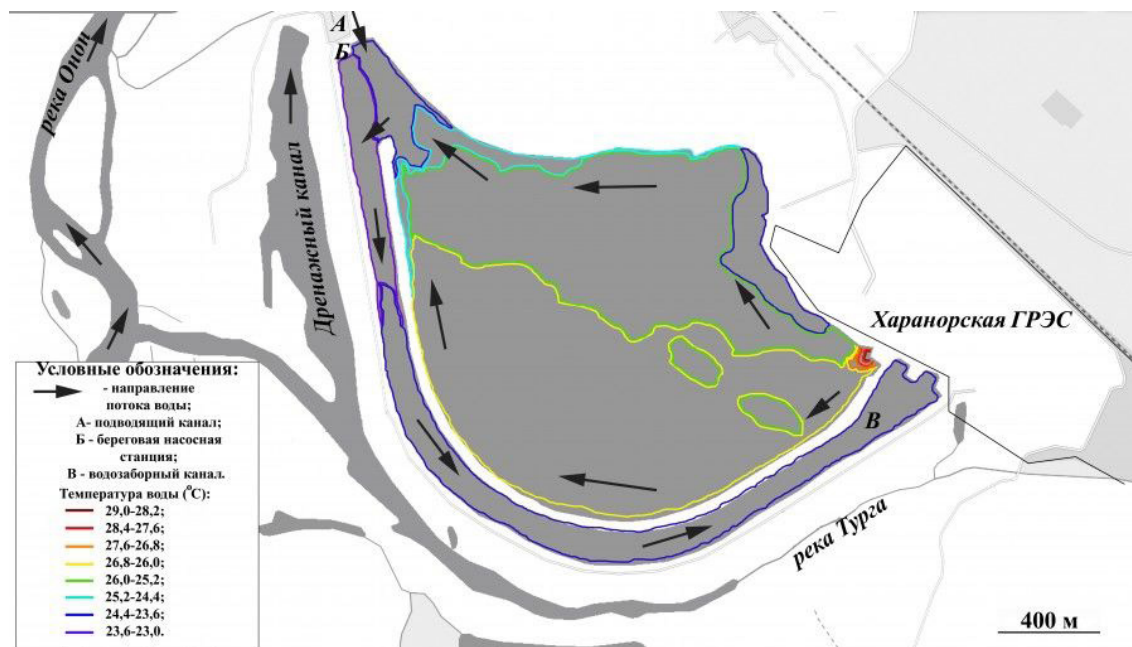


Рис. 3. Карта-схема пруда-охладителя Харанорской ГРЭС и изменения температуры поверхностного слоя воды в июле (карта-схема построена по материалам работы: Водоем-охладитель..., 2005)

Fig. 3. Map-scheme of the cooling pond Kharanorskaya RPS and changes in the temperature of the surface water layer in July (the schematic map is based on the materials of the work: The cooling pond..., 2005)

отобранных на станциях проб приведены в табл. 1 и 2.

Всего в 2012–2013 гг. было отобрано: в

оз. Кенон – 396 планктонных проб, в Харанорском водохранилище – 312 планктонных проб.

Таблица 1. Координаты станций и количество проб, отобранных в озере Кенон в 2012–2013 гг.

№ станции	Координаты	Число проб	
		2012 г.	2013 г.
		фито / зоо	фито / зоо
Термальная зона	1 N 52°3'2"; E 113°21'26"	7 / 7	7 / 7
	2 N 52°3'0"; E 113°21'18"	7 / 7	7 / 7
	3 N 52°2'56"; E 113°21'20"	7 / 7	7 / 7
	4 N 52°2'50"; E 113°21'15"	7 / 7	7 / 7
	5 N 52°2'36"; E 113°21'18"	7 / 7	7 / 7
Фон	6 N 52°3'24"; E 113°23'58"	14 / 7	7 / 7
	7 N 52°2'17"; E 113°22'59"	21 / 7	7 / 7
	8 N 52°2'18"; E 113°22'23"	14 / 7	7 / 7
	9 N 52°2'38"; E 113°35'19"	7 / 7	7 / 7

Примечание (здесь и далее). Фито – фитопланктон, зоо – зоопланктон.

Таблица 2. Координаты станций и количество проб, отобранных в Харанорском водохранилище в 2012–2013 гг.

№ станции	Координаты	Число проб	
		2012 г.	2013 г.
		фито / зоо	фито / зоо
Фон	1 N 50°52'6"; E 115°39'32"	4 / 2	12 / 6
	2 N 50°51'52"; E 115°39'42"	4 / 2	12 / 6
	3 N 50°51'37"; E 115°40'17"	4 / 2	12 / 6
	4 N 50°51'36"; E 115°41'18"	4 / 2	12 / 6
	5 N 50°50'58"; E 115°41'51"	4 / 2	12 / 6
	6 N 50°50'37"; E 115°40'37"	4 / 2	12 / 6
	7 N 50°51'36"; E 115°39'43"	4 / 2	12 / 6
	8 N 50°51'56"; E 115°39'26"	4 / 2	12 / 6
Термальная зона	9 N 50°51'18"; E 115°40'40"	4 / 2	12 / 6
	10 N 50°51'1"; E 115°40'9"	4 / 2	12 / 6
	11 N 50°51'6"; E 115°41'9"	4 / 2	12 / 6
	12 N 50°51'6"; E 115°41'41"	4 / 2	12 / 6
	13 N 50°50'43"; E 115°40'52"	4 / 2	12 / 6

Фитопланктонные пробы отбирали с поверхностных и придонных слоев воды при помощи батометра Паталаса. Облов зоопланктона проводили totally сетью Джеди (диаметр ячеек сита 0.064 мм). Материал фиксировали: фитопланктон – раствором Люголя, зоопланктон – 4 % раствором формальдегида. Пробы обрабатывали согласно стандартным гидробиологическим методам (Методические рекомендации..., 1982; Садчиков, 2003). Биомассу фитопланктона определяли по объему отдельных клеток или колоний водорослей (Садчиков, 2003). Классификация таксонов и синонимия каждой группы водорослей приведены по альгологическому сайту AlgaeBase (Guiry et al.,

2019). Данные по биомассе зоопланктона получали путем определения индивидуальной массы организмов с учетом их размера (Ruttner-Kolisko, 1977; Балущкина и др., 1979).

В оз. Кенон одновременно с отбором планктонных проб с помощью многопараметрического портативного анализатора качества вод GPS-AQVAMETER (Aquaread, Великобритания) проводили измерения абиотических параметров среды (минерализация (TDS), содержание кислорода (O_2), pH, температура воды (T), окислительно-восстановительный потенциал (ORP), электропроводность (E), мутность (TUR)). В обоих водоемах глубину (H) измеряли с помощью

лота, прозрачность воды (TR) определяли стандартным диском Секки. Параллельно в озере и водохранилище отбирали пробы для определения содержания биогенных (общий фосфор (P_{tot}), фосфаты (PO_4), нитраты (NO_3), нитриты (NO_2), аммоний (NH_4)), органических и минеральных веществ (COD). В Харанорском водохранилище также проводили сбор материала для определения содержания кремния (Si), кальция (Ca^{2+}), железа (Fe_{tot}), меди (Cu^{2+}), хлорид-ионов (Cl^{-}), сульфат-ионов (SO_4^{2-}), фторид-ионов (F^{-}), нефтепродуктов (Oil) и анионоактивных синтетических поверхностно-активных веществ (ASPAV). Кроме того, оценивали биохимическое потребление кислорода (BPK_5 , BPK_{20}), окисляемость ($[O]$), цветность (Col), взвешенные вещества (SS) и общую жесткость (TS). Химический анализ проб воды, отобранных в оз. Кенон, осуществлялся сотрудниками лаборатории водных экосистем (Kuklin et al., 2016; Бутенко и др., 2017), а проб воды Харанорского водохранилища – сотрудниками промышленно-санитарной лаборатории филиала «Харанорская ГРЭС» АО «Интер РАО–Электрогенерация».

Методы

Полученные данные были подвергнуты статистической и математической обработке с использованием пакета программ Microsoft Excel 2010 и надстройки для программы Microsoft Excel XLSTAT (Addinsoft, США).

В статистический анализ включены результаты, полученные при обработке 234 проб фитопланктона и 162 проб зоопланктона (для оз. Кенон) и 208 проб фитопланктона и 104 проб зоопланктона (для Харанорского водохранилища). Для изучения взаимосвязей структурных характеристик планктона и абиотических факторов среды применяли метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA). Нормирование данных проводили по делению исходных данных на среднеквадратичное отклонение соответствующих переменных (Шипунов и др., 2014). Абсолютное значение нагрузки выше 0.60 принимали за существенную связь.

Взаимосвязь между температурой и другими абиотическими параметрами была проанализирована с использованием ранговой корреляции Спирмена (r), т. к. данный метод более универсален и не требует обязательного нормального распределения анализируемых данных. Коэффициент корреляции считали значимым при уровне достоверности (p) менее 0.05.

Результаты

Планктонные биоценозы литорали гидротермальной зоны озера-охлаждителя Кенон

Основные характеристики абиотических параметров оз. Кенон, полученные при проведении работ в 2012–2013 гг., приведены в табл. 3.

Таблица 3. Основные статистические характеристики абиотических параметров вод оз. Кенон

Параметры, ед. измерения	Статистический показатель			
	минимум	максимум	среднее значение	стандартное отклонение
Глубина, м	3.400	5.500	3.756	0.273
Прозрачность, м	1.700	4.000	3.200	0.719
Температура, °C	5.000	27.700	19.711	6.772
pH	8.650	9.570	9.145	0.354
Минерализация, мг/л	406.000	659.000	576.500	78.997
Мутность, NTU	3.100	31.700	11.600	17.476
Окислительно-восстановительный потенциал, мВ	15.100	250.900	159.480	93.569
Электропроводность, мкСм/см	626.000	1014.000	858.000	144.161
Содержание:				
* P_{tot} , мг/л	0.001	0.095	0.027	0.030
* NH_4^{+} , мг/л	0.001	0.660	0.172	0.209
* NO_3^{-} , мг/л	0.001	0.032	0.014	0.012
* NO_2^{-} , мг/л	0.001	0.012	0.006	0.004
* PO_4^{3-} , мг/л	0.002	0.058	0.022	0.018
*COD, мг/л	6.700	31.090	18.716	8.029

Примечание. * – данные приведены по материалам работы: Бутенко, Цибекмитова, 2017

Глубина в термальной зоне составляла 3.4–4.1 м, прозрачность – 1.7–4.0 м. Низкая прозрачность отмечалась в августе – сентябре. Наибольшая температура поверхностного слоя воды наблюдалась в летний сезон с пиком в июле, наименьшая – в период ледостава на озере. Изменение температуры воды по глубине составляло 1.0–8.8 °С. Температура воды в термальной зоне была теплее на 3.2–9.8 °С по сравнению с остальной частью озера. При корреляционном анализе неусредненных данных для двух лет наблюдения были получены положительные взаимосвязи температуры воды с прозрачностью ($r = 0.52$, $p = 0.02$) и глубиной ($r = 0.66$, $p = 0.001$). Других значимых корреляций между температурой и абиотическими параметрами среды гидротермальной зоны не выявлено.

В составе планктона термальной зоны оз. Кенон зарегистрировано 85 таксонов водорослей (Cyanobacteria – 4, Chrysophyta – 4, Bacillariophyta – 35, Dinophyta – 2, Chlorophyta – 34, Charophyta – 5, Euglenophyta – 1) и 38 видов беспозвоночных (Rotifera – 17, Cladocera – 12, Соперода – 9) (Афонина и др., 2017а, б). Сезонная динамика численности и биомассы водорослей и беспозвоночных планктона в термальной зоны оз. Кенон характеризовалась одновёршинной кривой с летним пиком (август – для фитопланктона, июль – август – для зоопланктона) (рис. 4).

В ранневесеннем планктоне термальной зоны вегетировали зеленые водоросли (*Tetraëdron minimum* (A. Braun) Hansgirg, *Monoraphidium komarkovae* Nygaard), они составляли 40–100 % от общей численности. Им сопутствовали золотистые водоросли (*Chrysococcus rufescens* Klebs, *Pseudokephyrion conicum* Schiller), доля которых могла составлять до 40 % всей численности фитопланктона. Поздней весной и в начале лета доминировали диатомовые водоросли (*Asterionella formosa* Hassall, *Lindavia comta* (Kützinger) Nakov, Gullory, Julius, Theriot & Alverson), составляющие до 60–70 %. Активно также развивались мелкококковые зеленые водоросли (*T. minimum*, *Lemmermannia komarekii* (Hindák) C. Bock & Krienitz in Bock et al., *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Brébisson in Brébisson & Godey, *M. komarkovae*) – 40–60 % от общего количества фитопланктона. В сезон наибольшего прогрева воды в альгоценозе отмечалось интенсивное развитие всех групп водорослей. Общий фон создавался цианобакте-

риями (*Snowella lacustris* (Chodat) Komárek & Hindák, *Gloeocapsa* sp. и *Dolichospermum flosaquae* (Brébisson ex Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & J. Komárek), зелеными (*T. minimum*, *Oocystis submarina* Lagerheim) и динофитовыми водорослями (*Ceratium hirundinella* (O. F. Müller) Dujardin и *Peridinium* sp.) – 80 %. Осенью и зимой преобладали диатомеи (*Ulnaria ulna* (Nitzsch) Compère, *A. formosa*), составляя до 70–90 %.

Основу весеннего и раннелетнего зоопланктона формировали ювенильные стадии копепода (*Cyclops vicinus* Uljanin) (25–37 % всей численности) и коловратки. Из них в разные годы в состав доминантов входили: *Conochilus unicornis* Rousselet (58 %), *Filinia longiseta* (Ehrenberg) (21–44 %), *Keratella cochlearis* (Gosse) (28 %), *Polyarthra remata* Skorikov (26–34 %), *Synchaeta stylata* Wierzejski (25 %), *Keratella quadrata* (Müller) (16–28 %). В это же время отмечалось массовое отрождение молоди ракообразных (*Thermocyclops crassus* (Fischer), *Mesocyclops leuckarti* Claus и *Bosmina longirostris* (Müller)). Летом регистрировалось наибольшее разнообразие и обилие зоопланктонов. Лидирующее положение принадлежало мелким ракообразным (*T. crassus* – 23–50 %, *Cerodaphnia quadrangula* (Müller) – 26–58 %), которые продолжали преобладать и в осеннем планктоне, образуя суммарно до 70–80 % общей численности. В отдельные годы раковый комплекс разбавлялся коловратками (*Synchaeta oblonga* Ehrenberg (44 %), *K. quadrata* (27 %)).

Для выявления влияния ведущих факторов, определяющих изменение структурных показателей фито- и зоопланктона в термальной зоне оз. Кенон, на основании данных 2012–2013 гг. был проведен факторный анализ методом главных компонент. При рассмотрении результатов были отобраны первые три компонента, объясняющие в сумме 72.02 % дисперсии (табл. 4).

Величины факторных нагрузок представляют собой коэффициенты корреляции исходных параметров с выделенными главными компонентами (табл. 5).

Первая главная компонента характеризуется невысокой положительной связью с температурой, общим фосфором, фосфатами и нитритами, определяя динамику сообществ планктона (структурные характеристики Cladocera (в частности, *C. quadrangula*) и общего фитопланктона (преимущественно Dinophyta и Chlorophyta)) (см. табл. 5, рис. 5).

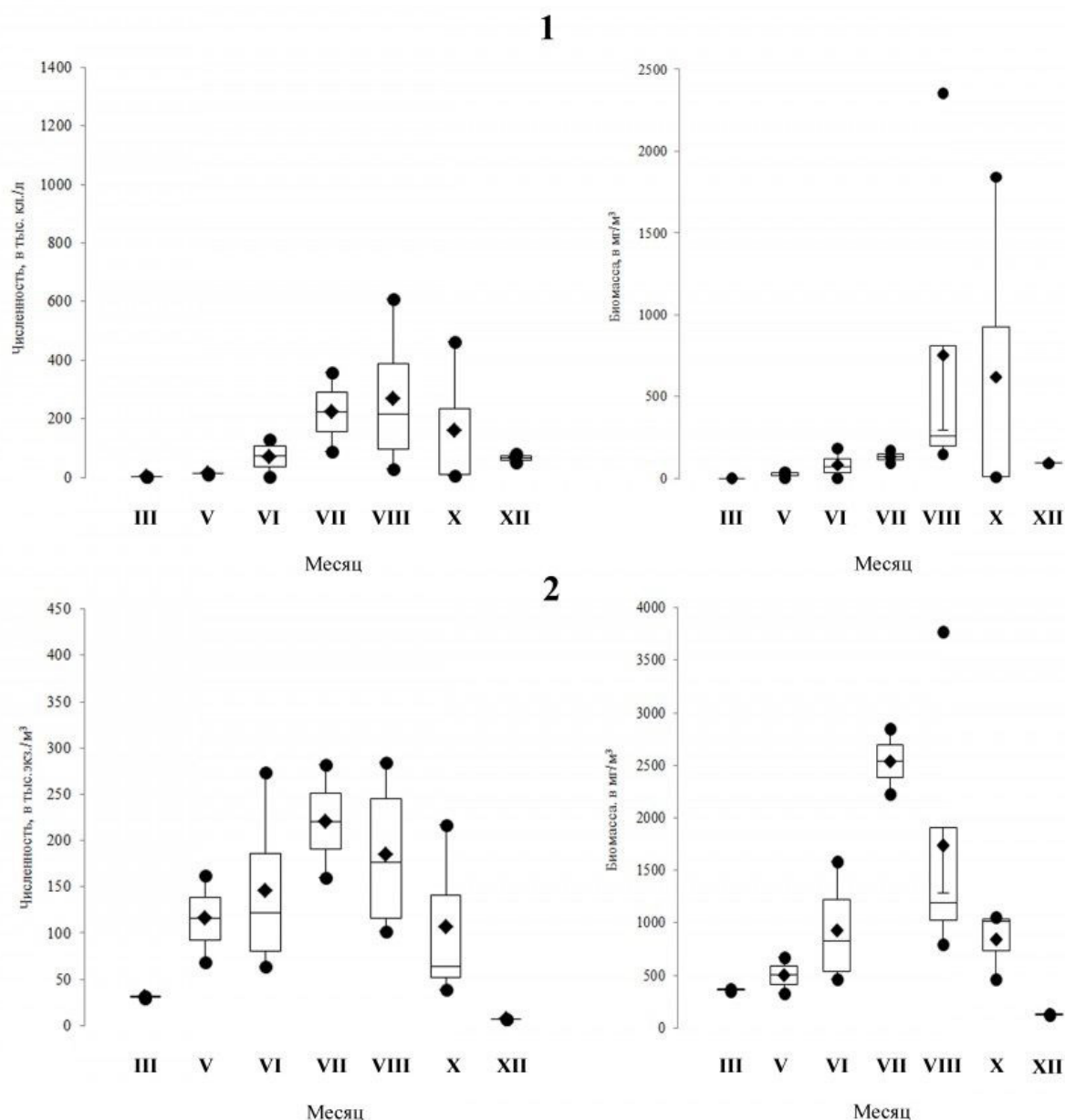


Рис. 4. Сезонная динамика численности и биомассы фитопланктона (1) и зоопланктона (2) в термальной зоне оз. Кенон в 2012–2013 гг.

Fig. 4. Seasonal dynamics of the abundance and biomass of phytoplankton (1) and zooplankton (2) in the thermal zone of Lake Kenon in 2012–2013

Для второй компоненты высоких существенных связей с абиотическими параметрами среды не получено (см. табл. 5). Согласно рис. 5, отрицательные факторные нагрузки определяются количественными показателями *Cyanobacteria* (в частности, *Gloeocapsa* sp.), положительные – общей численностью зоопланктона (в частности, *B. longirostris*).

Третья компонента характеризуется существенной положительной связью с электропроводностью, рН, минерализацией, окис-

лительно-восстановительным потенциалом и температурой воды, которые связаны с численностью *Cyanobacteria* (в частности, *A. flosaquaе*) (см. табл. 5, рис. 5).

Планктонные биоценозы литорали гидротермальной зоны Харанорского водохранилища

Основные характеристики абиотических параметров Харанорского водохранилища, полученные при проведении работ в 2012–2013 гг., приведены в табл. 6.

Таблица 4. Результаты компонентного анализа массива данных для оз. Кенон

Главные компоненты	Собственные числа	Доля дисперсии (%)	Суммарная накопленная дисперсия (%)
1	16.42	42.02	42.01
2	9.37	17.31	59.32
3	7.55	12.7	72.02
4	6.13	10.92	82.94
5	5.72	6.81	89.75
6	4.39	4.5	94.25
7	1.19	2.91	97.16
8	0.6	1.73	98.89
9	0.31	0.82	99.71
10	0.01	0.28	100

Таблица 5. Факторные нагрузки абиотических параметров для выделенных главных компонент антропогенной гидротермальной озера Кенон

Параметр	Факторы		
	1	2	3
H	0.54	0.268	0.117
T	0.68	0.299	0.013
pH	0.08	0.068	0.774
TDS	0.09	0.079	0.757
ORP	0.24	0.247	0.728
O ₂	0.08	0.167	0.661
E	0.21	0.259	0.805
P _{tot}	0.64	-0.175	0.115
PO ₄ ³⁻	0.64	-0.212	0.289
NO ₂ ¹⁻	0.63	-0.093	0.49
NO ₃ ¹⁻	0.522	-0.007	0.387
COD	0.466	-0.245	-0.396

Примечание (здесь и далее на рисунке). H – глубина, T – температура воды, pH – активный водородный показатель, TDS – общая минерализация, ORP – окислительно-восстановительный потенциал, O₂ – содержание кислорода, E – электропроводность, P_{tot} / PO₄³⁻ / NO₂¹⁻ / NO₃¹⁻ – содержание общего фосфора / фосфатов / нитритов / нитратов, COD – химическое потребление кислорода.

Глубина в месте отбора проб составляла 2.1–2.8 м, прозрачность – 0.8–2.2 м. Низкая прозрачность отмечалась в августе. Степень прогрева толщи воды в термальной зоне в разные сезоны года была неодинакова. Разница температуры воды между термальной зоной и фоновым участком составила 3.8–8.5 °C для поверхностных слоев воды и 1.6–6.8 °C – для придонных. На фоновом участке верхние горизонты воды были теплее нижних на 0.1–3.3 °C, в термальной зоне – на 0.2–5.4 °C. Отмечена обратная корреляция температуры поверхностного и придонного слоев воды с прозрачностью ($r = -0.965$, $p = 0.008$ – для температуры поверхности и $r = -0.949$, $p = 0.014$ – для температуры дна), а также с содержанием нитратов ($r = -0.947$, $p = 0.015$; $r = -0.918$, $p = 0.028$). Других значимых

корреляций между температурой и абиотическими параметрами среды гидротермальной зоны водохранилища не установлено.

В составе планктона термальной зоны водохранилища выявлено 40 видов, разновидностей и форм планктонных водорослей и 25 таксонов беспозвоночных. В систематическом отношении в фитопланктоне доминировали зеленые, диатомовые и золотистые водоросли (80 % от общего числа таксонов), в зоопланктоне – коловратки (более 40 %). В планктоне преобладали широко распространенные организмы, которые составляли немногим более 70 % от общего числа отмеченных таксонов, на долю гомарктов и палеарктов приходилось около 30 % (Афонин и др., 2014).

Состав доминирующего комплекса но-

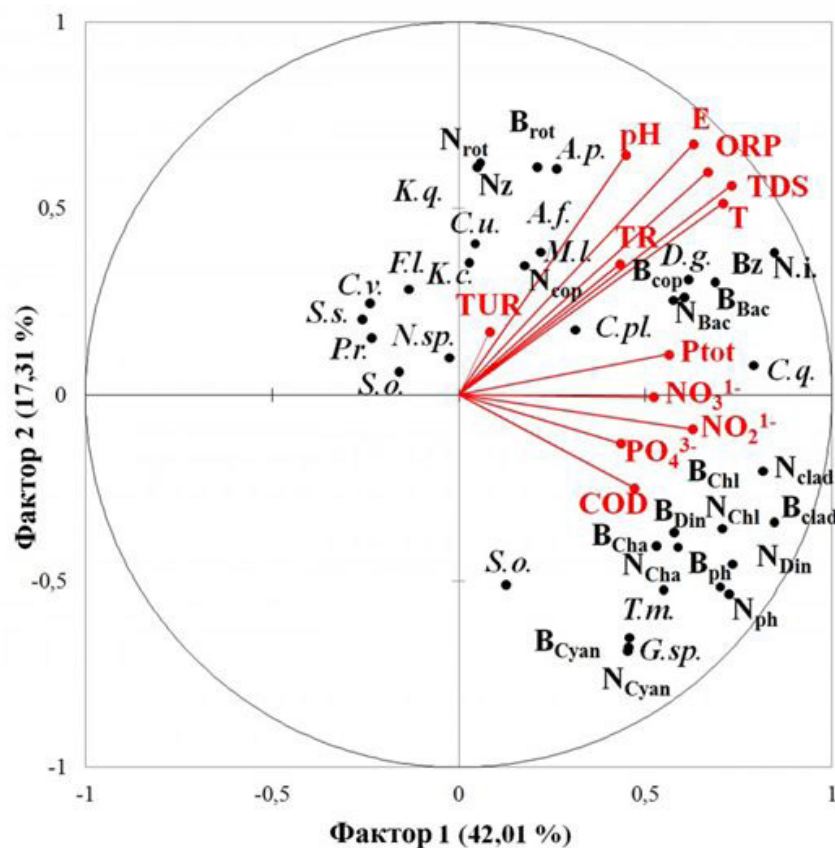


Рис. 5. Проекция векторов (глубина (H), прозрачность воды (TR), минерализация (TDS), pH, температура воды (T), окислительно-восстановительный потенциал (ORP), электропроводность (E), мутность (TUR), общий фосфор (P_{tot}), фосфаты (PO_4), нитраты (NO_3), нитриты (NO_2)), органических и минеральных веществ (COD)) на плоскостях двух – I и II – главных компонент.

n – число видов, N – численность, B – биомасса, ph – фитопланктон, Chl – Chlorophyta, Chr – Chrysophyta, Bac – Bacillariophyta, Din – Dinophyta, Cyan – Cyanobacteria, Cha – Charophyta, Eug – Euglenophyta, численность таких видов, как A. f. – Aphanizomenon flosaquae, G. sp. – Gloeocapsa sp., C. pl. – Cocconeis placentula, T. m. – Tetraëdron minimum, S. s. – Schroederia setigera, S. o. – Scenedesmus obtusus, z – зоопланктон, cop – Copepoda, clad – Cladocera, rot – Rotifera, P. r. – Polyarthra remata, S. o. – Synchaeta oblonga, A. p. – Asplanchna priodonta, K. q. – Keratella quadrata, K. c. – K. cochlearis, C. u. – Conochilus unicornis, F. l. – Filinia longiseta, D. g. – Daphnia galeata, C. q. – Ceriodaphnia quadrangula, N. i. – Neutrodiaptomus incongruens, C. v. – Cyclops vicinus, M. l. – Mesocyclops leuckarti

Fig. 5. Vector projections (depth (H), water transparency (TR), salinity (TDS), pH, water temperature (T), redox potential (ORP), electrical conductivity (E), turbidity (TUR), total phosphorus (P_{tot}), phosphates (PO_4), nitrates (NO_3), nitrites (NO_2)), organic and mineral substances (COD)) on the planes of two main components – I and II.

n – number of species, N – abundance, B – biomass, ph – phytoplankton, Chl – Chlorophyta, Chr – Chrysophyta, Bac – Bacillariophyta, Din – Dinophyta, Cyan – Cyanobacteria, Cha – Charophyta, Eug – Euglenophyta, the number of species such as A. f. – Aphanizomenon flosaquae, G. sp. – Gloeocapsa sp., C. pl. – Cocconeis placentula, T. m. – Tetraëdron minimum, S. s. – Schroederia setigera, S. o. – Scenedesmus obtusus, z – zooplankton, cop – Copepoda, clad – Cladocera, rot – Rotifera, P. r. – Polyarthra remata, S. o. – Synchaeta oblonga, A. p. – Asplanchna priodonta, K. q. – Keratella quadrata, K. c. – K. cochlearis, C. u. – Conochilus unicornis, F. l. – Filinia longiseta, D. g. – Daphnia galeata, C. q. – Ceriodaphnia quadrangula, N. i. – Neutrodiaptomus incongruens, C. v. – Cyclops vicinus, M. l. – Mesocyclops leuckarti

Таблица 6. Основные статистические характеристики абиотических параметров вод Харанорского водохранилища

Параметры, ед. измерения	Статистический показатель			
	минимум	максимум	среднее значение	стандартное отклонение
Глубина, м	5.000	6.000	5.650	0.418
Прозрачность, м	0.800	2.400	1.517	0.674
Температура (поверхность), °C	2.900	25.800	13.150	9.472
Температура (дно), °C	2.800	23.400	11.600	8.383
pH	7.300	8.500	7.767	0.427
Окисляемость, мг O ₂ /л	4.000	12.160	5.840	3.128
БПК ₅ , мг O ₂ /л	1.180	6.610	2.667	1.966
БПК ₂₀ , мг O ₂ /л	1.690	9.450	3.643	2.906
Общая жесткость, мг экв/л	2.500	3.300	2.833	0.294
Цветность, °	10.000	20.000	12.500	4.183
Содержание:				
Fe _{tot} , мг/л	0.070	0.340	0.187	0.111
Si, мг/л	0.003	6.130	2.871	2.306
Cu ²⁺ , мг/л	0.001	0.003	0.002	0.001
Ca ²⁺ , мг/л	28.060	44.090	36.183	5.905
Mg ²⁺ , мг/л	9.730	15.810	12.567	2.131
NH ₄ ⁺ , мг/л	0.150	19.310	3.512	7.742
NO ₃ ⁻ , мг/л	0.070	0.280	0.145	0.090
NO ₂ ⁻ , мг/л	0.002	0.280	0.054	0.111
Cl ⁻ , мг/л	6.050	31.620	12.415	9.705
SO ₄ ²⁻ , мг/л	21.100	67.200	40.658	15.671
PO ₄ ³⁻ , мг/л	0.020	1.710	0.327	0.678
F ⁻ , мг/л	0.040	0.300	0.168	0.098
взвешенные вещества, мг/л	4.000	46.000	14.833	15.626
кислорода, мг/л	5.040	11.090	8.657	2.480
нефтепродуктов, мг/л	0.008	0.009	0.002	0.004
анионоактивных синтетических поверхностно-активных веществ, мг/л	0.167	0.170	0.030	0.069

сил сезонный характер. Для подледного планктона было характерно более раннее и обильное развитие хризифитовой водоросли *Chrysococcus cystophorus* Skuja и младшевозрастных стадий *Cyclops vicinus* Uljanin (73–83 % от общей численности растительного и животного планктона). В июне основными компонентами сообщества в фитопланктоне являлись цианобактерии (*Aphanizomenon flos-aqua* Ralfs ex Bornet & Flahault, виды рода *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont), зеленые (виды рода *Pediastrum* Meyen, *Scenedesmus* Meyen, *Monoraphidium* Komárková-Legnerová) и диатомовые водоросли (*Synedra acus* var. *radians* (Kützinger) Hustedt, виды рода *Aulacoseira* Thwaites), составлявшие в совокупности 95 % от общей численности. В зоопланктоне в этот период

обильно развивались коловратка *Kellicottia longispina* (Kellicott) (86 % от общей численности) и представители веслоногих ракообразных, на долю которых приходилось более 70 % от общей биомассы. В период максимального прогрева вод в толще вод происходило резкое сокращение видового разнообразия альгосообществ и понижение численности беспозвоночных, что, по всей вероятности, обусловлено максимальными значениями температурного показателя и низкими значениями содержания кислорода в этот период. Среди водорослей в массе вегетировала цианобактерия *A. flos-aqua* (92 % от общей численности), у беспозвоночных – мелкие формы зоопланктонов: ювенильные стадии *Thermocyclops crassus* (Fischer) (54 % по численности и 58 % по биомассе) и

молодь *Bosmina longirostris* (O. F. Müller) (43 % и 40 % соответственно). С осенним понижением температуры воды в фитопланктоне продолжили свое развитие цианеи, имеющие более высокий температурный оптимум в водоемах умеренных широт, однако их численность снижалась до 50 % от общего количества водорослей. Возросла доля зеле-

ных водорослей (до 35 %). В зоопланктоценозе преобладали половозрелые особи *B. longirostris*, формирующие 60 % всей численности и 67 % всей биомассы.

Изменение численности и биомассы водорослей и беспозвоночных планктона в литоральной зоне антропогенной гидротермальной в 2013 г. приведено в табл. 7.

Таблица 7. Изменение количественных характеристик планктона антропогенной гидротермальной Харанорского водохранилища в 2013 г.

Месяц отбора	Фитопланктон			Зоопланктон		
	<i>N</i> , тыс. кл./л	<i>B</i> , мг/м ³	число видов	<i>N</i> , тыс. экз./м ³	<i>B</i> , мг/м ³	число видов
Февраль	80.98	46.83	28	8.42	208.72	4
Апрель	819.59	551.3	29	48.72	182.99	9
Июнь	171.54	395.71	40	652.24	1430.4	10
Август	1208.91	244.35	20	182.5	1635.29	12
Октябрь	50.54	18.86	32	101.72	1101.36	6

Примечание. *N* – численность, *B* – биомасса.

Компонентный анализ переменных позволил выделить три компоненты, определяющие более 79 % дисперсии фактических данных (табл. 8). Доля остальных компонент в общей дисперсии незначительна.

Первая компонента характеризуется существенной положительной связью с прозрачностью, содержанием нитратов, фосфатов, кислорода и отрицательной связью с

температурой, содержанием анионоактивных синтетических поверхностно-активных веществ и сульфатов, активным водородным показателем и окисляемостью (табл. 9), определяя структурные характеристики цианобактерий, харовых и эвгленовых водорослей, а также зоопланктона (в большей степени ветвистых и веслоногих ракообразных) (рис. 6).

Таблица 8. Результаты компонентного анализа массива данных для Харанорского водохранилища

Главные компоненты	Собственные числа	Доля дисперсии (%)	Суммарная накопленная дисперсия (%)
1	25.56	39.32	39.32
2	14.98	23.05	62.37
3	11.41	17.56	79.92
4	7.06	10.86	90.79
5	5.99	9.21	100

Вторая компонента проявляет высокую отрицательную связь с жесткостью, содержанием кремния, меди и положительную связь с хлорид-ионами. С ними положительную связь проявляют биомасса фитопланктона, а отрицательную – структурные характеристики зоопланктона (общая численность, биомасса, число видов) (см. табл. 9, рис. 6).

Третья компонента тесно связана с глубиной, содержанием магния, аммония, нитритов, биохимическим потреблением кислорода (положительная связь), а также содержанием нефтепродуктов и кальция (отрицательная связь). Она определяет чис-

ленность фитопланктона (в частности, количественные характеристики динофитовых) и численность коловраток (см. табл. 9, рис. 6).

Обсуждение

Термический режим в водоемах-охлаждающих (Харанорское водохранилище и озеро-охлаждающее Кенон) определяется не только климатическими особенностями и морфометрическими показателями, но и изменениями гидродинамических процессов, объемом сброса теплых вод, разностью температур забираемой и сбрасываемой воды. В оз. Кенон наибольшая разница между тем-

Таблица 9. Факторные нагрузки абиотических параметров для выделенных главных компонент Харанорского водохранилища

Параметр	Факторы		
	1	2	3
H	-0.419	0.138	0.798
TR	0.919	0.051	-0.052
T _c	-0.928	0.221	-0.156
T _b	-0.947	0.268	-0.024
Fe _{tot}	0.438	0.56	0.375
Si	-0.194	-0.845	-0.065
Cu ²⁺	0.438	-0.76	0.323
Ca ²⁺	0.195	-0.5	-0.829
Mg ²⁺	-0.14	-0.286	0.874
NH ₄ ¹⁺	0.238	-0.032	0.764
NO ₃ ¹⁻	0.917	-0.18	0.151
NO ₂ ¹⁻	0.048	0.428	0.748
Cl ¹⁻	-0.071	0.669	-0.302
SO ₄ ²⁻	-0.853	-0.234	-0.155
PO ₄ ³⁻	0.869	0.245	0.253
F ¹⁻	0.031	0.478	0.061
pH	-0.766	-0.262	0.294
TS	0.062	-0.916	-0.057
O ₂	0.913	0.316	-0.015
[O]	-0.899	-0.25	0.327
BOD ₅	-0.586	0.302	0.735
BOD ₂₀	-0.585	0.305	0.734
ASPAV	-0.916	-0.289	0.189
Oil	-0.287	0.526	-0.791
SS	-0.367	-0.08	0.45
Col	-0.669	-0.618	0.402

Примечание. H – глубина, TR – прозрачность, T_c – температура поверхности, T_b – температура придонная, Fe_{tot} – содержание железа, Si / Cu²⁺ / Ca²⁺ / Mg²⁺ / NH₄¹⁺ – содержание кремния / меди / кальция / магния / аммония, NO₃¹⁻ / NO₂¹⁻ / Cl¹⁻ / SO₄²⁻ / F¹⁻ – содержание нитратов / нитритов / хлоридов / сульфатов / фторидов, TS – общая жесткость, O₂ – содержание кислорода, [O] – окисляемость, BOD₅ – БПК₅, BOD₂₀ – БПК₂₀, ASPAV – анионоактивные синтетические поверхностно-активные вещества, Oil – нефтепродукты, SS – взвешенные вещества, Col – цветность.

пературой воды в термальной зоне и остальной частью водоема составляла не более 10 °С, в Харанорском водохранилище – 9.2–11.5 °С. Растекание в поверхностном слое теплых вод приводит к вертикальной термической стратификации. В термальной зоне озера-охладителя разница температур между слоями составляла до 9 °С, в пруду-охладителе – 8–10 °С. Наибольшая разница температур между слоями в озере отмечалась в зимний период, в водохранилище – в летний.

Большинство отмеченных гидробионтов водоемов-охладителей являются обитателями широкого температурного диапазона. Повышение температуры воды и улучшение

светового и кислородного режимов (отсутствие льда) способствуют увеличению вегетационного сезона в термальной зоне водоемов-охладителей. Как отмечает ряд исследователей (Суздалева, 2000; Безносков и др., 2001; Ezra et al., 2001; Токарева, 2004; Poornima et al., 2005; Zębek, 2013; Kulakov et al., 2018; Muthulakshmi et al., 2019), реакция на увеличение температуры среды проявляется: у водорослей планктона – в удлинении сроков вегетации и увеличении биомассы, у беспозвоночных – в удлинении сроков активной жизнедеятельности, увеличении количества генераций и переходе к ацикли. При этом ход сезонных изменений гидробион-

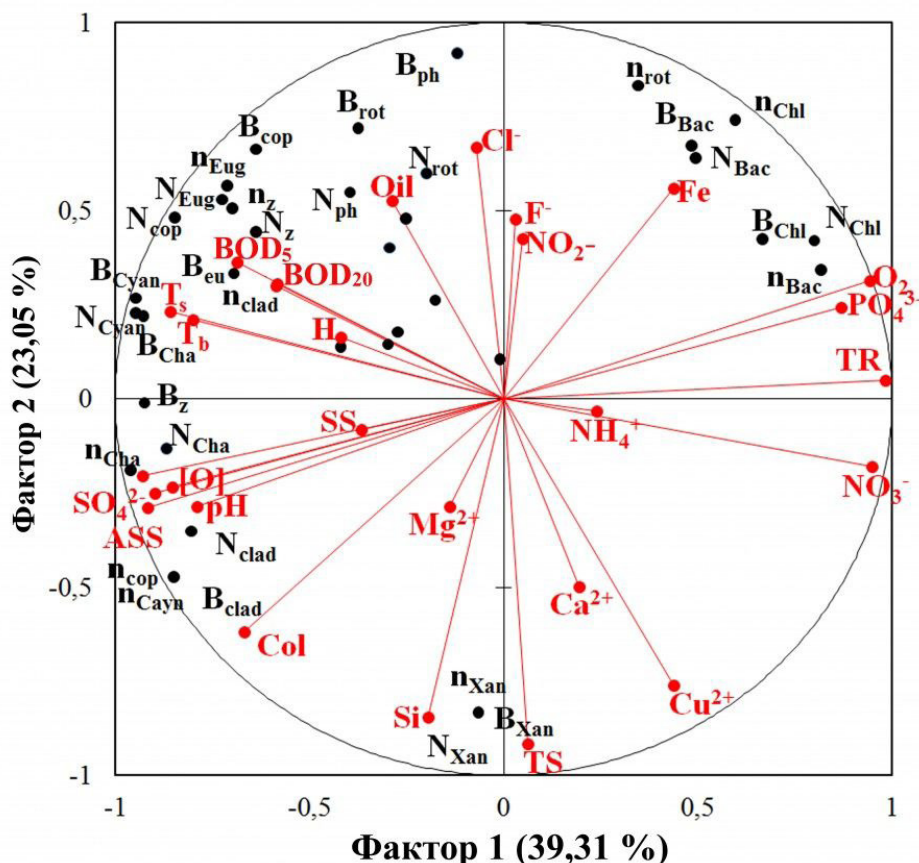


Рис. 6. Проекция векторов (глубина (H), прозрачность воды (TR), pH, температура воды (Ts (поверхность) T_b (дно)), мутность (TUR), фосфаты (PO₄), нитраты (NO₃), нитриты (NO₂), хлориды (Cl¹⁻), сульфаты (SO₄²⁻), фториды (F¹⁻), аммоний (NH₄¹⁺), кремний (Si), медь (Cu²⁺), кальций (Ca²⁺), магний (Mg²⁺), взвешенные вещества (SS), содержание кислорода (O₂), анионоактивные синтетические поверхностно-активные вещества (ASS), БПК₅ (BOD₅), БПК₂₀ (BOD₂₀), окисляемость ([O]), цветность (Col), общая жесткость (TS), нефтепродукты (Oil)) на плоскостях двух – I и II – главных компонент.

n – число видов, N – численность, B – биомасса, ph – фитопланктон, Chl – Chlorophyta, Chr – Chrysophyta, Bac – Bacillariophyta, Din – Dinophyta, Xan – Xantophyta, Cyan – Cyanobacteria, Cha – Charophyta, Eug – Euglenophyta, z – зоопланктон, cop – Copepoda, clad – Cladocera, rot – Rotifera

Fig. 6. Vector projections (depth (H), water transparency (TR), pH, water temperature (T (surface), T^b (bottom)), turbidity (TUR), phosphates (PO₄³⁻), nitrates (NO₃¹⁻), nitrites (NO₂¹⁻), chlorides (Cl¹⁻), sulfates (SO₄²⁻), fluorides (F¹⁻), ammonium (NH₄¹⁺), silicon (Si), copper (Cu²⁺), calcium (Ca²⁺), magnesium (Mg²⁺), suspended solids (SS), oxygen content (O₂), anionic synthetic surfactants (ASS), BPK₅ (BOD₅), BPK₂₀ (BOD₂₀), oxidizability ([O]), color (Col), total hardness (TS), oil products (Oil)) on the planes of two main components – I and II.

тов аналогичен участкам без влияния тепла (Афонин и др., 2014; Афонина и др., 2017б). Для литоральной зоны антропогенной гидротермальной обследованных водоемов-охладителей существенных различий в пространственно-временной динамике количественных показателей планктонных биоценозов не отмечено. Состав и структура гидробионтов в обогреваемой литорали незначительно отличались от удаленных участков, где температурный режим близок к естественному (Афонина и др., 2017а, б). Отсутствие закономерности в распределении организмов в разных по температуре зонах связано с мелководностью и малой площадью водоемов.

В небольших водоемах такое распределение очень мобильно вследствие влияния господствующего ветрового перемешивания (Буторин и др., 1975) и интенсивной циркуляции воды (Кириллов и др., 2004; Афонина, 2012).

Исследованиями показана корреляционная связь между показателями температуры воды и прозрачности. Для антропогенной гидротермальной пруда-охладителя Харанорской ГРЭС корреляция между этими показателями отрицательная, для озера-охладителя Кенон – положительная. Уменьшению прозрачности воды в водохранилище в период максимального прогрева воды способствует интенсивное цветение цианобактерий (Афонин и

др., 2014), что препятствует проникновению света. В оз. Кенон в исследовательский период бурного развития цианей не отмечалось. Основу численности фитопланктона в течение вегетационного сезона в термальной зоне определяли преимущественно мелко-клеточные хлорококковые водоросли (Афонина и др., 2017а, б), мало препятствующие проникновению света на глубину.

Метод главных компонент показал, что температурный фактор в литорали антропогенной гидротермальной оз. Кенон является менее значимым по сравнению с Харанорским водохранилищем, что, вероятно, связано с большей термической нагрузкой на этот водоем, его меньшей площадью и высоким водообменом (Афонин и др., 2014; Афонина, 2012). В термальной зоне озера Кенон наибольшей факторной нагрузкой обладали показатели содержания растворенных солей и других примесей (электропроводность, pH, минерализация). Эти взаимосвязанные между собой параметры напрямую зависят от температуры. Температурный фактор не может быть единственным механизмом, определяющим функционирование гидробиоценозов, но может вносить существенный вклад в действие других факторов (Денисов, Кашулин, 2012).

Заключение

Фито- и зоопланктон литорали антропо-

генной гидротермальной водоемов-охладителей — озера-охладителя Кенон и Харанорского водохранилища — формируется повсеместно встречающимися аборигенными видами с широким температурным диапазоном. Основной реакцией гидробионтов на увеличение температуры среды является удлинение периодов вегетации и активной жизнедеятельности и сдвиг сроков развития гидробионтов в сторону увеличения биомассы водорослей, количества генераций зоопланктеров и их переходу к ациклии. В период максимального прогрева в оз. Кенон отмечается увеличение видового разнообразия и количественного развития водорослей и беспозвоночных, в Харанорском водохранилище, наоборот, снижение. Основными факторами, обуславливающими развитие планктонных биоценозов для литоральной зоны антропогенной гидротермальной озера-охладителя Кенон, являются (по убыванию значимости) электропроводность, pH, общее содержание растворенных веществ и температура; для Харанорского водохранилища — температура, прозрачность, концентрация нитратов и растворенного кислорода. Чрезмерное повышение температуры воды в Харанорском водохранилище способствовало развитию цианобактерий и уменьшению групп желтозеленых водорослей, коловраток и копепод.

Библиография

- Афонин А. В., Афонина Е. Ю., Ташлыкова Н. А., Горлачева Е. П., Цыбекмитова Г. Ц., Куклин А. П., Базарова Б. Б., Салтанова Н. В. Современное состояние экосистемы водоема-охладителя Харанорской ГРЭС и оценка эффективности вселения растительноядных рыб // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы: Материалы V Всерос. конф. по водной экотоксикологии. Ярославль: Филигрань, 2014. С. 115–118.
- Афонина Е. Ю. Зоопланктон наливного водохранилища-охладителя Харанорской ГРЭС (Забайкалье): динамика формирования разнообразия и экология : Дис. ... канд. биол. наук. Чита: ИПРЭК СО РАН, 2012. 186 с.
- Афонина Е. Ю., Ташлыкова Н. А., Базарова Б. Б. Современный видовой состав и структура сообществ гидробионтов озера Кенон (Забайкальский край) // Бюллетень МОИП. Отд. Биол. 2017а. Т. 122. № 1. С. 71–83.
- Афонина Е. Ю., Ташлыкова Н. А., Итигилова М. Ц. Пространственно-временная динамика планктонных сообществ озера Кенон (по данным 2010–2015 гг.) // Вода: химия и экология. 2017б. № 2. С. 42–50.
- Балушкина Е. В., Винберг Г. Г. Зависимость между массой и длиной тела у планктонных животных // Общие основы изучения водных экосистем. Л.: Наука, 1979. С. 169–172.
- Безносков В. Н., Кучкина М. А., Суздалева А. Л. Исследование процесса термического эвтрофирования в водоемах-охладителях АЭС // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 4. С. 610–615.
- Безносков В. Н., Суздалева А. Л. Антропогенная гидротермаль: общая характеристика биотопа и возможная роль в климатогенных изменениях водной биоты // Водные экосистемы и организмы-3: Материалы науч. конф. М.: МАКС Пресс, 2001. С. 48–50.
- Бутенко М. Н., Цыбекмитова Г. Ц. Динамика биогенных элементов (азот и фосфор) в озере Кенон // Экология водоемов-охладителей: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. / Отв. ред. Г. Ц. Цыбекмитова. Чита: ЗабГУ, 2017. С. 29–32.
- Буторин Н. В., Курдина Т. Н. Особенности температурного режима Иваньковского водохранилища

- в условиях искусственного подогрева // Экология организмов водохранилищ-охладителей. Л.: Наука, 1975. С. 70–142.
- Водоем-охладитель Харанорской ГРЭС и его жизнь. Новосибирск: СО РАН, 2005. 192 с.
- Денисов Д. Б., Кашулин Н. А. Современное состояние водорослевых сообществ планктона в зоне влияния Кольской АЭС (оз. Имандра) // Труды Кольского научного центра. 2012. Т. 3. № 16. С. 70–96.
- Кириллов В. В., Зарубина Е. Ю., Митрофанова Е. Ю., Яныгина Л. В., Крылова Е. Н. Биологическая оценка последствий термического загрязнения водоема-охладителя Беловской ГРЭС // Ползуновский вестник. 2004. № 2. С. 133–141.
- Лунева Е. В. Оценка влияния атомных электростанций России на экосистемы водоемов-охладителей // Известия КГТУ. 2014. № 34. С. 20–33.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. Л., 1982. 33 с.
- Садчиков А. П. Методы изучения пресноводного фитопланктона. М: Университет и школа, 2003. 159 с.
- Суздалева А. Л. Унифицированная методика исследования экологического состояния водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций // Региональная экология. 2000. № 1–2. С. 58–61.
- Токарева О. Ю. Комплексный анализ изменения состояния водоема-охладителя ТЭС и возможные пути его восстановления (на примере озера в г. Чите) : Дис. ... канд. техн. наук. Чита: ЗабГУ, 2004. 127 с.
- Шипунов А. Б., Балдин Е. М., Волкова П. А., Коробейников А. И., Назарова С. А., Петров С. В., Суфиянов В. Г. Наглядная статистика, используем R! . М.: ДМК Пресс, 2014. 298 с.
- Экология городского водоема. Новосибирск: СО РАН, 1998. 260 с.
- Ezra A. G., Nwankwo D. I. Composition of phytoplankton algae in Gubi Reservoir, Bauchi, Nigeria // J. Aquat. Sci. 2001. Vol. 16. No 2. P. 115–118. DOI: 10.4314/jas.v16i2.20016.
- Guiry M. D., Guiry G. M. Algaebase. World-wide electronic publication (Galway: National University of Ireland). URL: <http://www.algaebase.org/> (дата обращения: 10.01.2019).
- Kulakov D. V., Makushenko M. Ye., Vereshchagina Ye. A. Influence of Heated Waters Discharge on Zooplankton of Various Cooling Ponds of Nuclear Power Stations // Hydrobiological Journal. 2018. Vol. 54. No 3. P. 60–74. DOI: 10.1615/Hydrobi.v54.i3.60.
- Kuklin A. P., Tsybekmitova G. T., Gorlacheva E. P., Bazarova B. B., Afonin A. V. The ecosystem of lake Kenon: past and present (Transbaikal territory, Russia) // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2016. Vol. 34. No 3. P. 507–516. DOI: 10.1007/s00343-016-4285-0.
- Korotkova T. G., Bushumov S. A., Burlaka S. D., Istoshina N. Yu., Siukhov H. R. Influence of heat-and-power enterprises on the hydrosphere // International Journal of GEOMATE. 2018. Vol. 15. No 48. P. 99–106.
- Muthulakshmi A. L., Natesan U., Ferrer V. A., Deepthi K., Venugopalan V. P., Narasimhan S. V. Impact assessment of nuclear power plant discharge on zooplankton abundance and distribution in coastal waters of Kalpakkam, India // Ecological Processes Ecological Processes. 2019. Vol. 8. No 22. P. 1–10. DOI: 10.1186/s13717-019-0173-9.
- Ponomareva Y. A., Ivanova E. A. Ratio between living and dead cells and the size structure of the Yenisei River phytoplankton downstream of the Krasnoyarsk Hydroelectric Power Station // Contemporary Problem of Ecology. 2016. Vol. 9. No 5. P. 582–589. DOI: 10.1134/S1995425516050115.
- Poornima E. H., Rajadurai M., Rao T. S., Anupkumar B., Rajadurai M., Rajamohan R., Narasimhan S. V., Rao V. N. R., Venugopalan V. P. Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton // Journal of Thermal Biology. 2005. Vol. 30. No 4. P. 307–316. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2005.01.004.
- Ruttner-Kolisko A. Suggestions for biomass calculation of plankton rotifers // Arch. Hydrobiol. 1977. No 8. P. 71–76.
- Zębek E. Phytoplankton-nutrient relationships in years with various water levels in the Pasłęka River in the vicinity of the hydroelectric power station (North-east Poland) // Russian Journal of Ecology. 2013. Vol. 44. No 6. P. 492–499. DOI: 10.1134/S1067413613060143.

Благодарности

Авторы искренне благодарят сотрудников лаборатории водных экосистем ИПРЭК СО РАН за помощь в отборе планктонных проб.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований СО РАН (проект № IX.137.1.1.).

DEVELOPMENT OF PLANKTONIC BIOCENOSSES OF LITTORAL ZONE UNDER ANTHROPOGENIC HYDROTHERMAL CONDITIONS OF COOLING PONDS

TASHLYKOVA
Natalya Aleksandrovna

PhD, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, NatTash2005@yandex.ru

AFONINA
Ekaterina Yuryevna

PhD, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, kataf@mail.ru

Keywords:

plankton
littoral
anthropogenic
hydrothermal conditions
cooling pond

Summary: The most noticeable change in the water environment as a result of the operation of the power plant is an increase in water temperature. Any areas that are directly affected by the discharge of heated water can be considered as subjected to a kind of anthropogenic hydrothermal conditions. The study of the relationship between abiotic and biotic parameters of such extreme ecosystems is important for understanding the biological efficiency of ecosystems of hydraulic structures and factors of changes in trophic status. This article analyzes the relationship between the environmental factors of the hydrothermal zone and the main characteristics of the plankton population in the reservoir of the Kharanor RPS and the cooling lake of the Chita Kenon TPP. The main factors that determine the development of planktonic biocenoses in the littoral zone of the anthropogenic hydrothermal zone of Lake Kenon are (in descending order of importance) electrical conductivity, pH, total content of dissolved substances and temperature. In the Haranor reservoir they are temperature, transparency, content of nitrates and dissolved oxygen. Cyanobacteria and Cladocera are most sensitive to environmental factors in Lake Kenon, while yellow – green algae, Rotifera and Copepoda are most sensitive in the Haranor reservoir.

Received on: 23 January 2020

Published on: 26 December 2020

References

- Afonin A. V. Afonina E. Yu. Tashlykova N. A. Gorlacheva E. P. Cybekmitova G. C. Kuklin A. P. Bazarova B. B. Saltanova N. V. The current state of the ecosystem of the reservoir-cooler of the Kharanorskaya RPS and assessment of the effectiveness of the introduction of herbivorous fish, *Antropogennoe vliyaniye na vodnye organizmy i ekosistemy: Materialy V Vserop. konf. po vodnoy ekotoksikologii*. Yaroslavl': Filigran', 2014. P. 115–118.
- Afonina E. Yu. Tashlykova N. A. Bazarova B. B. Modern species composition and structure of aquatic organisms of Lake Kenon (Transbaikalia Territory), *Byulleten' MOIP. Otd. Biol.* 2017a. T. 122. No. 1. P. 71–83.
- Afonina E. Yu. Tashlykova N. A. Itigilova M. C. Spatial-temporal dynamics of planktonic communities of Lake Kenon (according to 2010–2015), *Voda: himiya i ekologiya*. 2017b. No. 2. P. 42–50.
- Afonina E. Yu. Zooplankton of the bulk reservoir-cooler of the Kharanorskaya RPS (Transbaikalia): dynamics of diversity formation and ecology: *Dip. ... kand. biol. nauk*. Chita: IPREK SO RAN, 2012. 186 p.
- Balushkina E. V. Vinberg G. G. Dependence between mass and body length in planktonic animals, *Obschie osnovy izucheniya vodnykh ekosistem*. L.: Nauka, 1979. P. 169–172.
- Beznosov V. N. Kuchkina M. A. Suzdaleva A. L. Investigation of the process of thermal eutrophication in cooling ponds of nuclear power plants, *Vodnye resursy*. 2002. T. 29. No. 4. P. 610–615.
- Beznosov V. N. Suzdaleva A. L. Anthropogenic hydrothermal: general characteristics of the biotope and a possible role in the climatogenic changes of aquatic biota, *Vodnye ekosistemy i organizmy-3: Materialy nauch. konf. M.: MAKSS Press*, 2001. P. 48–50.
- Butenko M. N. Cybekmitova G. C. Dynamics of nutrients (nitrogen and phosphorus) in Lake Kenon, *Ekologiya vodoemov-ohladiuteley: Materialy Vserop. nauch. prakt. konf., Otv. red. G. C. Cybekmitova*. Chita: ZabGU, 2017. P. 29–32.

- Butorin N. V. Kurdina T. N. Features of the temperature regime of the Ivankovo reservoir under conditions of artificial heating, *Ekologiya organizmov vodohranilisich-ohladiteley*. L.: Nauka, 1975. P. 70–142.
- Denisov D. B. Kashulin N. A. The current state of algal plankton communities in the zone of influence of the Kola NPP (Lake Imandra), *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra*. 2012. T. 3. No. 16. P. 70–96.
- Ecology of a city reservoir. Novosibirsk: SO RAN, 1998. 260 p.
- Ezra A. G., Nwankwo D. I. Composition of phytoplankton algae in Gubi Reservoir, Bauchi, Nigeria, *J. Aquat. Sci.* 2001. Vol. 16. No 2. P. 115–118. DOI: 10.4314/jas.v16i2.20016.
- Guidelines for the collection and processing of materials during hydrobiological studies in freshwater reservoirs. Zooplankton and its products. L., 1982. 33 p.
- Guiry M. D., Guiry G. M. *Algaebase*. World-wide electronic publication (Galway: National University of Ireland). URL: <http://www.algaebase.org/> (data obrascheniya: 10.01.2019).
- Kirillov V. V. Zarubina E. Yu. Mitrofanova E. Yu. Yanygina L. V. Krylova E. N. Biological assessment of the effects of thermal pollution of the reservoir-cooler of the Belovskaya TPP, *Polzunovskiy vestnik*. 2004. No. 2. P. 133–141.
- Korotkova T. G., Bushumov S. A., Burlaka S. D., Istoshina N. Yu., Siukhov H. R. Influence of heat-and-power enterprises on the hydrosphere, *International Journal of GEOMATE*. 2018. Vol. 15. No 48. P. 99–106.
- Kuklin A. P., Tsybekmitova G. T., Goralcheva E. P., Bazarova B. B., Afonin A. V. The ecosystem of lake Kenon: past and present (Transbaikal territory, Russia), *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 2016. Vol. 34. No 3. P. 507–516. DOI: 10.1007/s00343-016-4285-0.
- Kulakov D. V., Makushenko M. Ye., Vereshchagina Ye. A. Influence of Heated Waters Discharge on Zooplankton of Various Cooling Ponds of Nuclear Power Stations, *Hydrobiological Journal*. 2018. Vol. 54. No 3. P. 60–74. DOI: 10.1615/Hydrobj.v54.i3.60.
- Luneva E. V. Assessment of the impact of nuclear power plants in Russia on the ecosystems of cooling ponds, *Izvestiya KGTU*. 2014. No. 34. P. 20–33.
- Muthulakshmi A. L., Natesan U., Ferrer V. A., Deepthi K., Venugopalan V. P., Narasimhan S. V. Impact assessment of nuclear power plant discharge on zooplankton abundance and distribution in coastal waters of Kalpakkam, India, *Ecological Processes*. 2019. Vol. 8. No 22. P. 1–10. DOI: 10.1186/s13717-019-0173-9.
- Ponomareva Y. A., Ivanova E. A. Ratio between living and dead cells and the size structure of the Yenisei River phytoplankton downstream of the Krasnoyarsk Hydroelectric Power Station, *Contemporary Problem of Ecology*. 2016. Vol. 9. No 5. P. 582–589. DOI: 10.1134/S1995425516050115.
- Poornima E. H., Rajadurai M., Rao T. S., Anupkumar B., Rajadurai M., Rajamohan R., Narasimhan S. V., Rao V. N. R., Venugopalan V. P. Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton, *Journal of Thermal Biology*. 2005. Vol. 30. No 4. P. 307–316. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2005.01.004.
- Reservoir-cooler of the Kharanor RPS and its life. Novosibirsk: SO RAN, 2005. 192 p.
- Ruttner-Kolisko A. Suggestions for biomass calculation of plankton rotifers, *Arch. Hydrobiol.* 1977. No 8. P. 71–76.
- Sadchikov A. P. *Methods of studying freshwater phytoplankton*. M: Universitet i shkola, 2003. 159 p.
- Shipunov A. B. Baldin E. M. Volkova P. A. Korobeynikov A. I. Nazarova S. A. Petrov S. V. Sufiyanov V. G. *Visual statistics, we use R!*. M.: DMK Press, 2014. 298 p.
- Suzdaleva A. L. Unified methodology for the study of the ecological state of cooling ponds of thermal and nuclear power plants, *Regional'naya ekologiya*. 2000. No. 1–2. P. 58–61.
- Tokareva O. Yu. A comprehensive analysis of changes in the state of the reservoir-cooler of TPPs and possible ways of its restoration (on the example of a lake in the Chita city): *Dip. ... kand. tehn. nauk*. Chita: ZabGU, 2004. 127 c.
- Zębek E. Phytoplankton-nutrient relationships in years with various water levels in the Pasłęka River in the vicinity of the hydroelectric power station (North-east Poland), *Russian Journal of Ecology*. 2013. Vol. 44. No 6. P. 492–499. DOI: 10.1134/S1067413613060143.



УДК 591.543.1

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ РЕПТИЛИЙ (НА ПРИМЕРЕ ОБЫКНОВЕННОЙ ГАДЮКИ, *VIPERA BERUS* L.)

КОРОСОВ
Андрей Викторович

д. б. н., Петрозаводский государственный университет,
korosov@psu.karelia.ru

ГАНЮШИНА
Наталья Дмитриевна

Петрозаводский государственный университет,
ekoni@mail.ru

Ключевые слова:
рептилии
гадюка
температура
терморегуляция

Аннотация: Представлен анализ многолетних исследований термобиологии обыкновенной гадюки, в том числе с использованием логгеров, минидатчиков регистрации температуры тела живой особи. Рассматривается серия традиционных и оригинальных показателей, характеризующих способности обыкновенной гадюки регулировать температуру своего тела. Показано, что так называемые термоэкологические показатели в большей мере характеризуют условия пребывания животных, но не их способности к терморегуляции. В число термофизиологических показателей входят параметры как с хорошими, так и с неудовлетворительными статистическими свойствами (по величине изменчивость и устойчивость). Наибольшей устойчивостью обладает показатель, характеризующий физиологические способности особи или группы особей, – максимальная типичная температура, оцененная регрессионно-квантильным методом. Максимальная типичная температура трактуется как верхний порог толерантности, т. е. истинная видовая максимальная температура тела. Основной параметр терморегуляции гадюки – максимальная добровольная температура, которая фиксируется в момент избегания животным перегрева. Для фиксации максимальной добровольной температуры необходимы непрерывные наблюдения как за температурой тела, так и за поведением рептилии, что делает расчет параметра максимальной добровольной температуры достаточно сложным и трудоемким. Самым простым для оценки основного параметра терморегуляции (максимальной добровольной температуры) оказался показатель медианной активной температуры для выборки выше 30 °C (близкий к температуре «полной активности»). Для сопоставления разных групп животных категорически не рекомендуется использовать статистические показатели, оценивающие диапазон изменчивости обычных дневных температур или их усреднение.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 15 декабря 2020 года

Подписана к печати: 28 декабря 2020 года

Введение

Рептилии эктотермные, но теплолюбивые животные, и в умеренной полосе суточный ход температуры их тела охватывает очень широкий диапазон (примерно от 5 до 40 °C). Величина этого диапазона очень близка даже у разных видов умеренных широт, не

говоря о представителях одного вида. Это обстоятельство сильно затрудняет сравнение характеристик терморегуляции разных групп животных.

Ситуацию усугубляет все еще распространенный метод сбора данных (полевые замеры температуры тела у отдельных единичных представителей), который дает очень

ограниченные объемы выборок случайных температур. С появлением миниатюрных датчиков температуры (логгеров), которые можно вживить в полость тела, появилась возможность записывать большое количество показаний температуры для многих особей в любое время суток на протяжении длительных периодов жизни.

Большой объем собираемых таким способом данных позволяет вести поиск статистически обоснованных показателей способности рептилий к терморегуляции. Этому вопросу посвящены несколько наших последних публикаций (Коросов, Ганюшина, 2019, 2021). К сожалению, экологическое содержание этих публикаций заставляло сокращать описание достаточно сложных методов, поэтому мы решили посвятить отдельную публикацию только методическим вопросам.

Цель настоящего сообщения состоит в том, чтобы показать подходы к конструированию термобиологических характеристик и предложить ряд показателей, которые позволят выполнять статистически обоснованные сравнения этих показателей для разных групп рептилий.

Материалы

Работы проводились в теплый сезон 2017–2019 гг. на стационаре Института биологии КарНЦ РАН «Гомсельга» (N62.068310°, E33.958824°). Во время эксперимента несколько особей обыкновенной гадюки (*Vipera berus* L.) жили в вольере размером 8 * 8 м; ночевали в убежище (размером 1.5 * 1.5 * 1 м), сложенном из булыжников 10 на 15 см, в дневное время выползали наружу погреться под лучами солнца. На площадке находился «водоем» в виде вкопанного в землю таза с водой, прикрытого досками. В вольеру периодически выпускали лягушек разного размера в качестве объектов питания, зафиксированы случаи охоты гадюк в вольере. Исследовали температуру 23 взрослых особей обыкновенной гадюки. Температуру регистрировали с помощью логгеров ДТНЗ-28 (масса 1 г, объем 0.8 мл, точность измерения ± 0.1 °C, рабочий диапазон от -15 до +60 °C, производство ООО «ЭМБИ РЕСЕРЧ») и ds1921, вживленных под кожу спины примерно посередине туловища (операция проводилась в течение 1–2 мин. на животных, охлажденных до 4–5 °C). Поведение фиксировалось на видео web-камерой, камерами «Ssocco» и «Xiaomi Yi Lite» в режиме замедленной съемки 1 кадр

в 1 секунду. Для идентификации змей их метили разноцветным лаком. Логгеры ds1921 и ДТНЗ-28 были настроены для сбора температуры через каждые 2 мин. в течение всего периода наблюдений. Параллельно с наблюдениями за змеями велась запись температуры воздуха в негустой траве (высотой 10–15 см) и на солнцепеке («черный логгер»). Общая продолжительность наблюдений составила 19 дней в 2017 г., 20 дней 2018 г., 30 дней в 2019 г.

Все наблюдения в среде Excel организованы в базу данных и импортированы в формат CSV. База данных имеет следующие поля: год, месяц, час, минута, номер особи, пол, масса, длина тела, текущая температура особи, текущая температура в траве, в укрытии, на открытом месте («черный логгер»), номер позы (0 – плоская, 1 – круглая, 2 – полукольцо, 3 – кольцо, 4 – клубок), характер движений (0 – в укрытии, 1 – на поверхности, 2 – перемещается), рабочие составные ключи. Одна запись соответствует текущему наблюдению за одной особью в данный момент времени (с обычным шагом 2, часть наблюдений сделана с шагом 1 или 8 мин). Всего для 23 особей число записей составляет 286400.

Вся количественная обработка (поиск, фильтрация данных, составление выборок, расчет показателей) выполнена в среде пакета R (R Core Team, 2012).

Традиционные методы исследований

История изучения термобиологии рептилий достаточно продолжительна (Черлин, 2019а, 2019б). Однако до сих пор нет определенности в адекватных методах описания способности рептилий к активной терморегуляции. Здесь мы будем рассматривать не все показатели термобиологии рептилий, но остановимся только на тех, которые выражают их способность регулировать температуру тела. Характеризуя разные виды и удаленные популяции по их способности поддерживать «оптимальную» температуру тела, обычно применяют ограниченный набор показателей. Как правило, это статистическое обобщение полевых наблюдений, т. е. характеристики малочисленных выборок значений температуры тела, полученных в полевых условиях вручную, а также некоторое множество показателей, полученных при лабораторном содержании животных и их испытаниях в термоградиент-приборах. К типичными характеристиками температурных предпочтений рептилий, которые рас-

смаатриваются как показатели способности к терморегуляции, относятся примерно пять показателей. Это диапазон «оптимальных» температур (наблюдаемых обычно в течение теплого времени суток), средняя для этого диапазона температура тела, максимальная зарегистрированная температура тела, преферентная температура (как средняя температура субстрата, выбранная животными в термоградиент-приборе), диапазон температур полной активности (Черлин, 2010). К сожалению, даже появление миниатюрных логгеров, регистрирующих температуру тела рептилии, не привело к появлению новых адекватных методов ее анализа. Обработка этих показаний мало отличается от обработки выборок ручных замеров, выполненных в полевых условиях. Как правило, рассчитывают средние значения температуры тела групп животных, которые относятся уже не ко всему теплоту времени, а к определенному часу наблюдений; смысл работы состоит в сравнении этих статистических показателей, полученных для разных видов (Lourdais et al., 2013).

Все перечисленные выше показатели имеют существенные технические или теоретические недостатки и, на наш взгляд, практически не годятся для ответственного сравнения разных групп животных. Полевые замеры максимальной температуры тела из-за своей единичности обладают плохими статистическими свойствами. Преферентные температуры определяются только в искусственных условиях, возможно, меняющих отношение животных к теплоте, к тому же требуют дорогостоящего оборудования. Диапазон размаха типичных температур тела и его средние оценки характеризуют по большей части тепловые условия, воздействующие на особь в данный момент времени, а не их потребности в тепле или терморегуляторное поведение.

На наш взгляд, основная причина конструирования неудачных показателей состоит в том, что теория терморегуляции рептилий находится еще в зачаточном состоянии в отличие от достаточно развитой теории для гомойотермных животных. Герпетологи не критично берут на вооружение понятия из термобиологии млекопитающих (например, представление об оптимальном диапазоне температур) и пользуются неподходящими методами оценки соответствующих параметров. Между тем принципы терморегуляции, по крайней мере, гелиотермных рептилий существенно отличаются от гомойотермных

животных. Применяя адекватную теорию регуляции, можно получить более точные показатели, выражающие способность животных к поддержанию температуры тела, – параметры терморегуляции.

Оригинальные методы исследований

Для выработки показателей терморегуляции гелиотермных рептилий, к которым относится живущая на Севере гадюка обыкновенная, мы воспользовались кибернетико-физиологической теорией регуляции, подробно рассмотренной нами ранее (Коросов, 2008). В самом кратком изложении физиологическая регуляция состоит в выработке организмом реакций, компенсирующих отклонение некой характеристики внутренней среды организма от видовой нормы (Шмидт-Ниельсн, 1981). В поле зрения физиолога находятся две величины: некий нормальный «штатный» параметр, хранящийся в регистрирующих структурах, и текущая характеристика состояния особи. Отдельный акт регуляции состоит, во-первых, в обнаружении отклонения значений текущей характеристики от значения параметра, во-вторых, в выработке компенсаторных реакций.

В термобиологии млекопитающих штатный параметр (хранящийся в гипоталамусе) задает уровень необходимой температуры тела. В норме он является неизменным единственным общим критерием для регистрации двух типов отклонения температуры тела – как в сторону больших значений (перегрев), так и в сторону меньших значений (переохлаждение) (Слоним, 1971). В первом случае организм включает реакции усиленного охлаждения («физическая терморегуляция»: потоотделение и пр.), во втором – реакции усиленного разогрева («химическая терморегуляция», тремор и пр.). Распределение отклонений в обе стороны в целом имеет симметричную форму, и для его описания совершенно обоснованно применение средней арифметической и показателей изменчивости температуры тела. Анализ этого распределения позволяет оценить диапазон нормальных температур, который и называют оптимальными температурами.

Терморегуляция гелиотермных рептилий организована совершенно по-другому. Единственный *неизменный видовой штатный параметр* представляет собой «верхний ограничитель», он служит только для регистрации отклонений температуры тела рептилии в сторону перегрева и при его до-

стижении включает серию реакций, снижающих температуру тела (Коросов, Ганюшина, 2019). В числе таких реакций вазомоторная регуляция, усиленная вентиляция слизистых поверхностей, изменение позы относительно субстрата и потока солнечного излучения, поведенческие реакции, направленные на поиск прохладных субстратов, местообитания или убежищ (Шмидт-Ниельсен, 1982; Черлин, 2012). На диаграмме суточного хода температуры тела значение штатного параметра выглядит как прямая линия, от которой траектории индивидуальной температуры тела должны бы «отскакивать» вниз, в область более низких температур. Гадюка именно таким образом односторонне регулирует температуру тела, избегая перегрева.

При этом у рептилий нет неизменного видового *нижнего температурного порога*, регулирующего избегание охлаждения. Иначе они, подобно млекопитающим, вынуждены были бы тратить много усилий для поиска температур выше этого значения. Однако этого не происходит: при отсутствии необходимых условий рептилии терпеливо и неподвижно остывают. Вместо этого у рептилий есть *относительный температурный порог*, побуждающий их переходить в более благоприятные тепловые условия, если они имеются поблизости и доступны для органов чувств. Этот феномен уже давно назван теплолюбивостью. Однако здесь речь идет о *температурной чувствительности*, которую мы рассматриваем как второй ключевой параметр активной терморегуляции у рептилий (Коросов, 2008, 2010). Его относительный характер состоит в том, что, независимо от температуры тела рептилии, они предпочитают переместиться в местообитание (локацию) с более комфортными тепловыми условиями. Это перемещение осуществляется, когда уровень теплового излучения от окрестных нагретых объектов превысит некоторый порог. Например, гадюка начнет перемещаться, если на расстоянии 30 см температура субстрата будет выше температуры ее тела примерно на 5–8 °C (Коросов, 2010).

Поскольку температура субстрата во многом зависит от уровня солнечной радиации (времени суток, сезона, облачности и пр.), большую часть суток температура тела рептилий будет существенно ниже отмеченного порога перегрева. В силу указанных особенностей терморегуляторного поведения гелиотермных рептилий распределение температуры их тела в любой период тепло-

го сезона будет иметь сложный характер, в целом не связанный с терморегуляцией. В этом случае такие статистические параметры, как средняя арифметическая или диапазоны (доверительные интервалы и пр.), ничего не будут сообщать о существовании терморегуляторных реакций рептилий. Попытки различных герпетологов как-то ограничить рассматриваемый диапазон температур внешними критериями, например, замерами только днем, только в ясную погоду, только во время «активности», не меняют сути вопроса – полученный *диапазон* температур тела будет определяться в той или иной степени тепловыми условиями среды.

Если целью термобиологических исследований принять поиск видовых физиологических параметров терморегуляции, то необходимо выходить на оценку именно *пороговых значений температуры тела*, достижение которых вызывают терморегуляторные реакции. Такие значения будут *оценками физиологических «штатных» параметров терморегуляции* (Коросов, 2015). Видимо, температура поверхности тела или внутренних слоев, замеренная логгерами, не будет *равна «штатной»* критической температуре, которая также, скорее всего, хранится в гипоталамусе. Однако те значения температуры тела, при которых змея осуществляет терморегуляторное поведение, должны жестко коррелировать с физиологической константой терморегуляции и поэтому могут служить ей хорошей оценкой. Аналогичная оценка – «нормальная температура под мышкой человека», хотя «штатный» параметр терморегуляции примерно на 1 °C выше нее. Одна из наших задач – поиск оценок этих «критических» значений температуры тела, характерных для особей определенного статуса, их видовой нормы.

Если же целью становится поиск устойчивых воспроизводимых характеристик терморегуляторных способностей рептилий, такими характеристиками могут стать показатели скорости изменения температуры тела.

Наконец, если в центре внимания стоит поиск особенностей терморегуляторных реакций различающихся по статусу (возрасту, полу, зрелости и пр.) особей, можно попробовать построить относительные метрики «теплолюбивости» животных, живущих в одинаковых условиях.

Наша работа в этом направлении привела к конструированию 10 новых показателей, также использован один ранее известный.

Таблица 1. Термобиологические характеристики

Название	Имя	Характеризует...
Время выхода	t	начало дневного обогрева под лучами солнца
Скорость нагревания	V	способность к аккумуляции теплоты
Сумма температур	S	теплолюбивость особи
Максимальная высшая	Tmh	предельный порог толерантности
Максимальная пиковая	Tmp	статистически обоснованный порог толерантности
Максимальная типичная	Tmt	статистически обоснованный порог толерантности
Максимальная добровольная	Tmg	порог толерантности, оцененный по поведению особи
Средняя температура баскинга	Tb	типичную температуру тела на баскинге
Средняя температура баскинга на поверхности	Tbs	температуру змеи, греющейся на открытой поверхности
Медианные активные температуры	$Tact$	правую часть распределения температур тела
Средняя нормированная температура	Tn	среднее значение отклонения температуры особи от среднего для группы

Время выхода из укрытия утром

Моментом выхода особи (ai) считали тот отсчет времени (число минут после полуночи) утром *данного дня* ($j = 1, 2 \dots, N$), после которого температура тела *отдельной змеи* ($i = 1, 2 \dots, n$) возрастала на 1.5°C (очевидно, под лучами солнца) (рис. 1). Этот показатель годится для сравнения реактивности разных змей только для данного дня.

Далее для данного дня по всем особям рассчитывали среднюю (Maj) и стандартное отклонение (Saj). Затем для каждой особи (i) для данного дня (j) отыскивали центрированное-нормированное отклонение: $naij = (aij - Maj) / Saj$ и для каждой змеи значения усредняли $Ai = \sum naij / N$. Стандартное отклонение рассчитывается по стандартной формуле.

Показатель Ai характеризует относительное время выхода за весь период наблюдений и может использоваться для сравнения разных особей, наблюдавшихся как в данный год, так и в разные годы. Для расчета корреляции времени выхода с другими характеристиками змей (или условиями среды) следует выполнить центрирование-нормирование и этих показателей. Например, сначала рассчитать относительные значения массы тела у n особей: $nWi = (wi - Mwij) / Swij$, затем выполнить анализ связи между этими относительными значениями разных особей.

Скорость нагревания

Для определения скорости нагревания вручную отбирали только те данные, когда

график утренней температуры был восходящим и гладким. Для каждой змеи все траектории собирали в общую выборку и рассчитывали линейную регрессию температуры (T) от времени (t): $T = a + V * t$; коэффициент пропорциональности принимали за индивидуальный показатель скорости нагревания Vi (в рамках регрессионного анализа определяется и его ошибка) (см. рис. 1).

Смысл показателя в абсолютном выражении – это количество градусов, приобретенных животным за минуту нагревания. Его значения можно рассматривать как выражение индивидуальных свойств и непосредственно сравнивать у разных особей.

В то же время на скорость нагревания могут влиять условия среды, например ветер, низкие температуры воздуха, субстрата. По этой причине и быстро, и медленно нагревающиеся животные могут иметь одинаковые скорости при разных условиях среды.

Для поиска различий этих показателей уместно использовать бутстрэп (Шитиков, Розенберг, 2014) – как при сравнении пары особей, так и в дисперсионном комплексе.

Максимальная высшая температура

Единичное самое высокое значение температуры тела, зафиксированное логгером у отдельной особи за время наблюдений (Tmh) (рис. 2). Для всех изученных животных можно определить абсолютную максимальную температуру ($Tmha$) – самое высокое значение из всех зафиксированных для всех особей, и среднюю высшую максимальную температуру ($MTmh$), рассчитанную

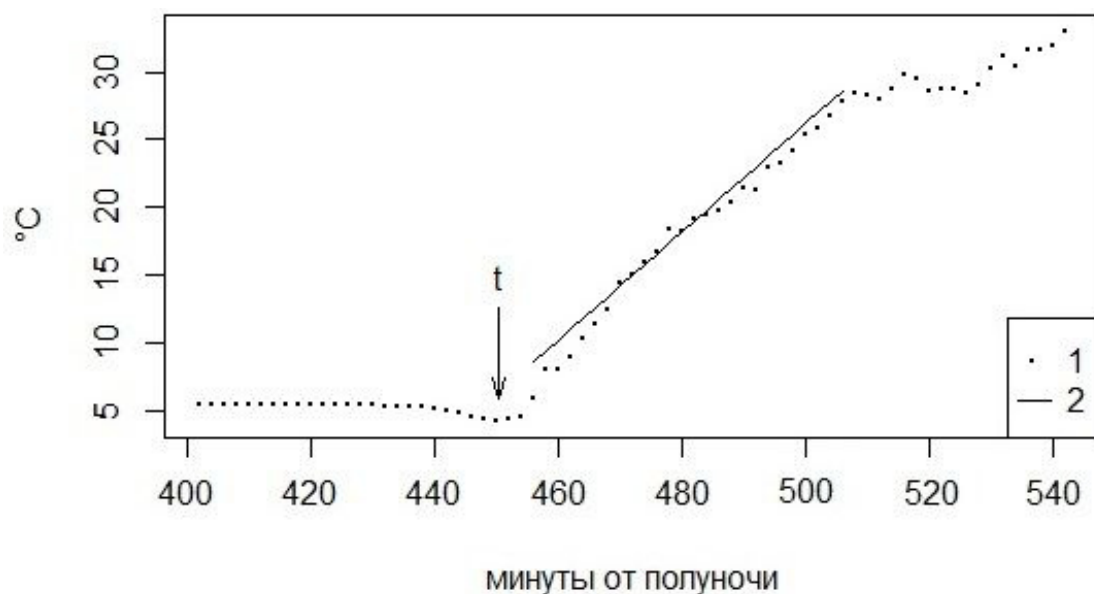


Рис. 1. Фрагмент температурной кривой в момент выхода особи из убежища (t) и в начале нагрева (1 – замеры температуры, 2 – линия регрессии для расчета скорости утреннего нагрева)

Fig. 1. Fragment of the temperature curve at the moment the individual leaves the shelter (t) and the beginning of heating (1 – temperature measurements, 2 – regression line for calculating the rate of morning heating)

как среднее из этих значений. Высшая максимальная температура имеет отчетливый смысл: эта температура неприемлема для особей, ее можно принять как примерную оценку последней витальной температуры. На диаграмме распределения значений температуры эта точка ограничивает последний

частотный класс. Показатель для отдельной особи представлен одним числом и не имеет интервальной оценки, однако можно говорить о его высокой репрезентативности, поскольку эти значения получены из выборки объемом 15–25 тысяч измерений для отдельной особи.

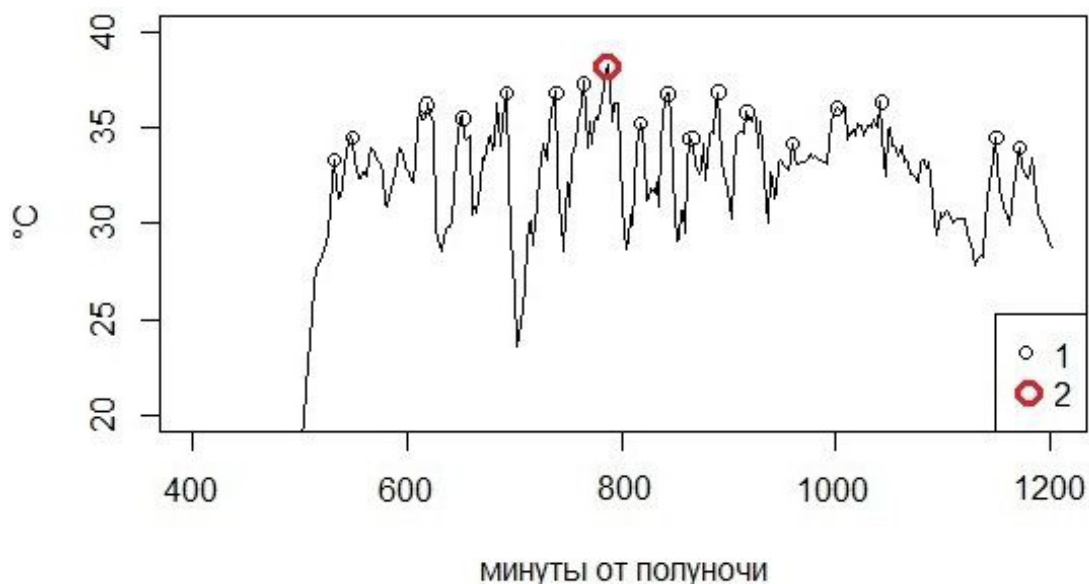


Рис. 2. Максимальные пиковые температуры (1) и максимальная высшая температура (2)

Fig. 2. Maximum peak temperatures (1) and maximum high temperature (2)

Средняя пиковая температура

Показатель, призванный дать хоть какую-нибудь статистическую характеристику значению максимальной температуры. На графике хода дневной температуры тела животного обычно обнаруживается достаточно много «пиков» – высоких значений температуры, после достижения которых температура тела падает (см. рис. 2). Зачастую это связано с переходом животного в полутень или легкие укрытия как способ избежать перегрева, хотя часть пиков вызвана прерыванием теплового потока от солнца облаками. Тем не менее эти пики могут говорить о достижении змеями предела комфортной температуры и включении механизма поведенческой терморегуляции. С этих позиций средняя пиковая температура обретает физиолого-экологический смысл границы толерантного диапазона. Для оценки этих значений требуется найти хорошо выраженные пики, ясно говорящие о смене тепловых потоков.

Поиск пиковых значений (локальных максимумов) велся программой по следующему алгоритму. Для каждой особи в течение одного дня анализировали ряды значений температуры с отсчетами через 2 мин. Для лага длиной от 3 до 15 соседних записей (от 6 до 30 мин.) рассчитывалась скользящая линейная регрессия зависимости температуры от номера отсчета на данном интервале. При этом положительные значения коэффициента регрессии говорят о росте температуры на анализируемом отрезке (наклон линии влево), а отрицательные – о снижении (наклон линии вправо); на пике происходит смена знака коэффициента регрессии, для этого отсчета и брали значение текущей температуры тела как пиковую. Многочисленные испытания показали, что при лаге длиной 10 отсчетов (20 мин.) идентифицируются все хорошо выраженные пики. Наборы пиковых значений служили для расчета статистических параметров – средней пиковой (максимальной) температуры (Tri) и ее стандартного отклонения ($sTri$) для отдельной особи. Эти параметры можно сравнивать между собой с помощью простых статистических методов. Всего обнаружено и включено в расчет 243 значения. Средняя пиковая температура составила 35.1°C , т. е. в среднем на 1°C выше, чем максимальная добровольная, это связано с тем, что в первые моменты после начала терморегуляторной реакции температура тела все еще поднимается (см. ниже).

Эти наблюдения позволяют по-новому

использовать полевые замеры температуры тела гадюки. Количество пиков, обнаруженных на записи логгерами для 9–17 ч. при ясной солнечной погоде, составляет около 9 % от всех дневных замеров. Если взять 9 % наибольших значений от всех замеров, выполненных в полевых условиях при ясной солнечной погоде (и принять их за пиковые), то можно рассчитать *среднюю полевую максимальную* температуру тела и ее дисперсию. Объем выборки максимальных пиковых полевых значений из нашей базы данных составил 35 вариант, средняя – 32.5°C , стандартное отклонение – 5.9°C . Полевые замеры и замеры логгерами дали не очень близкие значения.

К сожалению, отдельные локальные максимумы температуры тела могут иметь разное происхождение. Помимо терморегуляторных поведенческих реакций пики порождают переменная облачность (прерывистый режим инсоляции) и порывы ветра (переменный режим принудительной конвекции). Таким образом, теоретически средняя пиковая температура должна иметь гораздо более широкую изменчивость, затрудняющую сравнение параметров.

Максимальная типичная температура

Типичная максимальная температура (Tmt) рассчитывается как некий предел в правой части полигона распределения значений температуры тела гадюки. На температурной шкале это такая точка, правее которой температура тела гадюки *обычно* не встречается. Мы стремимся придать этому показателю вероятностное содержание и, взяв на вооружение статистическое «соглашение о 95 %», отсесть от распределения 5 % «лишних» вариант. В распределении значений дневной температуры тела гадюки только правый скат похож на гауссиану. Иными словами, если в области высоких значений модальный класс (с наибольшей частотой вариант) принять как центральный условного нормального распределения, то на правой половине можно выделить значение, отсекающее 5 % от этой выборки. Это и будет значение максимальной типичной температуры. Мы разработали три метода для оценки этого значения: метод квантилей ($Tmtq$), метод регрессии ($Tmtr$), метод квантилей по регрессии (Tmt).

Метод квантилей

В качестве исходных данных для каждой гадюки послужило распределение температуры тела в течение всех дней наблюдений.

От этого распределения отбрасывали часть данных, находящуюся левее модального класса, который практически всегда приходился на 33–34 °С. Общий объем значений температуры тела выше 33 °С для разных змей варьировал от 140 до 2900 вариантов, поскольку продолжительность наблюдений и частота считывания температуры тела в разных опытах различались. Далее определяли, сколько вариантов составит 5 % от всей выборки (квантиль 5 %) ($nq5 = n * 0.05$, например, для 300 отсчетов $nq5 = 300 * 0.05 = 15$), все значения сортировали в порядке уменьшения и отыскивали значение температуры, которое в этом ряду стоит на $nq5$ -месте (в примере – на пятнадцатом справа). Это и есть максимальное типичное квантильное значение. Дальнейший анализ показал, что при не очень больших выборках, во-первых, модальные значения определяются плохо, и исходный объем выборки точно не определить, во-вторых, максимальные значения склонны случайно варьировать, и, как следствие, изменение модального класса ведет к существенным отличиям полученных значений для разных змей. В то же время это самый простой и понятный метод.

Метод регрессии

В этом методе мы отошли от требования сохранять 95 % вариантов выборки, ориентируясь только на форму распределения температуры тела. Для отдельной особи за весь период наблюдений распределение разби-

вали на интервалы шириной 0.5 °С, определяли модальный класс для области самых высоких температур, отбрасывали все значения левее и анализировали только правую часть распределения. Левая граница называется как первый класс правее модального. Значение максимальной типичной регрессионной температуры количественно определяется как точка пересечения оси температур с линией тренда падения частот в правой ветви распределения (рис. 3). Эта точка отсекает правый «хвост», независимо от его веса в распределении. Технология состоит в построении линейной зависимости средней для класса температуры тела от частоты ее встречаемости: $T' = a + b * F$ (где T' – расчетная температура в данном классе, F – частота в классе). Из уравнения следует, что температура равна коэффициенту a при частоте, равной 0; это и есть точка пересечения оси абсцисс линией регрессии; искомый параметр (T_{mtr}) равен коэффициенту a . С целью уменьшить влияние отсекаемого правого «хвоста» распределения при расчете уравнения линейного тренда использовали взвешивание, чтобы наиболее репрезентативные значения температуры (из классов с большими частотами) получали преимущество перед классами с экстремально высокими температурами (но с малой частотой встреч); весами служили частоты в данном классе. В среде R функция записывается так: `lm(t~f,weight=f)`.

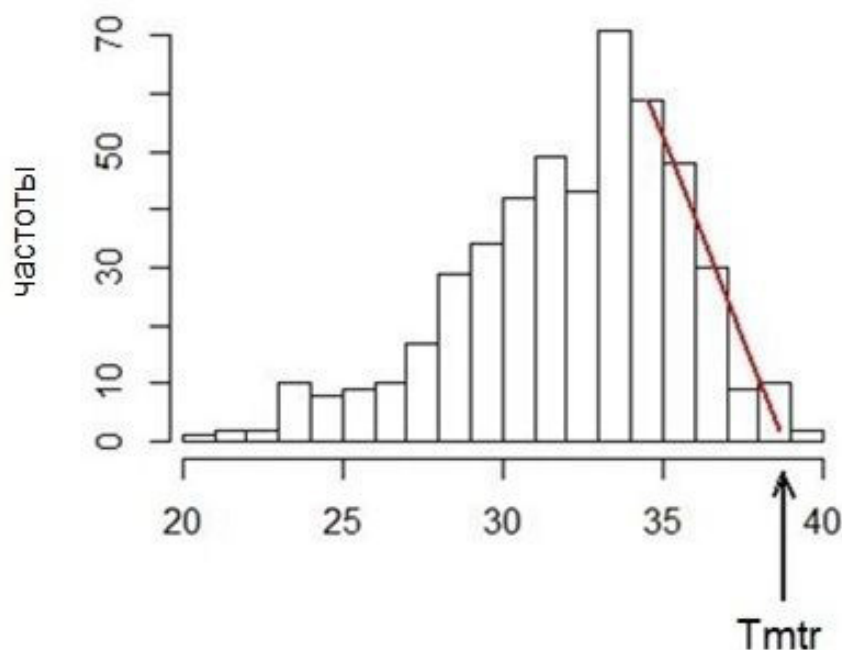


Рис. 3. Линия регрессии для правого ската частот
Fig. 3. Regression line for the right slope of frequency

Для оценки устойчивости полученных значений типичного максимума применена процедура рандомизации (Шитиков, 2014), которая состоит в многократном пересчете коэффициентов регрессии на ограниченных выборках, случайно взятых из исходной. Из этой совокупности данных для одной особи случайным образом извлекали вторичные выборки объемом по 500 значений температуры («с возвратом»), для которых строили гистограмму, подсчитывали частоты классов, строили уравнение регрессии ($T \sim n$) и оценивали T_{mtr} . Для каждой особи выполняли по 100 оценок типичной максимальной

температуры и рассчитывали, во-первых, среднее значение максимальной типичной температуры (T_{mtr}), во-вторых, стандартное отклонение (mT_{mtr}), которое имеет смысл ошибки средней.

Этот метод дает достаточно устойчивые результаты, если исходная выборка велика, но при небольших объемах в исходных распределениях намечаются провалы, и регрессионные оценки максимальной типичной температуры, во-первых, получают заниженные оценки (растут при увеличении выборок, рис. 4), во-вторых, ресамплинг дает большие значения ошибки.

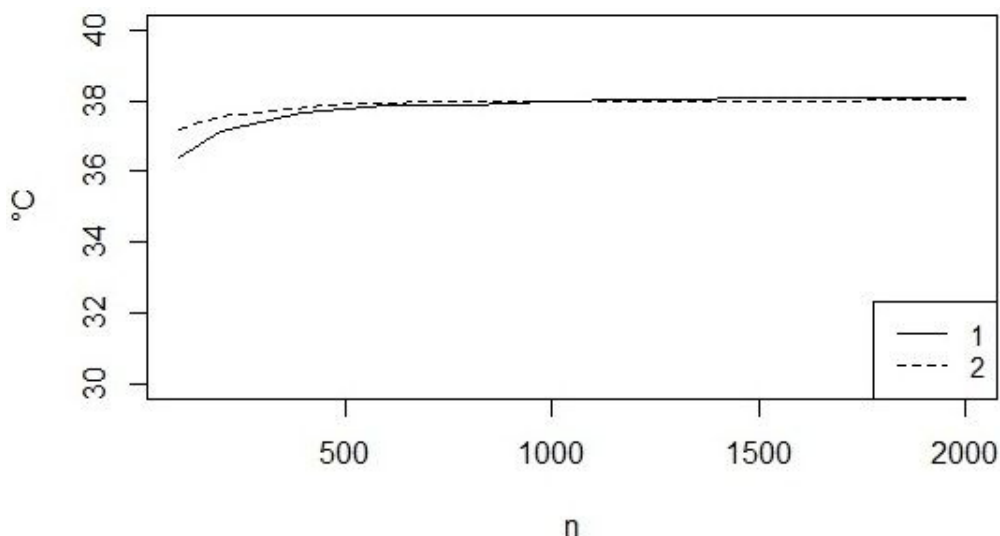


Рис. 4. Соотношение между оценками максимальной типичной (регрессионной) температуры для двух змей (1, 2) с объемами выборки (n)

Fig. 4. Relationship between estimates of the maximum typical (regression) temperature for two snakes (1, 2) with sample sizes (n)

Метод квантилей по регрессии

В поисках процедуры, сглаживающей перепады частот в соседних классах распределения температур, использовали кривую накопления частот, кумуляту. Предварительно исходное частотное распределение сглаживалось скользящей средней по тройкам, и в качестве модального выбирался класс, имеющий наибольшую сглаженную частоту. Далее в обработку включались значения высокой температуры тела, больше значений для модального класса. Для отобранных значений строилась гистограмма с 20 интервалами (шириной около 0.4–0.5 °C), затем этот ряд частот сортировался по возрастанию ($i = 1, 2 \dots, 20$ – номер интервала). На основе этого частотного ряда (f_i) рассчитывался ряд накопленных частот (Σi), начиная с наименьших частот (от самых высоких значений температуры к меньшим); все значения делятся

на общую сумму ($p_i = 100 * \Sigma i / \Sigma 20$). Таким образом, для каждого интервала известен его номер (i), центральное значение температуры (T_i) и относительная накопленная частота (в процентах, p_i). Используя эти значения, рассчитывалось уравнение гиперболической зависимости следующего вида: $T_i = a_1 + a_2/p_i + a_3/(p_i \wedge a_4)$, которое играет роль кривой сглаживания накопленных частот. В эту формулу подставляли значение 5 % и таким образом рассчитывали значение температуры, соответствующее 5%-й квантили (рис. 5); это и есть максимальная типичная (регрессионно-квантильная) температура ($T_{mtrq} = T_{mt}$). Для расчета ошибки параметра применяется процедура ресамплинга, описанного выше.

Полученные оценки для разных змей имеют гораздо меньшую изменчивость и уже не связаны с объемами выборок, хотя процедура расчета стала заметно сложнее.

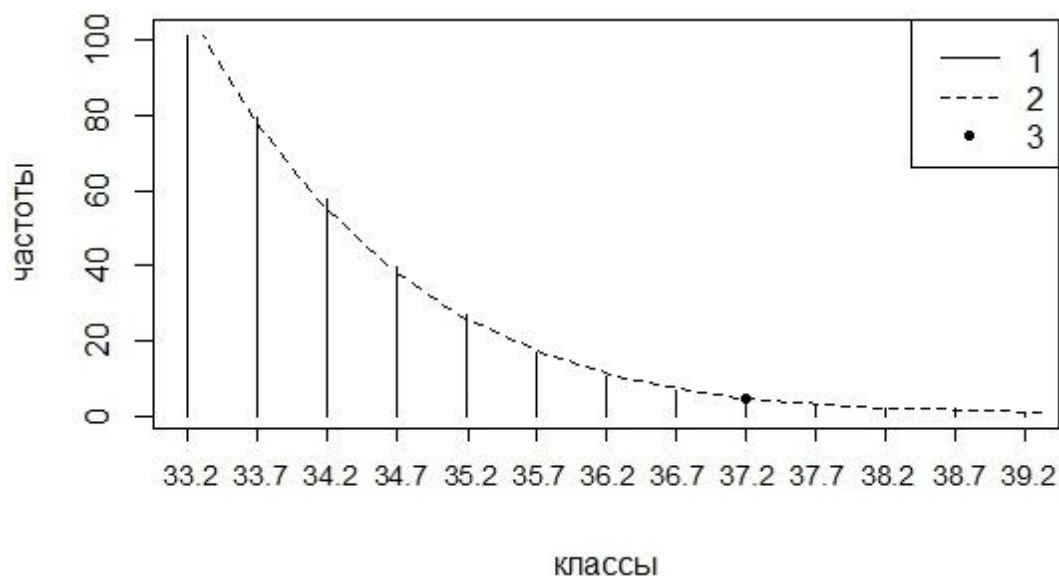


Рис. 5. Оценка температуры, соответствующей квантили 5 %. 1 – значения накопленных частот, 2 – регрессия, 3 – точка с координатой 5 % и 37.7 °C ($T_{mt} = 37.7$ °C)

Fig. 5. Estimation of temperature corresponding to quantile 5 %. 1 – values of accumulated frequencies, 2 – regression, 3 – point with coordinates 5 % and 37.7 °C ($T_{mt} = 37.7$ °C)

Максимальная добровольная температура

Индивидуальная максимальная добровольная температура – это тот уровень температуры тела, при котором у конкретной особи включается поведенческая терморегуляция, направленная на избегание перегрева. Для определения этого параметра используются расшифровки круглосуточных видеозаписей поведения змей во время всего эксперимента. Алгоритм, реализованный в программе для автоматического определения параметра, следующим. В полной базе данных отыскивались периоды времени (продолжительностью 12 мин. или 6 соседних отсчетов времени), в течение которых змея нагревалась, а затем начинала остывать. Для этого рассчитывали скользящую линейную регрессию (зависимость температуры от номера шести соседних отсчетов 1, 2, ... 6). Смена знака коэффициента скользящей регрессии указывала на точку перегиба температурной кривой, т. е. на момент начала остывания. Далее по базе данных программа определяла, двигалась ли гадюка (код движения – 2) в этот период (12 мин.). Если животное не двигалось и не меняло позу, то принимали, что изменение температуры связано с погодными эффектами (ветер, тень от облака), и такие данные пропускали. Если же в течение этого интервала (6 отсчетов) змея перемещалась или меняла позу, то это поведение рассматривали как терморегуляторную реакцию,

и значение температуры тела, соответствующее моменту начала движения, брали как оценку максимальной добровольной температуры, которое стимулирует осуществление поведенческого акта. Зачастую моменты начала движения и достижения пиковой температуры отстояли на 1–2 отсчета, т. е. после начала перемещений для поиска более прохладных условий температура тела змеи продолжала подниматься и формировала температурный пик, который явно является перегревом, но не вполне «добровольным перегревом» (Черлин, 2015). Всего для 6 гадюк было обнаружено 56 значений максимальной добровольной температуры. По всем этим значениям для данной особи рассчитывается значение «средняя максимальная добровольная температура и стандартное отклонение», пригодная для сравнения с другими особями. Это самый стабильный показатель, мало отличающийся у разных змей, средний уровень для гадюк из Карелии (N62) составил 34 °C.

Средняя температура баскинга

Этот показатель (T_b) рассчитывается как средняя арифметическая для всех значений температуры тела гадюки, которые зафиксированы за все моменты времени, когда температура окружающей среды (температура воздуха в траве) превышала 23 °C (рис. 6). Важно отметить, что температура в траве играет роль всего лишь индикатора высокого уровня солнечной радиации, при 23 °C вынуждающего змею осуществлять термо-

регуляторное поведение. Порог 23°C принят только по той причине, что на диаграмме зависимости температуры тела от температуры субстрата (см. рис. 6) отчетливо виден изолированный «конус» точек, связанных, очевидно, только с терморегуляторным поведением змей. Именно этот показатель оказывается самым понятным для герпетологов, поскольку близок к часто используемым понятиям «оптимальная» или «предпочитаемая» температура в природных условиях.

К сожалению, в этот период не все змеи остаются на поверхности и прячутся в легкие укрытия, полутень. Поэтому изменчивость этого параметра оказалась довольно велика и значимо связана со средней температурой среды. Таким образом, данный показатель

оказался термозкологическим и не позволяет делать точные оценки физиологических предпочтений гадюки.

В то же время этот параметр можно усилить и уточнить, если его оценку проводить только для тех змей, которые находятся на поверхности субстрата и активно осуществляют терморегуляцию. С этой целью по результатам видеонаблюдения была составлена выборка для наблюдаемых змей и оценены статистические характеристики температуры их тела. Полученные оценки оказались очень близкими у разных особей, составили в среднем 33.1°C , что почти равно максимальной добровольной температуре. Таким образом, этот параметр также является термофизиологическим, но трудоемким для оценки.

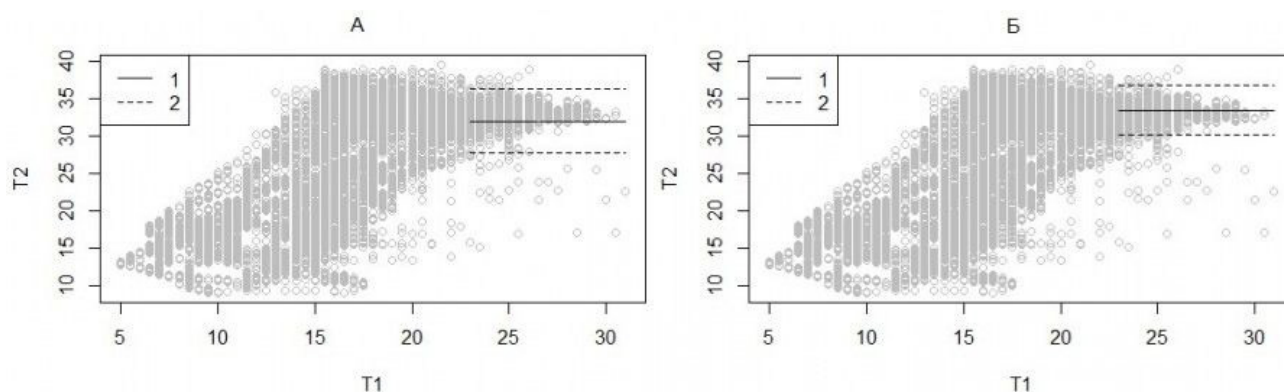


Рис. 6. Средняя температура бaskинга (1) и ее стандартное отклонение (2) при температуре травы ($T1$) выше 23°C (А), средняя температура бaskинга под солнцем (1) и ее стандартное отклонение (2) (Б)

Fig. 6. Average temperature of basking (1) and its standard deviation (2) at grass temperature ($T1$) above 23°C (А), average temperature of basking in the sun (1) and its standard deviation (2) (Б)

Оценка суммы накопленных температур

Этот показатель призван характеризовать особенности использования теплоты среды разными особями, проживающими совместно в одних климатических условиях. Для унификации показаний, полученных разными логгерами, подсчитывали общую сумму значений температуры за весь день (с 8 до 18 ч.) для всех дней наблюдений и делили на общее количество отсчетов за это время. Получаем среднюю дневную температуру тела на один отсчет.

Медианные активные температуры

Показатель «сумма активных температур» (превышающих 10°C) широко используется в агрономии для сопоставления условий теплообеспечения почв (Синицина и др., 1973). В отношении рептилий показатель призван характеризовать температуры тела змей, когда они находятся вне укрытий

в дневное время, стремясь повысить температуру тела, поскольку именно в это время осуществляются основные метаболические реакции, обеспечивающие функционирование организма животного. Для гадюки 10°C – это очень низкое значение, поэтому были приняты пороги $20, 25, 30^{\circ}\text{C}$ ($Tact_{20}, Tact_{25}, Tact_{30}$). Техника расчетов состоит в том, чтобы сформировать выборку значений температуры тела выше порога и рассчитать медианное значение, имеющее смысл реального срединного значения из данной выборки (рис. 7).

Наши расчеты показали, что медианы для выборок с порогом 20 и даже 25°C у разных змей имеют широкую изменчивость и, очевидно, несут смысл термозкологических характеристик.

Медиана для выборок выше 30°C достаточно стабильна, средняя равна 33.4°C , т. е. близка по величине к максимальной добро-

вольной температуре $Tmg = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$; ее вычисления просты, следовательно, $Tact_{30}$ и может служить для оценки Tmg . На наш взгляд, эта температура вполне отвечает показателю В. А. Черлина (2012), температуре полной

активности (поскольку при этих температурах змеи активно осуществляют терморегуляторное поведение), но более формализованно и точнее.

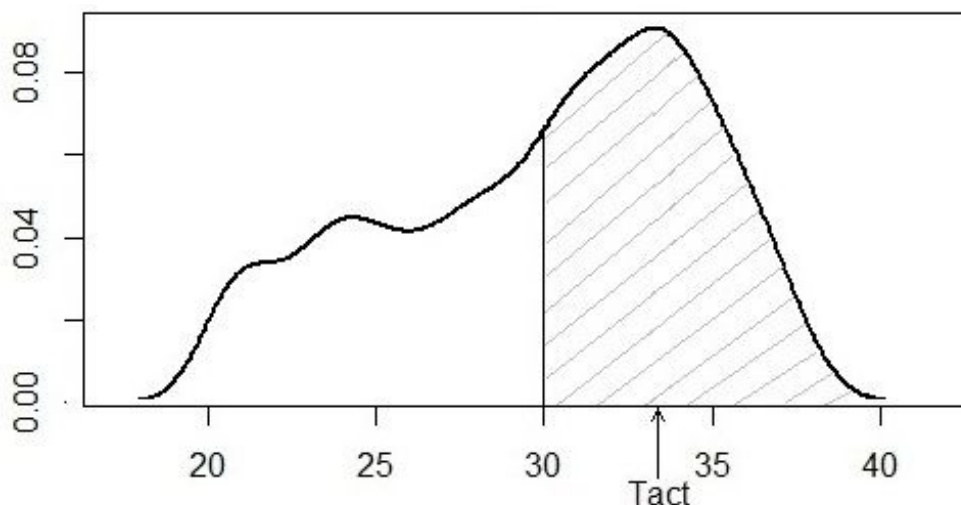


Рис. 7. Оценка медианной активной температуры обыкновенной гадюки при температуре тела $30\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig. 7. Estimation of the median active temperature of the common viper at temperatures above $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

В такой форме данный показатель можно использовать для сравнения разных змей, изученных в данный сезон, а также для поиска зависимости между теплолюбивостью змей и их морфо-физиологическими характеристиками.

Средняя нормированная температура

Для получения температурных характеристик, которые можно сравнивать у животных, наблюдаемых в разных условиях (место, сезон, погода, год), был рассчитан показатель средней нормированной температуры. Смысл показателя состоит в выявлении индивидуальной теплолюбивости особи, отличающих ее от группы особей, живших с ней (рис. 8).

Этот показатель прост в вычислении. От текущей температуры тела, зафиксированной в данный момент, вычитали среднюю текущую температуру всех особей и делили разницу на стандартное отклонение: $Tn_i = (T_i - M_i)/S_i$, далее все значения, полученные для конкретной особи, усреднялись. Таким образом, для каждой особи получали одно значение, которое может варьировать от -1 до 1 и характеризует большую или меньшую теплолюбивость этого животного. Препятствием для расчета средней нормированной температуры является отсутствие синхронных измерений температуры тела нескольких особей или их небольшое количество (менее трех).

Соотношение между параметрами терморегуляции

Исходя из физиологической теории регуляции, нами предложено несколько показателей, в той или иной мере приближающихся к «штатному» параметру терморегуляции, включающему терморегуляторные реакции животного (обыкновенной гадюки) (табл. 2, рис. 9). Вероятно, наиболее близки к нему показатели «максимальная добровольная температура» (Tmg) и «медианная активная температура выше для выборки выше $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ » ($Tact_{30}$). В то же время показатель «максимальная типичная температура» (Tmt) хорошо статистически обоснован, а «средняя температура баскинга под солнцем» (Tbs) имеет понятное и привычное содержание. Для оценки работоспособности этих показателей необходимо расширить спектр объектов исследования.

Заключение или выводы

Описывая термобиологические особенности рептилий, необходимо иметь четкое представление о тех параметрах и характеристиках, которые выбираются в качестве основных показателей. Это представление должно быть как биологическим (иметь явный физиологический или экологический смысл), так и математическим (для понимания степени значимости полученных значений).

Среди рассмотренных нами показателей

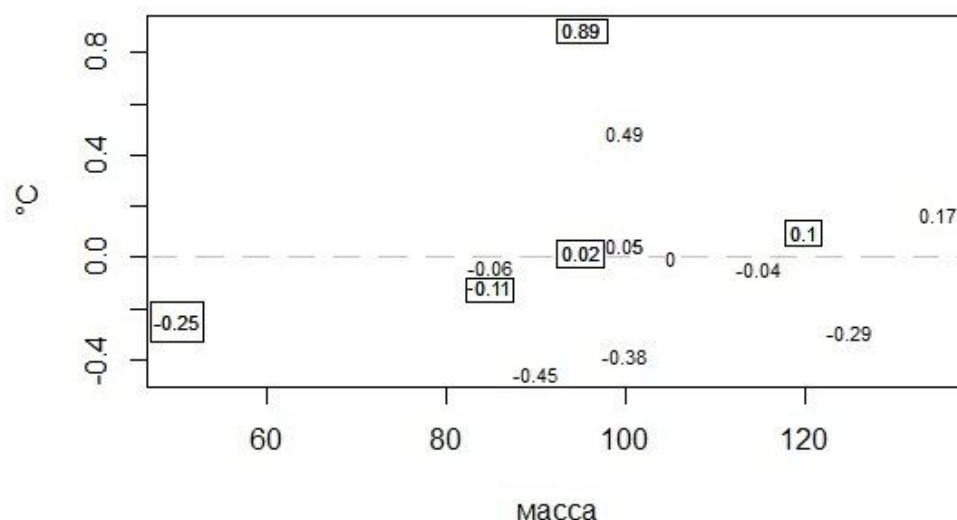


Рис. 8. Соотношение массы и средней нормированной температуры тела (в прямоугольниках – значения для самцов)

Fig. 8. The ratio of mass and average normalized body temperature (values for males are in rectangles)

Таблица 2. Величина и изменчивость термобиологических показателей гадюки обыкновенной

Название	<i>Huk</i>	<i>M</i>	<i>S_m</i>	<i>n</i>
Нормированное время выхода	<i>t</i>	0	0.68	16
Скорость нагревания	<i>V</i>	0.8	0.3	16
Сумма температур	<i>S</i>	23.4	3.37	23
Максимальная высшая	<i>Tmh</i>	39.4	1.05	23
Максимальная пиковая	<i>Tmp</i>	35.1	0.21	7
Максимальная типичная	<i>Tmt</i>	37.8	0.74	23
Максимальная добровольная	<i>Tmg</i>	34	0.61	6
Средняя температура баскинга	<i>Tb</i>	32.3	2.7	22
Средняя температура баскинга под солнцем	<i>Tbs</i>	33.1	0.9	6
Медианная активная температура для выборки выше 20 °C	<i>Tact₂₀</i>	30.3	1.5	23
Медианная активная температура для выборки выше 25 °C	<i>Tact₂₅</i>	32.3	0.8	23
Медианная активная температура для выборки выше 30 °C	<i>Tact₃₀</i>	33.4	0.5	22
Средняя нормированная температура	<i>Tn</i>	0	0.34	16

наиболее репрезентативным является максимальная типичная температура. Несмотря на сложность расчетов, точность и устойчивость этого показателя позволяет проводить объективные сравнения максимальной типичной температуры у особей из разных ареалов и межвидовые сравнения. Кроме статистической достоверности, биологический смысл такой температуры – верхний порог толерантности, т. е. максимальная температура тела, выше которой гадюки нагреваются в крайне редком случае.

Биологически ясный основной параметр терморегуляции (максимальная доброволь-

ная температура) описывает схему поведенческой терморегуляции гадюки – избегание перегрева. Сложность в определении максимальной добровольной температуры вызывает необходимость искать другие, близкие к ней температурные характеристики, но более простые для определения и требующие меньше трудозатрат для расчета. Таким показателем оказалась медианная активная температура для выборки выше 30 °C.

При выборе температурных показателей рекомендуем использовать те, которые имеют низкую изменчивость и отчетливый биологический смысл.

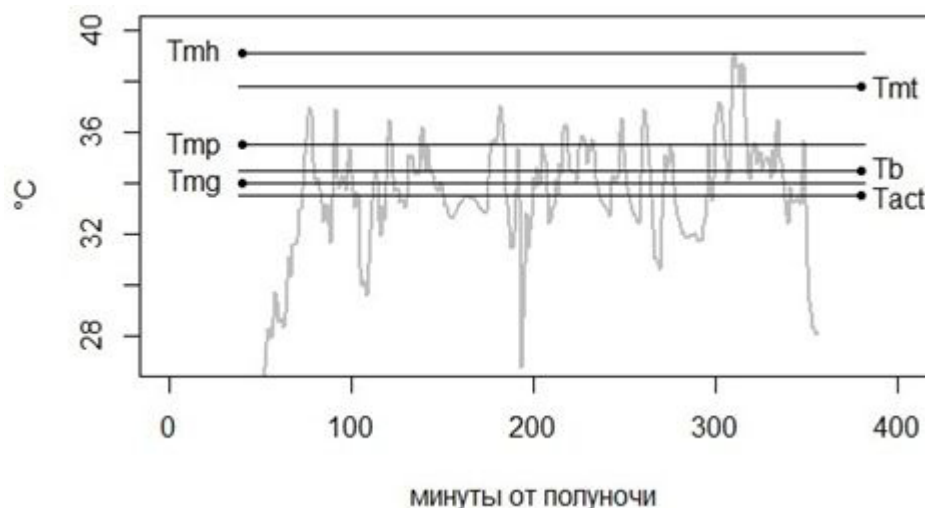


Рис. 9. Соотношение терморегуляторных параметров на фоне типичной траектории дневной температуры тела гадюки

Fig. 9. Ratio of thermoregulatory parameters against the background of the typical trajectory of the daytime body temperature of the viper

Библиография

- Коросов А. В., Ганюшина Н. Д. К оценке максимальной добровольной температуры обыкновенной гадюки // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. Пенза, 2019. № 2. С. 96–104. DOI: 10.21685/2307-9150-2019-2-10.
- Коросов А. В., Ганюшина Н. Д. Максимальная температура тела как параметр терморегуляции рептилий: опыт статистической оценки на примере обыкновенной гадюки (*Vipera berus* (L. 1758)) // Зоологический журнал. 2021. Т. 100. № 1. С. 1–10.
- Коросов А. В. Двухконтурная отрицательная обратная связь и модель терморегуляции гадюки // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. Естественные и технические науки. 2008. № 1. С. 74–82.
- Коросов А. В. Экология обыкновенной гадюки (*Vipera berus* L.) на Севере (факты и модели) . Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. 264 с.
- Коросов А. В. Новое слово в термобиологии рептилий? // Принципы экологии. 2015. № 1. С. 77–85. DOI: <http://dx.doi.org/10.15393/j1.art.2015.4162>.
- Синицина Н. И., Гольцберг И. А., Струнников Э. А. Агроклиматология . Л.: Гидрометеиздат, 1973. С. 40–42.
- Слоним А. Д., Слоним А. Д. Экологическая физиология животных . М.: Высшая школа, 1971. 448 с.
- Черлин В. А. Термобиология рептилий. Общие сведения и методы исследований (руководство) . СПб.: Русско-Балтийский информационный центр «БЛИЦ», 2010. 124 с.
- Черлин В. А. Изучение термобиологии рептилий в мире и в СССР/РФ. 1. Изучение термобиологии рептилий в зарубежных странах // Принципы экологии. 2019а. № 3. С. 163–179. DOI: 10.15393/j1.art.2019.8963.
- Черлин В. А. Изучение термобиологии рептилий в мире и в СССР/РФ 2. Изучение термобиологии рептилий в СССР/РФ // Принципы экологии. 2019б. № 4. С. 96–132. DOI: 10.15393/j1.art.2019.8964.
- Шмидт-Нильсен К. Физиология животных. Приспособление и среда . М.: Мир, 1982. Кн. 1. 416 с. Кн. 2. 384 с.
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R . Тольятти: Кассандра, 2014. 314 с.
- Herczeg G., Saarikivi J., Gonda A., Pera J. Ia, Tuomola A., Merila J. Suboptimal thermoregulation in male adders (*Vipera berus*) after hibernation imposed by spermiogenesis // Biological Journal of the Linnean Society. 2007. Vol. 92. P. 19–27. DOI: 10.1111/j.1095-8312.2007.00827.x.
- Lourdais O., Guillon M., DeNardo D., Blouin-Demers G. Cold climate specialization: adaptive covariation between metabolic rate and thermoregulation in pregnant vipers // Physiol Behav. 2013. Vol. 119. P. 149–155. DOI: 10.1016/j.physbeh.2013.05.041.
- R Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.

METHODS FOR ESTIMATING THE PARAMETERS OF THERMOREGULATION IN REPTILES (BY THE EXAMPLE OF THE COMMON VIPER, *VIPERA BERUS* L.)

KOROSOV
Andrey Victorovich

DSc, Petrozavodsk State University, korosov@psu.karelia.ru

GANYUSHINA
Natalia Dmitrievna

Petrozavodsk State University, ekoni@mail.ru

Keywords:
reptiles
viper
temperature
thermoregulation

Summary: We present the analysis of long-term studies of the thermobiology of the common viper, including the use of loggers, mini-sensors for recording the body temperature of a living individual. A series of traditional and original indicators characterizing the ability of the common viper to regulate its body temperature is considered. It is shown that the so-called thermoecological indicators characterize to a greater extent the conditions of stay of animals, but not their ability to thermoregulation. The thermophysiological indicators include parameters with both good and unsatisfactory statistical properties (in terms of variability and stability). The most stable indicator is that characterizing the physiological abilities of an individual or a group of individuals – «maximum typical temperature», assessed by the regression-quantile method. The maximum typical temperature is interpreted as the upper tolerance threshold, i.e. the true specific maximum body temperature. The main parameter of the viper thermoregulation is the maximum voluntary temperature, which is fixed at the moment when the animals avoids overheating. Recording the maximum voluntary temperature requires continuous monitoring of both the body temperature and the behavior of the reptile, which makes the calculation of the maximum voluntary temperature quite difficult and time-consuming. The simplest indicator for assessing the main parameter of thermoregulation (maximum voluntary temperature) was the median active temperature for the sample above 30 °C (close to the temperature of «full activity»). To compare different groups of animals, it is strongly discouraged to use statistical indicators assessing the range of variability of normal daytime temperatures or their averaging.

Received on: 15 December 2020

Published on: 28 December 2020

References

- Cherlin V. A. RF. Study of thermobiology of reptiles in the world and in the USSR / RF. 1. Study of thermobiology of reptiles in foreign countries, Principy ekologii. 2019a. No. 3. P. 163–179. DOI: 10.15393/j1.art.2019.8963.
- Cherlin V. A. Study of thermobiology of reptiles in the world and in the USSR / RF 2. Study of thermobiology of reptiles in the USSR / RF, Principy ekologii. 2019b. No. 4. P. 96–132. DOI: 10.15393/j1.art.2019.8964.
- Cherlin V. A. Thermobiology of reptiles. General information and research methods (manual). SPb.: Russko-Baltiyskiy informatsionnyy centr «BLIC», 2010. 124 p.
- Herczeg G., Saarikivi J., Gonda A., Pera J. Ia, Tuomola A., Merila J. Suboptimal thermoregulation in male adders (*Vipera berus*) after hibernation imposed by spermiogenesis, Biological Journal of the Linnean Society. 2007. Vol. 92. P. 19–27. DOI: 10.1111/j.1095-8312.2007.00827.x.
- Korosov A. V. Ganyushina N. D. Maximum body temperature as a parameter of thermoregulation in reptiles: an experience of statistical evaluation on the example of the common viper (*Vipera berus* (L. 1758)), Zoologicheskiy zhurnal. 2021. T. 100. No. 1. P. 1–10.
- Korosov A. V. Ganyushina N. D. To estimate the maximum voluntary temperature of the common viper, Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki. Penza, 2019. No. 2. P. 96–104. DOI: 10.21685/2307-9150-2019-2-10.
- Korosov A. V. Dual-loop negative feedback and a viper thermoregulation model, Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2008. No.

1. P. 74–82.

Korosov A. V. Ecology of the common viper (*Vipera berus* L.) in the North (facts and models). Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2010. 264 p.

Korosov A. V. Is it a new word in reptile thermobiology?, Principy ekologii. 2015. No. 1. P. 77–85. DOI: <http://dx.doi.org/10.15393/j1.art.2015.4162>.

Lourdais O., Guillon M., DeNardo D., Blouin-Demers G. Cold climate specialization: adaptive covariation between metabolic rate and thermoregulation in pregnant vipers, Physiol Behav. 2013. Vol. 119. P. 149–155. DOI: 10.1016/j.physbeh.2013.05.041.

Niel'sen K. Animal physiology. Adaptation and environment. M.: Mir, 1982. Kn. 1. 416 c. Kn. 2. 384 c.

R Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.

Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Randomization and Bootstrap: Statistical Analysis in Biology and Ecology using R. Tol'yatti: Kassandra, 2014. 314 p.

Sinicina N. I. Gol'cberg I. A. Strunnikov E. A. Agroclimatology. L.: Gidrometeoizdat, 1973. P. 40–42.

Slonim A. D. Slonim A. D. Ecological physiology of animals. M.: Vysshaya shkola, 1971. 448 p.



УДК 630*561.24

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА ДЕРЕВЬЕВ

РУМЯНЦЕВ
Денис Евгеньевич

доктор биол. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана,
dendro15@list.ru

ЧЕРАКШЕВ
Андрей Васильевич

аспирант, Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана,
chibin902@mail.ru

Ключевые слова:
годовые кольца
возраст деревьев
дендрохронология
обзор
методические
подходы

Аннотация: В ходе выполнения разнообразных экологических исследований часто необходимо определение возраста древесных растений. Этот вопрос может иметь прямое практическое значение в лесоводстве, лесной таксации, в рамках ухода за деревьями в урбанизированной среде и при выполнении судебно-ботанических экспертиз. Хорошо известно, что использование информации годовых колец может дать точные оценки возраста, однако исследователи не всегда правильно информированы о допустимых рамках использования такого подхода. В статье рассматриваются методические особенности и ограничения в оценке возраста деревьев разными способами. Рассмотрены такие подходы, как оценка возраста деревьев по диаметру, определение возраста хвойных пород по мутовкам, определение возраста деревьев по внешнему виду, определение возраста деревьев в посадках по документам. Основное внимание уделено методическим подходам, основанным на анализе информации годовых колец. Подробно рассматриваются два разработанных авторами методических подхода для определения возраста деревьев – памятников природы.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Л. И. Агафонов

Получена: 22 января 2020 года

Подписана к печати: 26 декабря 2020 года

Введение

Деревья характеризуются разным уровнем долголетия, который к тому же отличается для деревьев, произрастающих в лесу и произрастающих в городской среде. Оценка экосистемных функций деревьев насаждений, любые попытки перевода их в экономическую плоскость невозможны без определения возраста.

Долговечность сосны обыкновенной оценивается в среднем в 200 лет в лесу и 120 лет в городе; лиственницы – 300 лет в лесу и 200 лет в городе; тисса – до 3000 лет (Журавлев, 1964). Однако основатель кафедры ботаники и дендрологии МЛТИ академик В. Н. Сукачев (1928) высказывал мнение, что долговечность тисса может переоценивать-

ся, т. к. он способен формировать более одного годового кольца в течение сезона. В целом все хвойные в городе характеризуются долговечностью не менее 100 лет.

К числу долговечных лиственных пород относятся: дуб черешковый – долговечность от 400 лет в лесу и до 200 лет в городе; липа крупнолистная – 300 лет в лесу и 150 лет в городе; тополь белый – 200 лет в лесу и 150 лет в городе (Журавлев, 1964). Малодолговечными лиственными породами являются: ива белая, клен полевой, клен татарский, клен ясенелистный, ольха серая, чей возраст в городе, как правило, не превышает 100 лет. Отдельные экземпляры всех вышеперечисленных деревьев могут превышать по возрасту указанные цифры.

Задача оценки возраста дерева встает в ходе разнообразных исследований. Фактически любое исследование биоценоза, включающего в себя древесные растения, требует определения их возраста с тем или иным уровнем точности. В статье рассматриваются методические особенности и ограничения в оценке возраста деревьев разными способами.

Материалы

В основу работы легли материалы исследований лаборатории дендрохронологии Московского государственного университета леса (в настоящее время – Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана). Задачи определения возраста древесных растений решались как составная часть комплексных исследований, а также в рамках судебно-ботанических экспертиз и реализации задач Федеральной целевой программы «Дерево – памятники живой природы». Опыт исследований был обобщен в представленной статье. В качестве ботанических образцов использовались керны, отбиравшиеся буром Пресслера, и спилы древесины. Для измерения ширины годичных колец использовался микроскоп бинокулярный стереоскопический (МБС-10) либо комплекс для анализа годичных колец ЛИНТАБ. Методика работ подробно раскрыта в предыдущих публикациях (Румянцев, 2010; Пальчиков, Румянцев, 2010; Липаткин и др., 2010).

Традиционные методы исследований

Оценка возраста деревьев по диаметру

В целом, чем старше дерево, тем оно толще. Однако скорость роста по диаметру напрямую связана с лесорастительными условиями. Так, средний диаметр деревьев сосны из сосняка лещинового будет в несколько раз больше, чем средний диаметр древостоя из сосняка сфагнового, хотя при этом возраст их будет одинаков. Большим диаметром обладают деревья, выросшие на просторе, чем деревья, выросшие в лесу. Это обусловлено главным образом разницей светового питания. Внутри одного древостоя деревья различных классов по Крафту характеризуются разным диаметром при одинаковом возрасте, что также связано с разными особенностями их светового питания.

Каждый вид деревьев характеризуется разной наследственно заданной скоростью роста по диаметру. Очень медленно растет самшит, очень быстро – тополь.

Важно, что с увеличением возраста скорость роста по диаметру начинает замедляться, и с течением времени график зависимости фактически выходит на плато, т. е. увеличение возраста фактически не ведет к увеличению диаметра.

Более правильной оценке возраста деревьев на основании диаметра способствует учет косвенных признаков: более старые деревья имеют более шероховатую, покрытую трещинами кору; более старые деревья сильнее покрыты лишайниками, чем соседние деревья в древостое; для более старых деревьев характерны такие признаки, как развитие табачных сучьев, наличие дупел и обильных плодовых тел трутовиков, высоко поднятая крона некоторым образом связана с возрастом.

Определение возраста хвойных пород по мутовкам

Этот способ упоминается, например, в учебнике Н. П. Анучина (1960). Он хорошо работает для сосны и ели приблизительно до 50-летнего возраста. Далее остатки сухих ветвей в нижней части ствола, как правило, зарастают, а подсчет числа мутовок в верхних частях кроны с плотным охвоением становится трудным для наблюдателя. Помочь в подсчете числа мутовок может лазерная указка. В целом способ этот настолько древний и хорошо известный, что описан даже в сказках Ханса Кристиана Андерсена: «В лесу стояла чудесная елочка... Елочке хотелось покорее вырасти... Прошел год – и у елочки прибавилось одно коленце, прошел еще год – прибавилось еще одно: так по числу коленцев и можно узнать, сколько лет ели» (Андерсен, 1992).

Определение возраста деревьев по внешнему виду

Общепризнано, что внешний вид дерева может служить косвенным признаком для установления его возраста. Например, подводя итог такого рода наблюдениям, Лесная энциклопедия (1985) отмечает, что помимо размеров дерева косвенными признаками его возраста служат: «цвет хвои, форма кроны, цвет и строение коры. У старых деревьев хвойных пород хвоя более светлая, у молодых – темно-зеленая, крупная. У старых деревьев, прекративших рост в высоту, крона закругленная, куполообразная, комлевая (нижняя) часть ствола покрыта толстой корой, в трещинах которой образуются наросты из водорослей и других низших растений. Для молодых деревьев характерен

усиленный рост в высоту, островершинная крона, гладкая, глянцеватая светлоокрашенная кора».

Если рассматривать такой вид, как ель европейская, то для нее показателем возраста может служить структура поверхности корки. Выделяются несколько типов, например гладкая, чешуйчатая и сосновидная. Исследования Э. Я. Рониса в лесах Латвии (1966) показали, что структура корки меняется с возрастом: на ранних этапах онтогенеза преобладают гладкокорые ели, на поздних – чешуйчатокорые. Кроме того, с увеличением возраста трещиноватость поднимается выше по стволу.

В целом точность такого рода методов определения возраста может быть оценена как один класс возраста (10 лет – мягколиственные, 20 лет – хвойные и твердолиственные) и ниже.

Определение возраста деревьев в посадках по документам

Этот способ является надежным источником в пределах ограниченного числа лет. Чем старше посадка, тем хуже работает этот метод на практике. Документы становятся все менее достоверными, все менее подробная информация в них присутствует. Главное, что даже в лесных культурах постепенно появляются деревья, возобновившиеся естественным образом. Еще более сильно этот процесс выражен в парках, где помимо естественного возобновления регулярно ведутся посадки новых деревьев. С другой стороны, важно учитывать, что при создании парка в его состав часто включается существующая здесь ранее древесно-кустарниковая растительность. Например, датой основания Главного ботанического сада РАН им. Н. В. Цицина считается 1945 г., однако там сохранились экземпляры деревьев, существовавшие задолго до этой даты, высаженные и выросшие путем естественного возобновления в период 1945–2017 гг. (Древесные растения..., 1975). Аналогичная ситуация наблюдается в дендрарии Мытищинского филиала МГТУ им. Н. Э. Баумана (бывший МГУЛ).

Еще менее надежными свидетельствами возраста являются различные свидетельские показания и воспоминания очевидцев. Опыт экспертиз показывает, что здесь часто присутствует изначально недостоверная информация, связанная с извлечением некоторой выгоды. Например, бытует легенда, что в филиале Ботанического сада МГУ «Апте-

карский огород» произрастает лиственница, высаженная Петром I около 1706 г. На самом деле она была посажена, как установлено нами по результатам дендрохронологического анализа, примерно на 120–150 лет позднее.

Рассмотрим подробнее результаты выполненного нами исследования (Румянцев, Ряхина, 2017). Ботанический сад «Аптекарский огород» был основан Петром I в 1706 г. для выращивания медицинских растений. Краткая история создания Ботанического сада МГУ была достаточно подробно освещена М. И. Голенкиным (Голенкин, 1909). Он отмечает, что рассматриваемая территория была приобретена Московским университетом в 1805 г. у Московской медико-хирургической академии, и с этого момента история сада достаточно хорошо документирована. По преданию на территории сада присутствовали несколько деревьев, высаженных Петром I: ель, лиственница и пихта, однако точно место их произрастания не было известно. В настоящее время на территории сада существует лиственница, которую традиционно называют лиственницей Петра I. Однако еще в 1939 г. это название в каталоге растений писалось со знаком вопроса, что отражало неуверенность составителей каталога в ее возрасте (Каталог..., 1939).

В 2008 г. с данного дерева Д. Е. Румянцевым был произведен отбор двух кернов древесины, а также одного керна с соседней (близкой по таксационным параметрам) лиственницы. Кernels отбирались с высоты 1.3 м. Они были обработаны в соответствии со стандартной методикой, используемой в лаборатории дендрохронологии МГУЛ (Румянцев, 2010; Румянцев, Черакшев, 2013). В результате было установлено, что два керна имеют начальные кольца, сформировавшиеся в 1828 и 1830 гг., а kern с соседнего дерева имеет самое старое кольцо, сформировавшееся в 1826 г. Определение возраста деревьев по кернам с точностью до одного года затруднено всегда, т. к. при их отборе бурав почти никогда не попадает в биологический центр ствола, содержащий самое первое годовичное кольцо. Также число колец варьирует по высоте ствола, уменьшаясь по мере увеличения высоты отбора образца древесины. Поэтому, если дерево высаживалось посадкой, высота его в момент посадки могла составлять 1.3 м и даже несколько более 2.0 м. Это наиболее вероятно хотя бы с точки зрения рассмотрения примера картины Василия Худоярова «Им-

ператор Петр I за работой», изображающей императора в момент посадки им молодого дерева. Керн на высоте 1.3 м как раз близко характеризует вероятный год посадки дерева. Таким образом, наиболее вероятное время посадки лиственницы, это 20-е гг. XIX в. Потеря из анализа более чем 100 годичных колец представляет собой невозможное событие. В итоге следует заключить, что настоящая лиственница Петра I, по-видимому, погибла в 1812 г. либо была целенаправленно уничтожена оккупантами как символ российской государственности. Действительно, согласно данным М. И. Голенкина (1909), оккупация Москвы французскими войсками сильно отразилась на состоянии сада. Большая часть оранжерей была разрушена, насаждения погибли, жилые помещения сгорели. В то же время ему известно, что уже в 1814 г. директор сада Г. Ф. Гофман вернулся в Москву и до самой своей смерти в 1824 г. («Википедия» называет датой смерти 1826 г.) занимался восстановлением разрушенного сада. Вероятно, что лиственница, которую мы наблюдаем в саду, была высажена либо в период, когда сад восстанавливался Г. Ф. Гофманом, либо в память о самом Г. Ф. Гофмане.

Таким образом, даже, казалось бы, хорошо документированные экземпляры растений оказываются неверно датированными.

Определение возраста деревьев по годичным кольцам

Считается, что первое письменное упоминание о возможности использования годичных колец для определения возраста дерева содержит работа Леонардо да Винчи. В «Трактате о живописи», составленном из записей Леонардо да Винчи XVI в., содержится следующий отрывок: «Круги древесных ветвей показывают число их лет и то, какие были более влажными и более сухими, смотря по большей и меньшей их толщине. И так показывают они страны света, смотря по тому, куда они обращены, потому что более толстые обращены более к северу, чем к югу, и, таким образом, центр дерева по этой причине ближе к его южной, чем к северной коре. И хотя это живописи ни к чему, все же я об этом напишу, дабы опустить возможно меньше из того, что известно мне о деревьях» (Леонардо да Винчи, 1955).

Бытует мнение, что определение возраста деревьев по годичным кольцам – наиболее точный метод. Во многом это результат осещения данного вопроса в школьной программе по биологии. Для примера процити-

руем классический, очень хороший во всех отношениях советский учебник биологии для 5–6-го классов средней школы: «Распилите круглое полено и научитесь определять возраст дерева по годичным кольцам» (Корчагина, 1980). Даже в среде биологов зачастую отсутствует понимание, что данный метод точен лишь при определенных условиях:

1) Точный возраст дерева возможно определить на пне, расположенном на расстоянии 2–5 см от почвы (высота сеянца через 1 год после достижения почвы). Подсчет годичных колец в полевых условиях затруднен, поэтому с пня берется либо спил, либо брусочек. Проба типа «сектор» неприемлема из-за факта существования в природе выпадающих годичных колец. Контроль выпадающих годичных колец возможно осуществлять на спиле путем подсчета годичных колец по всем четырем радиусам; во всех вариантах подсчета значения должны совпадать. Несовпадение числа годичных колец по разным радиусам говорит об ошибке исследования либо о существовании «ложных» или «выпадающих» годичных колец. Ложные кольца часто могут быть распознаны благодаря особой анатомической структуре. У настоящего годичного кольца одна из границ между ранней и поздней древесиной резкая (это граница между древесиной, сформировавшейся в августе года N , и древесиной, сформировавшейся в мае года $N + 1$). Другая граница «размытая», постепенная – это граница между древесиной разного типа, сформировавшимися в разные периоды июля года N . У ложных годичных колец эта граница размыта с обеих сторон.

Вопрос существования выпавших годичных колец был подробно рассмотрен в ранней работе аспиранта (на момент публикации) С. Г. Шиятова (1963). Для точного поиска шейки корня им было предложено предварительно вести выкорчевывание дерева и затем отбор спила в нижней части ствола не под прямым углом к стволу, а под углом 45°. При работе в насаждениях Va и Vb класса бонитета такой подход безусловно оправдан. Однако и при работе в насаждениях I класса бонитета мы можем применять данный методический прием, используя для отбора спилов свежий ветровал. Ценны его указания по использованию метода перекрестной датировки для определения возраста дерева, для чего данный метод почти не используется (хотя в популярной литературе, например в статье известного натуралиста, размещенной в газете «Комсомольская правда»,

определение возраста дерева и определение возраста деревянной постройки перепутались и слились в единый несуществующий метод, и этот случай не единичен).

Выпавшие годовичные кольца широко распространены не только у деревьев, произрастающих на верхней границе леса, но и у деревьев, произрастающих в иных неблагоприятных условиях, например у сосны в сфагновом типе леса. Работая в этих условиях, Г. Е. Комин (1964) для точного определения возраста деревьев предложил вести их корчевку, обрезание корневой части и раскалывание пней. Понятно, что корчевка деревьев для определения возраста технически осуществима в насаждениях V класса бонитета и на заболоченной торфяной почве. На иных объектах этот метод применять затруднительно.

Помимо технических ограничений на методы, предложенные С. Г. Шиятовым (1963) и Г. Е. Коминым (1964), существуют прямые юридические ограничения в виде статьи 260 УК РФ. Наказание по этой статье за рубку в особо крупном размере группой лиц по предварительному сговору составляет до 7 лет лишения свободы. Остается добавить, что особо крупным размером считается 150 000 рублей. Постановление Правительства РФ от 29.12.2018 № 1730 «Об утверждении особенностей возмещения вреда, причиненного лесам и находящимся в них природным объектам вследствие нарушения лесного законодательства» определяет порядок расчета ущерба. Прежде всего в основе расчета ущерба лежит таксовая стоимость древесины, которая в насаждениях V класса бонитета невелика. Однако следует учитывать, что размер такс подлежит увеличению в 3 раза при определении размера вреда, причиненного в связи с нарушением лесного законодательства на особо защитных участках защитных лесов, а также в лесах, расположенных в лесопарковых зеленых поясах. Также размер такс подлежит увеличению в 5 раз при определении размера вреда, причиненного в связи с нарушением лесного законодательства в лесах, расположенных на особо охраняемых природных территориях. Поэтому даже одно дерево V класса бонитета, самовольно выкорчеванное, с формальной точки зрения может являться поводом для возбуждения уголовного дела, т. к. может дать при расчетах ущерб, превышающий 5000 рублей.

2) Чем выше расположение по высоте ствола точки отбора спила, тем меньше в ней

находится годовичных колец. Такова общая закономерность роста древесных растений. Поэтому для отдельного бревна, находящегося в постройке либо на лесовозе, нельзя достоверно определить возраст дерева, из которого оно было заготовлено. Из одного ствола дерева, поступившего в рубку, может быть выработано несколько деловых сортиментов. Анализируя диаметры на концах сортиментов, мы можем определить, какой из концов сортиментов был ближе к земле, но, подсчитав числа годовичных колец на основе отобранного с него спила, мы можем определить точный биологический возраст дерева. Однако наличие определенного числа годовичных колец на образце позволяет нам диагностировать возраст с формулировкой «не менее чем». Например: «возраст не менее чем 50 лет».

3) Отбор керн древесины, как правило, не дает возможности установить точный возраст дерева. Для этого необходим отбор керн в нижней части ствола дерева, но информацию о возрасте может дать только керн, попавший в биологический центр ствола и содержащий в себе сердцевину (она легко заметна на образце). Биологический центр ствола практически никогда не совпадает с геометрическим. Для отбирающего керн исследователя сложно попасть буром в геометрический центр ствола, а попадание в биологический центр практически невозможно. Кроме того, можно провести расчет наиболее вероятного значения биологического возраста дерева. Расчет основан на анализе угла наклона годовичных колец на керне в части, наиболее близкой к центру ствола, а также на учете ширины годовичных колец, наиболее близких к центру ствола.

Оригинальные методы исследований

Всероссийская программа «Деревья – памятники живой природы» была учреждена в 2010 г. Советом по сохранению природного наследия нации в Совете Федерации ФС РФ. С инициативой создания программы выступило НПСА «ЗДОРОВЫЙ ЛЕС» при поддержке Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз) (Уникальные деревья..., 2019).

С момента запуска на сайт Программы, по данным на 1 мая 2019 г., поступило в общей сложности 832 заявки из разных регионов России, 480 деревьев были внесены в Национальный реестр старовозрастных деревьев России. Решением сертификационной комиссии 216 деревьев из реестра полу-

чили почетные звания «Дерево – памятник живой природы». В настоящее время в реестре представлены деревья из 76 регионов-участников (из 85 субъектов РФ – вместе с Республикой Крым и Севастополем). Реестр охватывает около 43 видов деревьев.

Определение возраста дерева по керну, не содержащему сердцевины ствола (на примере сосны веймутовой)

В садово-парковом строительстве XIX – начала XX в. широкое применение получила интродукция экзотических видов древесных растений. Одним из видов в качестве интродуцента стала сосна веймутова, завезенная в Европу лордом Веймутом еще в далеком 1705 г. Исключением не стал и парк усадьбы Рассказово (Арженка) семьи купцов и фабрикантов Асеевых, где был высажен этот представитель рода сосна.

23 марта 2017 г. в Национальный реестр был внесен первый экземпляр вида *Pinus strobus* из Тамбовской области, произрастающий в парке усадьбы Асеевых в Рассказово, под номером 612 (Уникальные деревья..., 2019). По результатам проведенного обследования экспертами были установлены его основные таксационные характеристики. Высота дерева составила 22 м, диаметр ствола – 78 см. Дерево визуально без признаков ослабления, болезней и вредителей, отличается эстетическими качествами от местных аборигенных видов древесных растений. По результатам определения возраста по образцам древесины, отобранным с этого дерева, было установлено, что возраст его составляет на 2019 г. 117 лет. Полученный возраст подтверждает факт высадки данного дерева в начале XX в. в период повсеместного использования веймутовой сосны в качестве интродуцента в садово-пар-

ковом строительстве.

Выполненные нами исследования на одном из наших объектов, расположенном в Озеренском участковом лесничестве Дзержинского лесничества Калужской области, позволили выявить еще один экземпляр сосны веймутова, превосходящий по таксационным параметрам и эстетическим свойствам описанный выше экземпляр. Высота его составляет 32 м, диаметр на высоте 1.3 м – 90 см. Это дерево, произрастающее в насаждении такого же вида, особенно выделяется среди остальных своими размерами и отличным состоянием, поэтому было решено подать заявку во Всероссийскую программу «Деревья – памятники живой природы» (Уникальные деревья..., 2019). Дерево было включено в Национальный реестр старовозрастных деревьев России под номером 795. В результате голосования на ежегодном заседании сертификационной комиссии программы 18 апреля 2019 г. данному дереву был присвоен статус «Дерево – памятник живой природы».

Возраст обоих деревьев определялся по оригинальной методике. Данная методика позволяет наиболее точно определить возраст деревьев в тех случаях, когда буров при сверлении проходит не через центр ствола дерева, а по хорде относительно сердцевины. Это необходимо, т. к. практически невозможно попасть точно в центр ствола, особенно если работать с деревьями большого диаметра. В итоге некоторое число годовичных колец почти всегда выпадает из расчета, в результате возраст получается заниженным. Ниже представлен пример расчета возраста двух веймутовых сосен, описанных выше. Характеристика кернов отобранных деревьев приведена в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика отобранных кернов

№ дерева по реестру / порядковый номер керна	Высота отбора керна, м	Длина окружности на высоте отбора керна, см	Сторона света отбора керна
№ 612-1	1.15	246	В – З
№ 612-2	1.1	247	С – Ю
№ 795-1	1.3	281	С – Ю

При определении возраста были реализованы следующие этапы расчета (согласно оригинальной методике).

1. Определение длины отрезка древесины, недоступного для анализа. Если буров при сверлении проходит не через радиус окружности с центром в сердцевине, а по

хорде, то необходимо на керне измерить длину хорды b и высоту сегмента a (рис. 1). Затем строим равнобедренный треугольник и описываем около него окружность, которая является как бы продолжением участка кольца на керне (рис. 2).

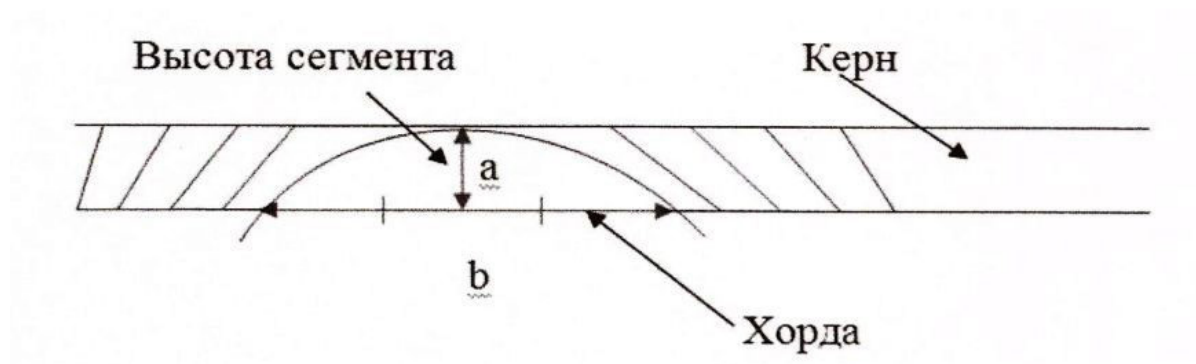


Рис. 1. Схема керн
Fig. 1. The scheme of core

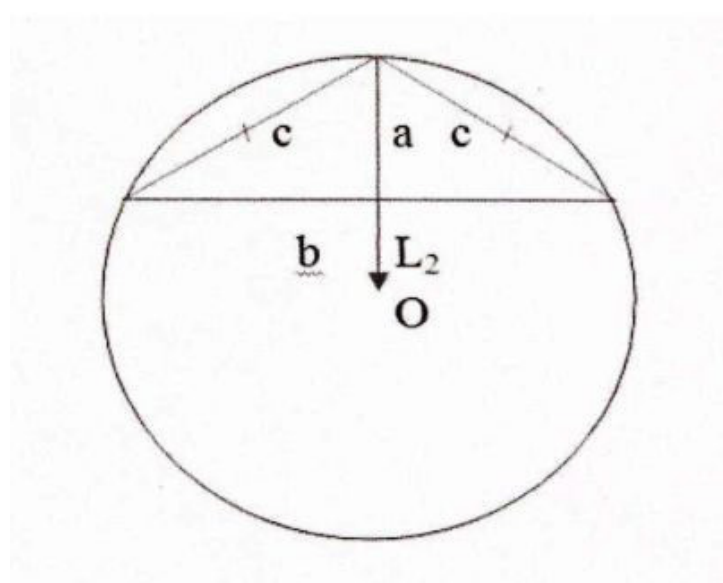


Рис. 2. Схема построения треугольника
Fig. 2. The scheme for the construction of a triangle

Радиус описанной окружности вокруг равнобедренного треугольника окружности определяется по следующим формулам:

$$L_2 = \frac{c^2}{\sqrt{(2c)^2 - b^2}}, \quad c^2 = a^2 + \frac{1}{2}b^2,$$

где L_2 – радиус окружности (длина недоступного для анализа участка древесины), a – высота сегмента, b – длина хорды.

2. Расчет средней ширины годичных колец, находившихся на недоступном для анализа участке древесины:

$$M_x = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5) / 5,$$

3. Определение числа годичных колец на недоступном для анализа участке древесины: где M_x – средняя ширина годичного кольца, $x_1 \dots x_5$ – размеры последних 5 колец, ближайших к выпавшему из анализа

участку древесины:

$$A_1 = L_2 / M_x,$$

где A_1 – расчетное число годичных колец на недоступном участке древесины, L_2 – радиус окружности (длина недоступного для анализа участка древесины), M_x – средняя ширина годичного кольца.

4. Определение возраста дерева по отдельному радиусу на высоте отбора керн:

$$A_2 = A_0 + A_1,$$

где A_2 – возраст дерева на высоте отбора керн, A_0 – число годичных колец, реально обнаруженных на керне, A_1 – расчетное число годичных колец на недоступном участке древесины.

5. Расчет количества лет, необходимых молодому дереву для достижения высоты отбора керн:

$$A_3 = H/b,$$

где A_3 – возраст, необходимый для достижения деревом высоты отбора керна, H – высота отбора керна, b – условный средний линейный прирост. Размеры условного линейного прироста находятся в прямой зависимости от биологии и географии произрастания исследуемого дерева и, как правило,

могут составлять от 10 до 30 см за 1 год.

6. В итоге вычисляется биологический возраст дерева:

$$A_4 = A_2 + A_3$$

На основании данных этих формул и данных табл. 2 произведен расчет возраста деревьев-памятников (табл. 3).

Таблица 2. Исходные данные для расчета возраста

№ дерева по реестру / порядковый номер керна	Длина хорды b , мм	Высота сегмента a , мм	Недоступный для анализа участок древесины, мм	Средняя ширина ближайших к недоступному участку 5/10 колец, мм	Расчетное число годовичных колец на недоступном для анализа участке древесины, шт.
№ 612-1	9.5	0.5	22.8	2.242	10
№ 612-2	16.5	1.5	23.4	2.304	10
№ 795-1	37	3.5	50.64	7.8	6

Таблица 3. Расчет возраста деревьев

Порядковый номер керна	Число годовичных колец на керне, шт.	Расчетное число годовичных колец на участке древесины, недоступном для анализа, шт.	Условный средний линейный прирост в первые годы жизни, см	Возраст достижения деревом высоты отбора керна, лет	Итоговый возраст, лет
№ 612-1	99	10	20	6	115
№ 612-2	99	10	20	6	115
№ 795-1	84	6	20	7	97

Итоговый возраст дерева № 612 на 2017 год: 115; Итоговый возраст дерева № 795 на 2018 год: 97.

В связи с тем что образцы древесины (керы) отбирались в разные годы, к расчетному возрасту необходимо добавить количество лет, чтобы получить возраст на текущий момент, поэтому на сегодняшний день возраст сосны веймутова из Тамбовской области составляет 117 лет, а сосны из Калужской области – 98 лет. Несмотря на несущественную разницу в возрасте (19 лет), сосна из Калужской области намного превосходит сосну из Тамбовской области по таксационным параметрам.

Определение возраста дерева, имеющего в стволе обширную ядровую гниль (на примере дуба черешчатого)

К часто встречающимся явлениям у старовозрастных деревьев, затрудняющим точное определение возраста, относится наличие в стволе ядровых гнилей разной степени развития. Поэтому приходится прибегать к расчету числа годовичных колец с учетом возможного их количества на недоступном для

анализа участке древесины.

Этапы расчета:

1. Определение среднего радиуса ствола:

$$M_R = (L/3,14)/2,$$

где M_R – средний радиус ствола, L – длина окружности ствола.

2. Определение длины недоступного для анализа участка древесины:

$$L_2 = M_R - L_1,$$

где L_2 – длина недоступного для анализа участка древесины, L_1 – длина керна, M_R – средний радиус ствола.

3. Расчет средней ширины годовичных колец, находившихся на недоступном для анализа участке древесины. Методика расчета зависит от длины взятого (отобранного) керна по отношению к фактическому (среднему) радиусу ствола:

а) Если имеющийся керн имеет длину не менее 70 % рассчитанного среднего радиуса ствола:

$$M_x = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)/5,$$

где M_x – средняя ширина годовичного кольца, $x_1...x_5$ – размеры последних 5 колец, бли-

жайших к выпавшему из анализа радиусу.

б) Если имеющийся керн имеет длину менее 70 % от рассчитанного среднего радиуса:

$$M_x = (x_1 + x_2 + x_3 \dots + x_{10})/10,$$

где M_x – средняя ширина годичного кольца, $x_1 \dots x_{10}$ – размеры последних 10 колец, ближайших к выпавшему из анализа радиусу.

4. В случае когда керны с разных радиусов сильно отличаются между собой по длине, а ряд радиального прироста не имеет сильно выраженного возрастного тренда, среднюю ширину рассчитывают по формуле:

$$M_x = L/N_x,$$

где M_x – средняя ширина годичного кольца, L – длина керна, N_x – число годичных колец, зафиксированных на керне.

5. Затем рассчитывают возраст дерева на высоте отбора керна:

$$A_1 = M_R/M_x,$$

где A_1 – возраст дерева на высоте отбора керна, M_R – средний радиус дерева на высоте отбора керна, M_x – средняя ширина годичного кольца.

6. Для того чтобы определить возраст

дерева по отдельно взятому радиусу, предварительно нужно рассчитать возраст, необходимый для достижения деревом высоты отбора керна:

$$A_2 = H/b,$$

где A_2 – возраст, необходимый для достижения деревом высоты отбора керна, H – высота отбора керна, b – условный средний линейный прирост. Размеры условного линейного прироста находятся в прямой зависимости от биологии и географии произрастания исследуемого дерева и, как правило, могут составлять от 10 до 30 см за 1 год.

Затем вычисляется возраст дерева по отдельно взятому радиусу:

$$A_3 = A_1 + A_2,$$

где A_3 – возраст дерева по отдельно взятому радиусу, A_1 – возраст дерева на высоте отбора керна, A_2 – возраст, необходимый для достижения деревом высоты отбора керна.

7. Итоговый возраст дерева определяется как среднее значение из нескольких расчетных значений.

На основании данных табл. 4 был произведен расчет возраста учетного дерева (табл. 5).

Таблица 4. Исходные данные для расчета возраста

Порядковый номер керна	Длина керна, см	Средний радиус на данной высоте, см	Недоступный для анализа участок древесины, см	Средняя ширина ближайших к недоступному участку 5 колец, мм	Среднее число годичных колец на недоступном для анализа участке древесины, шт.
1	16.1	72.2	56.6	1.66	341
2	21.4	89.2	67.8	2.33	291
3	18.6	72.7	54.1	2.22	244
4	21.8	89.2	67.4	1.64	411
5	27.4	72.7	45.3	3.34	136

Таблица 5. Расчет возраста учетного дерева

Порядковый номер керна	Число годичных колец на керне, шт.	Расчетное число годичных колец на участке древесины, недоступном для анализа, шт.	Условный средний линейный прирост в первые годы жизни, см	Возраст достижения деревом высоты отбора керна	Итоговый возраст, лет
1	111	341	15	9	461
2	139	291	15	4	434
3	107	244	15	9	360
4	119	411	15	4	534
5	133	136	15	9	278
Среднее значение					413

Обсуждение

Определение возраста древесных растений, и в первую очередь деревьев, часто представляет собой задачу, критически значимую для результатов экологических, лесоведческих, лесоводственных, лесотаксационных исследований. Роль методической грамотности при определении возраста еще более возрастает в том случае, когда подобного рода исследования выполняются в рамках судебно-ботанической экспертизы. Рассмотрим некоторые типичные методические ошибки. Хотя из этических соображений они не сопровождаются конкретными ссылками на авторов и источники, но все они основаны на реальных случаях экспертной практики.

При определении возраста деревьев на основании показателей диаметра очень часто существует тенденция к его преувеличению, удревнению. Например, возраст платанов, произрастающих во дворе культовой постройки, был завышен на 300–400 лет в связи с тем, что был поставлен знак равенства между датой закладки постройки (известной из исторических документов) и датой высадки деревьев.

Дуб, произраставший на открытом месте (хорошее световое питание), на берегу реки (хорошая влагообеспеченность), на месте полууничтоженного черноольхового древостоя (богатство почвы азотом благодаря деятельности клубеньковых бактерий), накопил крайне крупный диаметр (более 2 м) при достаточно скромном возрасте (около 150 лет).

Тополь белый, произрастающий на территории г. Москвы, при диаметре более 1 метра имел возраст около 90 лет и выглядел старше всех соседних деревьев, которые на самом деле были ему приблизительными ровесниками. Быстрый рост был запрограммирован наследственными экологическими свойствами данного вида.

Свидетельские показания нередко встречались в нашей практике в территориальных спорах между соседями за обладание участками земли в связи с определением точных границ участков. То, что некогда было неважным, стало важным, когда цена за землю в отдельных районах Московской области достигла больших значений. Свой вклад внесла «дачная амнистия», согласно которой пользователи, владевшие неоформленным участком земли (самозахват), могли присоединить его к своим законным владениям в том случае, если докажут факт использования его до 2005 г. В этом плане

установление возраста произрастающей на участке яблони могло решить вопрос даже при определении возраста с формулировкой «не менее чем X лет». В такого рода экспертизах нередки ситуации, когда возраст, диагностированный по свидетельским показаниям, разнится с оценками возраста на несколько десятков лет.

Исторические документы в ряде случаев также трактуются неверно. Например, в Никольской лесной даче (территория современного Щелковского учебно-опытного лесхоза) в XIX в. создавались посадки лиственницы европейской. Возраст деревьев на пробной площади был определен с учетом диаметра и исторических документов. Однако отбор модельного дерева и анализ спила показали, что исследуемый древостой старше на несколько десятков лет. Причина ошибки в определении возраста опытными лесоводами была связана во многом с тем, что с возрастом ширина годичного кольца сильно уменьшается и у большинства старовозрастных деревьев диаметр практически перестает увеличиваться.

Производством артефактов нередко занимаются исследователи, определяющие возраст подсчетом годичных колец на керне. В итоге могут получаться многозначительные выводы о том, что деревья верхнего яруса в старовозрастном ельнике моложе деревьев ели из более нижнего яруса. С учетом того, что ель может «сидеть» под пологом несколько десятков и даже более сотни лет, формируя очень узкие годичные кольца, потеря из анализа даже 1 см древесины керна может существенным образом влиять на выводы исследования.

Типичной методической ошибкой является отождествление числа колец, зафиксированных на образце круглых лесоматериалов (например, на торце бревна из стен деревянного дома; на торце бревна, расположенного на лесовозе), и биологического возраста дерева, из ствола которого было заготовлено это бревно. Например, у представителей природоохранных организаций может складываться мнение, что на лесовозе присутствует древесина, заготовленная в молодом древостое (не достигшем возраста спелости). На самом деле причина в том, что из ствола дерева из спелого древостоя заготавливают несколько круглых сортиментов, а число годичных колец на поперечном срезе по мере увеличения высоты ствола убывает. Дерево может иметь биологический возраст 100 лет, однако верхние части его ствола мо-

гут содержать 20, 10 и так далее (вплоть до 1) годовичных колец.

Неверным мы считаем методический подход (использовавшийся одним «ученым») по определению интенсивности семеношения сосны обыкновенной в разные годы на основе анализа возрастной структуры популяции подроста на отдельно взятой территории методом анализа числа мутовок. Хотя для решения ряда задач этот метод может давать приемлемую точность, но точность, необходимая для восстановления обильного семеношения (точного определения возраста с точностью до календарного года), данному методу недоступна. У светолюбивой сосны в условиях конкуренции первые мутовки отмирают весьма быстро, и у разных экземпляров подроста (находящихся в разных условиях освещенности) отмереть может разное их число. Если данный метод используется для подроста ели, то здесь методическую сложность создает и способность подроста ели при определенных условиях генерировать «двойной» линейный прирост в течение вегетационного сезона.

Еще одно затруднение в восприятии результатов анализа годовичных колец, связанное с возрастом, вносит метод перекрестной датировки древесно-кольцевых хронологий. Он может использоваться для решения в ходе исследования таких задач, как установление времени рубки дерева, времени усыхания дерева, факта сухостойности дерева на момент рубки, времени сооружения деревянной постройки и некоторых других. С биологической точки зрения этот круг вопросов сводится к установлению времени прекращения камбиальной активности в стволе дерева. Оно возможно с точностью до года. Для этого строится эталонная хронология (временной ряд радиального прироста, полученный измерением ширины годовичного кольца на образцах древесины с живущих деревьев) и тестовая хронология (получена на основе образцов древесины, отобранных с дерева, дату прекращения камбиальной активности в стволе которого необходимо установить). Метод основан на анализе математическими методами характера колебаний ширины годовичного кольца от года к году, расчете коэффициентов сходства (например, коэффициента синхронности) между эталонной и тестовой хронологией. Метод не связан с подсчетом числа годовичных колец, а методический аппарат анализа при оценке биологического возраста и при оценке даты прекращения камбиальной активности от-

личается очень сильно.

Определение возраста кустарников с использованием информации годовичных колец затруднено тем, что нередко более старые побеги отмирают, а новые, развившиеся от корневой системы, содержат в себе малое по сравнению с реальным биологическим возрастом растения число колец.

И последний вопрос, который регулярно служит предметом дискуссий, – это потенциальный вред от использования бурава Пресслера для живых деревьев. Следует отметить, что «Правила создания, содержания и охраны зеленых насаждений города Москвы» (Правила..., 2012) не просто разрешают использовать бурав Пресслера в городе, но предписывают его использование при мониторинге развития стволовых гнилей. Нет ни одной известной научной публикации, которая доказала бы вред от его использования, и это при том, что опыт использования бурава насчитывает более 150 лет (Двадцать пять..., 1875). При этом есть специализированные исследования, которые доказывают безвредность данного метода (Mantgem, Stephenson, 2004).

Заключение или выводы

Существуют различные возможности для определения возраста древесных растений, и прежде всего деревьев. Эта задача востребована в рамках разнообразных исследований, связанных не только с непосредственным изучением древесных растений, но и в комплексных экологических исследованиях. Каждый из методов имеет свою область применения, точность методов в каждом конкретном случае может оказаться как приемлемой, так и неприемлемой для целей исследования. Информация годовичных колец является одним из надежных источников данных о возрасте деревьев, однако ее использование часто не может ограничиваться механическим подсчетом числа годовичных колец на образцах древесины и требует выполнения соответствующих расчетов.

Подводя итог, следует заключить, что не существует «лучших» и «худших» методов определения возраста древесных растений, любой из описанных методов может быть использован, если его точность и ограничения адекватны цели и задачам исследования. Для каждого исследования этот показатель индивидуален. Практика работы с такими объектами, как деревья – памятники природы, потребовала от авторов разработки двух оригинальных методических подходов.

Библиография

- Анучин Н. П. Лесная таксация . М.; Л.: Гослесбумиздат, 1960. 523 с.
- Андерсен Х. К. Ель // Сказки и истории. М.: Vita, 1992. С. 171–178.
- Голенкин М. И. Путеводитель по Ботаническому саду Императорского Московского университета . М.: Типография Московского ун-та, 1909. 75 с.
- Двадцать пять формул Пресслера для вычисления древесного прироста и лесной приростный бурав . СПб.: А. Ф. Дервиен, 1875. 92 с.
- Журавлев Н. И. Защита зеленых насаждений от болезней . Л.: ВЗЛТИ, 1964. 88 с.
- Каталог растений . М.: Изд-во Ботанического сада, 1939. 128 с.
- Корчагина В. А. Ботаника: Учебник для 5–6 классов средней школы. М.: Просвещение, 1980. 255 с.
- Леонардо да Винчи. Избранные естественнонаучные произведения. М.: АН СССР, 1955. 1207 с.
- Лесная энциклопедия. Т. 1. М.: Сов. энциклопедия, 1985. 563 с.
- Комин Г. Е. Возрастная структура и строение древостоев заболоченных лесов междуречья Лозьвы и Пелыма: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Свердловск, 1964. 27 с.
- Липаткин В. А., Пальчиков С. Б., Румянцев Д. Е., Жаворонков Ю. М. Возможности использования метода перекрестной датировки древесно-кольцевых хронологий при расследовании дел, связанных с незаконной заготовкой древесины // Теория и практика судебной экспертизы. 2010. № 3. С. 244–254.
- Пальчиков С. Б., Румянцев Д. Е. Современное оборудование для дендрохронологических исследований // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2010. № 3 (72). С. 46–51.
- Правила создания, содержания и охраны зеленых насаждений города Москвы . М.: Департамент природопользования и охраны окружающей среды, 2012. 138 с.
- Ронис Э. Я. Формы ели обыкновенной в лесах Латвийской ССР и их лесохозяйственное значение: Автореф. дис. ... канд. сельхоз. наук. Елгава, 1966. 27 с.
- Румянцев Д. Е. История и методология лесоводственной дендрохронологии . М.: МГУЛ, 2010. 109 с.
- Румянцев Д. Е., Черакшев А. В. Дендроклиматическая диагностика состояния сосен секции *Strobi* в условиях дендрологического сада МГУЛ // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2013. № 7 (99). С. 121–127.
- Румянцев Д. Е., Ряхина К. Н. О необходимости переименования лиственницы Петра I в лиственницу Гофмана (по результатам дендрохронологических исследований старовозрастной лиственницы в филиале Ботанического сада МГУ (Аптекарский огород) // Международный журнал экспериментального образования. 2017. № 4-1. С. 61–62.
- Сукачев В. Н. Лесные породы: их систематика и фитосоциология . Ч. 1. Хвойные. М.: Новая деревня, 1928. 81 с.
- Уникальные деревья России . Т. 1. М., 2019. 208 с.
- Шиятов С. Г. К методике определения возраста деревьев, произрастающих на верхней границе леса // Известия высших учебных заведений – Лесной журнал. 1963. № 3. С. 166–167.
- Van Mantgem P. J., Stephenson N. L. Does coring contribute to tree mortality? // Canadian Journal of Forest Research. 2004. Vol. 34. № 11. P. 2394–2398.

METHODOLOGICAL APPROACHES FOR DETERMINING THE AGE OF TREES

RUMYANTSEV
Denis Evgenyevich

*D.Sc., Mytishchi filial of Bauman Moscow state technology university,
dendro15@list.ru*

CHERAKSHEV
Andrey Vasilyevich

*PhD student, Mytishchi filial of Bauman Moscow state technology
university, chibin902@mail.ru*

Keywords:

tree rings
age of trees
dendrochronology
review
methodological
approaches

Summary: In the course of various environmental studies it is often necessary to determine the age of woody plants. This issue can be of direct practical significance in forestry, forest inventory, as part of the care of trees in an urban environment, and when performing forensic botanical examinations. It is well known that using tree-ring information can give accurate age estimates, but researchers are not always correctly informed about the acceptable limits of using this approach. The article discusses methodological features and limitations in estimating the age of trees in different ways. We consider such approaches as estimating the age of trees by diameter, determining the age of conifers by whorls, determining the age of trees by appearance, as well as the age of trees in plantings by documents. The main attention is paid to methodological approaches based on the analysis of information of annual rings. Two methodological approaches developed by the authors for determining the age of trees – natural monuments are considered in detail.

Reviewer: L. I. Agafonov

Received on: 22 January 2020

Published on: 26 December 2020

References

- A catalogue of the plants. M.: Izd-vo Botanicheskogo sada, 1939. 128 p.
- Andersen H. K. El', Skazki i istorii. M.: Vita, 1992. P. 171–178.
- Anuchin N. P. Forest inventory. M.; L.: Goslesbumizdat, 1960. 523 p.
- Golenkin M. I. Guide to the Botanical garden of the Imperial Moscow University. M.: Tipografiya Moskovskogo un-ta, 1909. 75 p.
- Komin G. E. Vozrastnaya struktura i stroenie drevostoev zabolochennykh lesov mezhdurech'ya Loz'vy i Pelyma: Avtoref. dip. ... kand. biol. nauk. Sverdlovsk, 1964. 27 p.
- Korchagina V. A. Botanika: Uchebnik dlya 5–6 klassov sredney shkoly. M.: Prosveschenie, 1980. 255 c.
- Leonardo da Vinci. Izbrannye estestvennonauchnye proizvedeniya. M.: AN SSSR, 1955. 1207 p.
- Lesnaya enciklopediya. T. 1. M.: Sov. enciklopediya, 1985. 563 p.
- Lipatkin V. A. Pal'chikov S. B. Rumyantsev D. E. Zhavoronkov Yu. M. Possibilities of using the method of cross-dating of wood-ring chronologies in the investigation of cases related to illegal logging, Teoriya i praktika sudebnoy ekspertizy. 2010. No. 3. P. 244–254.
- Pal'chikov S. B. Rumyantsev D. E. Modern equipment for dendrochronological research, Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik. 2010. No. 3 (72). P. 46–51.
- Ronis E. Ya. Formy eli obyknovennoy v lesah Latviyskoy SSR i ih lesohozyaystvennoe znachenie: Avtoref. dip. ... kand. sel'hoz. nauk. Elgava, 1966. 27 p.
- Rules for creating, maintaining and protecting green spaces in Moscow. M.: Departament prirodopol'zovaniya i ohrany okruzhayushey sredy, 2012. 138 p.
- Rumyantsev D. E. Cherakshev A. V. Dendroclimatic diagnostics of the state of the strobus section pines in the conditions of the MSFU dendrological garden, Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik. 2013. No. 7 (99). P. 121–127.
- Rumyantsev D. E. Ryahina K. N. On the need to rename the larch of Peter I to Hoffman's larch (based on the results of dendrochronological studies of old-aged larch in the branch of the Botanical gardens of Moscow State University (Apothecary garden), Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya. 2017. No. 4-1. P. 61–62.
- Rumyantsev D. E. History and methodology of forest dendrochronology. M.: MGUL, 2010. 109 p.
- Shiyatov P. G. K metodike opredeleniya vozrasta derev'ev, proizrastayuschiy na verkhney granice lesa, Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy – Lesnoy zhurnal. 1963. No. 3. P. 166–167.
- Sukachev V. N. Forest tree species: their systematics and phytosociology. Ch. 1. Hvoynye. M.: Novaya

- derevnya, 1928. 81 p.
- Twenty-five Pressler formulas for calculating wood growth and wood augmentation. SPb.: A. F. Dervien, 1875. 92 p.
- Unique trees of Russia. T. 1. M., 2019. 208 p.
- Van Mantgem P. J., Stephenson N. L. Does coring contribute to tree mortality?, Canadian Journal of Forest Research. 2004. Vol. 34. No. 11. P. 2394–2398.
- Zhuravlev N. I. Protection of green spaces from diseases. L.: VZLTI, 1964. 88 p.



ПОРТРЕТЫ

КОРОСОВ
Андрей Викторович

д. б. н., Петрозаводский государственный университет,
korosov@psu.karelia.ru

Подписана к печати: 28 декабря 2020 года

Не так давно мне в руки попала очередная замечательная книга Г. С. Розенберга.

Как главному редактору, мне хочется привлечь к ней внимание из чисто корыстных побуждений, рассчитывая, что каждая направленная нам научная статья как «произведение науки» впредь будет рассматриваться авторами в том числе и с точки зрения искусства. Что бы мы ни записали в «[Требованиях к публикациям](#)», их смысл, возможно, проще передать пожеланием: «Пусть будет красиво!» Эстетика слова, фразы, логики, иллюстраций – не этот ли критерий должен быть решающим перед отправкой статьи в редакцию?

Несмотря на то что это не самая новая книга, ее доступность широкому кругу читателей не была очевидна, хотя необходима! Постановка вопроса не нова. Но какие бле-

стящие ходы найдены в этой книге для его решения! Автор не сказал, кто лидирует – «яйцеголовые» или «птички божьи», но об этом стоит думать и действовать. Вот и мы вносим вклад в общее дело – петроглифы Залавруги на эмблеме нашего журнала символизируют не территориальную привязку издания, но отражают восприятие «экологии» нашими предками, портреты древней жизни.

Помимо прочего, хочется выделить описание экспертной информационной системы Волжского бассейна REGION – красивой наукоемкой конструкции, состоящей из баз данных, библиотеки алгоритмов, моделей динамики и средств интеграции знаний, которая на основе прогноза дает возможность принимать серьезные решения об управлении природными ресурсами.

Библиография

Розенберг Г. С. [Портреты экологических систем](#) (переводы в системе «наука – искусство»). Самара: Изд-во Самарского гос. экономического ун-та, 2017. 248 с.

PORTRAITS

KOROSOV

Andrey Victorovich

DSc, Petrozavodsk State University, korosov@psu.karelia.ru

Published on: 28 December 2020

References

Rozenberg G. S. Portraits of ecological systems (translations in the system «science - art»). Samara: Izd-vo Samarskogo gos. ekonomicheskogo un-ta, 2017. 248 p.