



ISSN 2414-4738

Научный журнал

Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского

ЭКОСИСТЕМЫ



Флора и фауна
Биоценология
Биология и экология
видов
Охрана природы

32 ◦ 2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В. И. ВЕРНАДСКОГО

ЭКОСИСТЕМЫ

2022

ВЫПУСК 32

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION

V. I. VERNADSKY CRIMEAN FEDERAL UNIVERSITY

EKOSISTEMY

2022

ISSUE 32

SCIENTIFIC JOURNAL • FOUNDED IN 1979 • PUBLISHED 4 TIMES PER YEAR • SIMFEROPOL

ISSN 2414-4738

Свидетельство о регистрации СМИ – ПИ № ФС 77 - 83395 от 15.06.2022 г. Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Учредитель – ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского»

Печатается по решению Научно-технического совета Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского, протокол №

Журнал включен в перечень ВАК по специальностям и соответствующим им отраслям науки: 1.5.9. Ботаника; 1.5.15. Экология.

Адрес редакции: Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, кафедра ботаники и физиологии растений и биотехнологии, пр. Академика Вернадского, 4, Симферополь, 295007
E-mail: ekotnu@list.ru

Полнотекстовые версии статей последних выпусков журнала в формате PDF и правила для авторов размещены на официальном сайте журнала по адресу: <http://ekosystems.cfuv.ru/>

Оригинал-макет: С. В. Леонов.

На обложке: Пестрянка глазчатая *Zygaena carniolica* (Scopoli, 1763). Крым, Ботанический заказник Караби-яйла (фото С. Иванова).

Подписано в печать _____. Формат 60×84/8. Усл. п. л. _____. Печать цифровая. Тираж 50 экз.
Бесплатно
Заказ № _____. Дата выхода в свет _____

Отпечатано в Издательском доме ФГАОУ ВО «КФУ имени В. И. Вернадского»
295051, г. Симферополь, бул. Ленина, 5/7

Главный редактор

Иванов С. П., д. б. н., профессор, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Заместитель главного редактора

Котов С. Ф., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Технический редактор

Леонов С. В., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Редактор текстов на английском и немецком языках

Шестакова Е. С., к. п. н., Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Ответственный секретарь

Омельченко А. В., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Контент-менеджер сайта

Николенко В. В., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Члены редакционной коллегии

Багрикова Н. А., д. б. н., Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН

Белик В. П., д. б. н., профессор, Южный федеральный университет

Бескаравайный М. М., к. б. н., Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН

Бугара И. А., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Будашкин Ю. И., к. б. н., Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН

Воронин Л. В., д. б. н., доцент, Ярославский государственный педагогический университет имени К. Д. Ушинского

Гапонов С. П., д. б. н., профессор, Воронежский государственный университет

Довгаль И. В., д. б. н., профессор, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН

Егоров В. Н., д. б. н., профессор, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН

Егорова Н. А., д. б. н., Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма

Ена А. В., д. б. н., профессор, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Ермаков Н. Б., д. б. н., Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН

Захаренко Г. С., д. б. н., профессор, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Ивашов А. В., д. б. н., профессор, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Коба В. П., д. б. н., профессор, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН

Корженевский В. В., д. б. н., профессор, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН

Мацюра А. В., д. б. н., профессор, Алтайский государственный университет

Митрофанова И. В., чл.-корр. РАН, д. б. н., Главный ботанический сад им. Н. И. Цицина РАН

Назаров В. В., к. б. н., Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Оберемок В. В., д. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Петришина Н. Н., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Пешич В., доктор наук, профессор, Университет Черногории (University of Montenegro), Черногория

Плугатарь Ю. В., д. с.-х. н., чл.-корр. РАН, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН

Репецкая А. И., к. б. н., доцент, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Рябушко В. И., д. б. н., Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН

Русина Л. Ю., д. б. н., Московский государственный зоологический парк

Савельев А. П., д. б. н., Всероссийский НИИ охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова

Свольнский А. Д., к. б. н., Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

Фатерыга А. В., к. б. н., Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН

Чаттерджи Т., доктор наук (зоологии), Международная школа Хесент (Crescent), Индия

Чуян Е. Н., д. б. н., профессор, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

УДК 556.3:528.9(470.56)

Сезонные изменения концентрации эссенциальных элементов в подземных водах Оренбургской области

Сальникова Е. В., Каныгина О. Н., Юдин А. А.

Оренбургский государственный университет

Оренбург, Россия

salnikova_ev@mail.ru, onkan@mail.ru, yudin-s97@yandex.ru

Проблема питьевой воды остро стоит в Оренбургской области, в связи с чем в последние 10 лет экологическая ситуация подвергается мониторингу. Большой объем измеряемых и отслеживаемых параметров качества воды требует нового подхода к их анализу. Часть проблем можно решить, с помощью картографирования результатов экологического мониторинга. При этом установлено, что качество подземных вод зависит, в первую очередь, от географического расположения источников, а во вторую – от сезона года. В качестве объектов анализа выбрано содержание в воде особо важных для здоровья населения эссенциальных элементов – цинка и меди. Произведен отбор проб в 35 районах Оренбургской области и осуществлено определение ряда гидрохимических показателей и эссенциальных элементов в период с 2019 по 2020 год (посезонно). Установлено, что содержание исследуемых эссенциальных элементов в Восточной зоне Оренбуржья изменяется незначительно. В Центральной и Западной зонах наблюдаются значительные посезонные изменения, что может свидетельствовать о недостатке потребления местными жителями цинка и меди в осеннее-зимний период. Жителям Центральной зоны рекомендовано круглогодично употреблять продукты с повышенным содержанием цинка и меди в легкодоступной форме с целью поддержки оптимального суточного уровня поступления микроэлементов в организм. Предложенные авторами работы двухмерные картограммы, отражающие одновременно два параметра – пространство и время (местоположение и время года), позволяют наиболее полно и оперативно проводить анализ изменения содержания цинка и меди в питьевых водах. Построение карт в режиме реального времени в электронном формате с загрузкой из облачной базы данных даст возможность оперативно получить информацию о состоянии водных объектов по области и принять решение о необходимости оптимизации рациона питания.

Ключевые слова: цинк, медь, эссенциальные элементы, концентрация, картограммы, подземные воды, Оренбургская область.

ВВЕДЕНИЕ

Оренбургская область является одним из регионов России со значительной антропогенной нагрузкой. На её территории располагаются ведущие отрасли промышленности, такие как химическая, нефтехимическая, топливная, пищевая, цветная и черная металлургия, которые являются основными источниками загрязнения подземных вод.

В связи с этим в подземные воды и затем в питьевые проникает значительное количество веществ, в том числе и металлов. Проводимые в последние годы мониторинги экологического состояния области позволили создать обширную научную информационную базу, практическое использование которой требует решения ряда методологических задач. Часть из них была успешно, на наш взгляд, решена. Это относится к использованию картографирования и разделению протяженной в меридианных измерениях области (755 км) на три зоны: западную, среднюю и восточную (Прихожай и др., 2004). В результате такого подхода появилась возможность сопоставления сочетаний многочисленных параметров, образующих те или иные доминирующие факторы в различных зонах. Результаты исследований опубликованы в работах (Сальникова, 2019; Skalny et al., 2019).

Исследования, проведенные в рамках проекта «Элементный статус населения России» (2010–2015 гг.), показывают, что Оренбургская область – наиболее неблагоприятный регион Приволжского Федерального округа (ПФО) с точки зрения баланса химических элементов у жителей (Афтанас и др., 2013). Дисбаланс между эссенциальными и токсичными элементами у населения области вызван, прежде всего, экологическими проблемами, обусловленными как природными, так и техногенными факторами.

В ряду многочисленных факторов, определяющих комфортность проживания населения области, особую роль играют эссенциальные элементы, в первую очередь, цинк и медь. Распределение их по территории области и сезонные колебания составляют отдельную сложную и неоднородную картину, по крайней мере, по двум измерениям.

В литературных источниках цинк и медь во многих аналогичных случаях упоминаются как приоритетные загрязнители (Jaipur, 2003). В то же время эти металлы относятся к эссенциальным микроэлементам, которые играют важную биологическую роль в отдельных организмах растений, животных и человека.

Серьезные нарушения в живых организмах могут быть вызваны избытком или недостатком всего лишь одного элемента (Оберлис и др., 2008). Дефицит цинка может привести к ухудшению состояния кожи, волос и ногтей, снижению аппетита, нарушению сна, увеличению длительности заживления ран и другим неспецифическим состояниям. Недостаток цинка в организме может приводить к усиленному накоплению меди, свинца и кадмия (Рахманин, Доронина, 2010).

Источниками поступления цинка в подземные воды могут быть сточные воды рудообогатительных фабрик и гальванических цехов, минеральных красок, производств пергаментной бумаги, вискозного волокна. Цинк может попадать в воды в результате процессов разрушения и растворения горных пород и минералов таких как смитсонит, цинкит, сфалерит и другие.

Содержание меди в подземных водах обусловлено взаимодействием воды с горными породами, содержащими ее (халькозин, халькопирит, ковеллин и др.) (Алексеев, 2008). К повышению концентрации меди в поверхностных водах и в донных отложениях приводят – вынос с загрязненной металлом речной воды, осаждение из воздушной среды, а также результаты хозяйственной деятельности человека (Добровольский, 2003; Романтеев, Быстров, 2010). При дефиците меди могут наблюдаться частые простудные и инфекционные заболевания, слабость, усталость, проблемы с обучением и памятью и другие (Scheiber et al., 2013).

В настоящей работе рассмотрено содержание и сезонные количественные изменения эссенциальных металлов (меди и цинка) в подземных водах Оренбургской области, оказывающих существенное влияние на здоровье населения области.

Цель исследования – на основе анализа данных специально разработанных двухмерных картограмм выявить сезонные изменения концентрации эссенциальных элементов в подземных водах Оренбургской области и разработать соответствующие рекомендации местным жителям по оптимизации рациона питания.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись подземные воды Оренбургской области. Образцы проб подземных вод для химического анализа, их хранение, транспортировку и подготовку к исследованиям проводили в соответствии с ГОСТ 31861-2012. Отбор проб воды производили в 2019–2020 годах (посезонно) в 35 районах области, разбитой на три зоны, в том числе:

Восточная зона – 8 районов;

Центральная зона – 13 районов;

Западная зона – 14 районов.

По гидрохимическим показателям оценивали водородный показатель, общую минерализацию (по величине сухого остатка), общую жёсткость и концентрации меди и цинка. Анализ проб воды осуществляли по стандартным методикам на базе межкафедральной лаборатории физико-химических методов анализа «Оренбургский государственный университет».

Полученные показатели качества и концентрации химических элементов в пробах воды сравнивали с нормативами, утвержденными СанПиН 2.1.4.1074–01 («Питьевая вода.

Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества»).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении гидрохимических исследований были получены результаты, представленные в таблице 1. Удовлетворительными считали результаты, отклоняющиеся от нормативов СанПиН 2.1.4.1074–01 в меньшую сторону.

Таблица 1

Показатели качества подземных вод

Зоны Оренбургской области	Средние показатели качества подземных вод		
	Водородный показатель, рН	Общая жесткость, мг/дм ³	Общая минерализация, мг/дм ³
Западная	7,4±0,1	4,8±0,1	670±10
Центральная	7,5±0,1	5,0±0,1	790±12
Восточная	7,2±0,1	8,4±0,2	640±20
Норматив по СанПиН 2.1.4.1175-02	6,0–9,0	7,0	1000–1500

Примечание к таблице. Указаны средние значения ± стандартное отклонение.

Анализ приведенной таблицы показывает, что качество подземных вод в зонах различаются по некоторым показателям. Средние значения водородного показателя подземных вод области за весь период наблюдений составили от 7,2 до 7,5, что позволяет отнести их к категории слабощелочных; они примерно одинаковы для всей области.

Однако, уровень общей жесткости воды в Восточной зоне области выше, чем в Центральной и Западной зонах в 1,7 и 1,8 раза, соответственно (табл. 1). Значения общей жёсткости подземных вод Оренбургской области составляют 4,8–8,4 мг/дм³ (табл. 1), что согласно СанПиН 2.1.4.1175-02 «Гигиенические требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения. Санитарная охрана источников», позволяет отнести её к группе вод средней жёсткости. Употребление питьевой воды с жесткостью выше 7,0 мг/дм³ длительное время оказывает негативное воздействие на здоровье населения, вызывая образование камней в желчном и мочевом пузырях, почках, а также артрозы и заболевания сердечно–сосудистой системы (Боев, Лесцова, 2010). Для того, чтобы уменьшить показатель жесткости воды жителям Восточной зоны рекомендовано кипятить воду перед употреблением или же применять специальные фильтры для очистки воды. Вышеназванные рекомендации позволят увеличить продолжительность жизни и снизить риск заболевания сердечно – сосудистой системы.

Общая минерализация в целом по области меньше норм СанПиН 2.1.4.1175-02 и составляет около половины нормы; ниже всего этот показатель для подземных вод Восточной зоны области (табл. 1). Для Центральной зоны общая минерализация вод в 1,2 раза выше. При этом в образцах воды Асекеевского, Бузулукского, Первомайского и Сорочинского районов Западной зоны уровень общей минерализации изменяется от 1054 до 1165 мг/дм³, практически в пределах нормы. В воде пяти районов из тринадцати, расположенных в Центральной зоне области, значения общей минерализации составили 1017–1165 мг/дм³.

Это может быть вызвано содержанием солей хлористоводородной кислоты, калия, натрия, а также токсичных ионов тяжелых металлов, которые представляют опасность для живых организмов (Еремин и др., 2010).

Такой первичный анализ – на первом уровне – распределение показателей подземных вод на территориях, зонах и в целом по области, по нашему мнению, необходимо дополнять временными параметрами – сезонными изменениями. Сезонные изменения целесообразно визуализировать как оперативно воспринимаемую наглядную информацию в виде цветных

карт – специальных двухмерных карт-картограмм, которые можно построить посредством ПО QuickMap2. Программа представляет собой модуль простейшей картографии, основными возможностями которого является оцифровка карт на основе растровой графики, и создание картографических иллюстраций из массива данных.

Для оцифровки было подготовлено изображение карты Оренбургской области в формате bmp, где каждый район разделен тремя изолиниями на 4 части: отображение концентрации исследуемых элементов, цинка и меди, по временам года.

Картографированные изображения сезонных изменений содержания цинка в подземных водах Восточной, Западной и Центральной зон области приведены на рисунках 1–6. В левом верхнем углу показаны распределения сезонов на карте.

Можно видеть, что содержание цинка во всех районах Восточной зоны близко к значениям ПДК (3,8–5,5 мг/дм³), но сезонные количества изменяются различно для разных районов (рис. 1). В некоторых районах (Новоорск, Ясный, Светлый) в течение года содержание, близко к норме. В остальных районах отмечается снижение содержания цинка в зимний период практически в 2 раза.

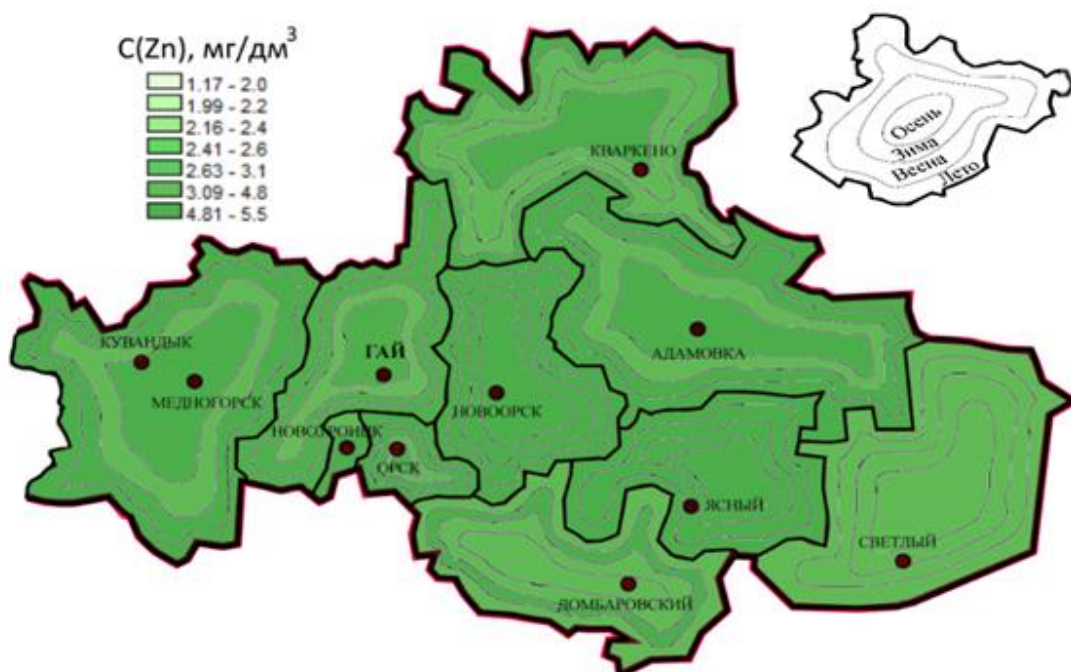


Рис. 1. Картограмма содержания цинка в подземных водах в районах Восточной зоны

Жители района Светлый испытывают дефицит цинка круглый год, жители 4-х районов должны увеличить содержание цинка в рационе зимой.

На рисунке 2 показана картограмма с сезонными изменениями содержания цинка в Центральной зоне Оренбургской области.

Видно, что концентрация цинка в исследуемых образцах воды по всей зоне ниже нормы: варьируется в пределах от 1,17 мг/дм³ (Илекский район в зимний период) до 3,7 мг/дм³ (Сакмарский район в весенний период), то есть от 20 до 60 % нормы и существенно зависит от смены сезона. Нормальное содержание цинка в воде отмечается в Оренбургском, Тюльганском и Переволоцком районах весной и зимой.

В четырех районах (Саракташском, Сакмарском, Илекском, Октябрьском) концентрация цинка в зимний период составила менее 2,0 мг/дм³. В весенний период данный показатель изменялся от 1,8 мг/дм³ до 3,7 мг/дм³. Минимум содержания цинка относится к осенне-зимнему сезону.

Анализ проб воды, отобранных в летний и осенний периоды, показывает, что концентрация цинка колеблется в пределах 1,9–3,1 мг/дм³. В исследуемых пробах воды превышений ПДК по цинку обнаружено не было.

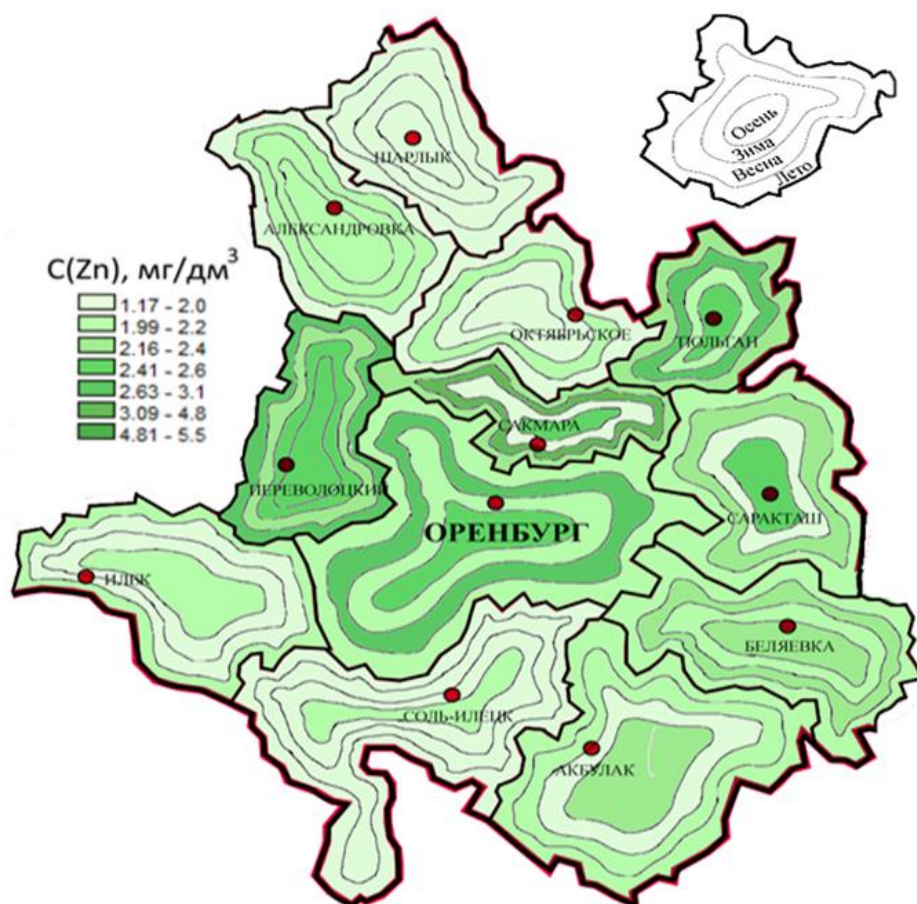


Рис. 2. Картограмма содержания цинка в подземных водах в районах Центральной зоны

Вариации содержаний цинка в подземных водах в Западной зоне представлены на рисунке 3.

Первое же рассмотрение карты Западной зоны (рис. 3) показывает, что в течение года содержание цинка в двух районах (Бугуруслан, Бузулук) имеют большой разброс – в несколько раз, в то время как в ряде районов остается практически неизменным (Ташла, Тоцкое, Северное, Пономаревка, Новосергиевка, Плешаново). В двух районах Первомайском и Пономаревском содержание цинка составляет около 3 мг/ дм³ круглый год, то есть 60 % от нормы. Жителям Бугуруслана и Бузулука необходимо учитывать недостаток цинка круглогодично и особенно в осенне-зимний период.

По трем картам можно сделать следующее заключение: наиболее благополучной зоной в обеспечении населения цинком круглогодично можно считать Восточную зону. В западной зоне часть жителей могут испытывать дефицит цинка в осенне-зимний период. В центральной части жители в подавляющем большинстве испытывают дефицит цинка в течение года.

Приведенный способ описания научной информации позволяет с помощью экспрессного анализа оценить общую ситуацию, величину и тренд изменений, определить время и положение критических точек, которые могут стать бифуркационными в общей системе (Пригожин, Стенгерс, 1986). Так, например:

- превышение ПДК цинка в подземных водах не отмечено, в целом, отмечается его недостаток;
- критические точки, отвечающие минимальному содержанию цинка, отмечены в четырех районах Центральной и Западной зон в осенне-зимний период (до 20 % от нормы).

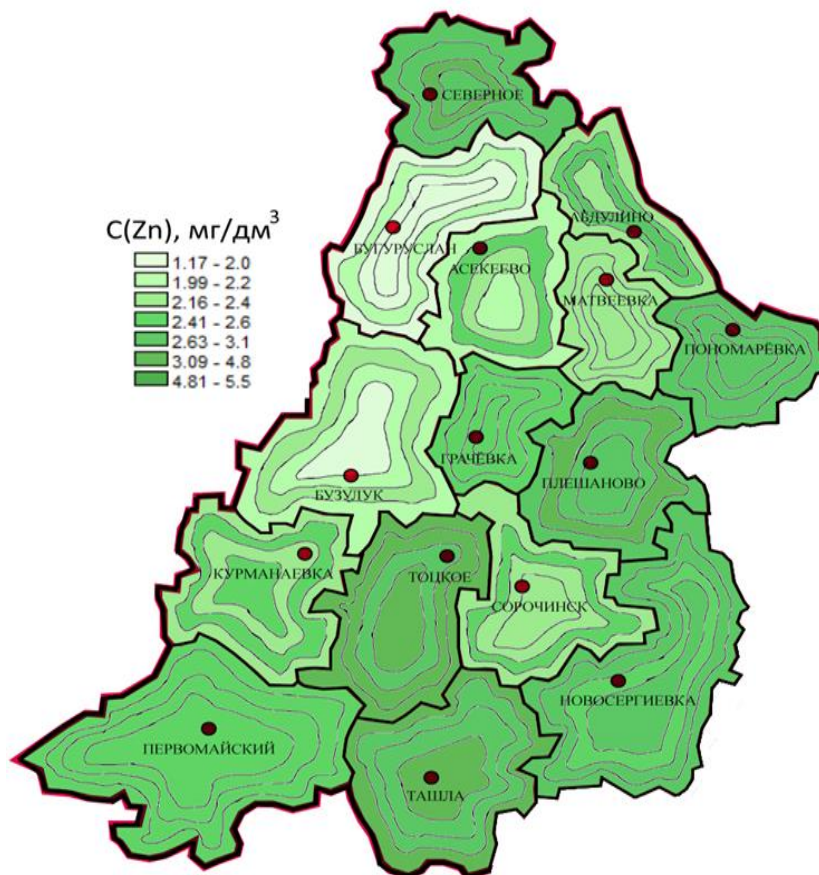


Рис. 3. Картограмма содержания цинка в подземных водах в районах Западной зоны

Полученная информация позволяет проводить подробный анализ ситуации для определения причинно-следственной связи с экологическим состоянием.

Подтверждением целесообразности использования картографирования для анализа результатов мониторинга, может служить и пример оценки содержания меди в подземных водах. Картограммы с представлением сезонных изменений содержания меди в подземных водах в трех зонах области приведены на рисунках 4–6. Первичный анализ показывает, что содержание меди в подземных водах еще более неодинаково как по расположению местности, так и по сезонам года.

Для Восточной области наблюдается полностью однородная картина, свидетельствующая о круглогодично стабильном содержании меди в пределах ПДК.

В Центральной зоне, картина обратная, пестрая – количество меди в воде существенно меняется не только по районам, но и по временам года (рис. 5).

Подземные воды Центральной зоны «бедны» медью, за исключением восточных участков. Наблюдаются низкие концентрации вышеуказанного микроэлемента, равные

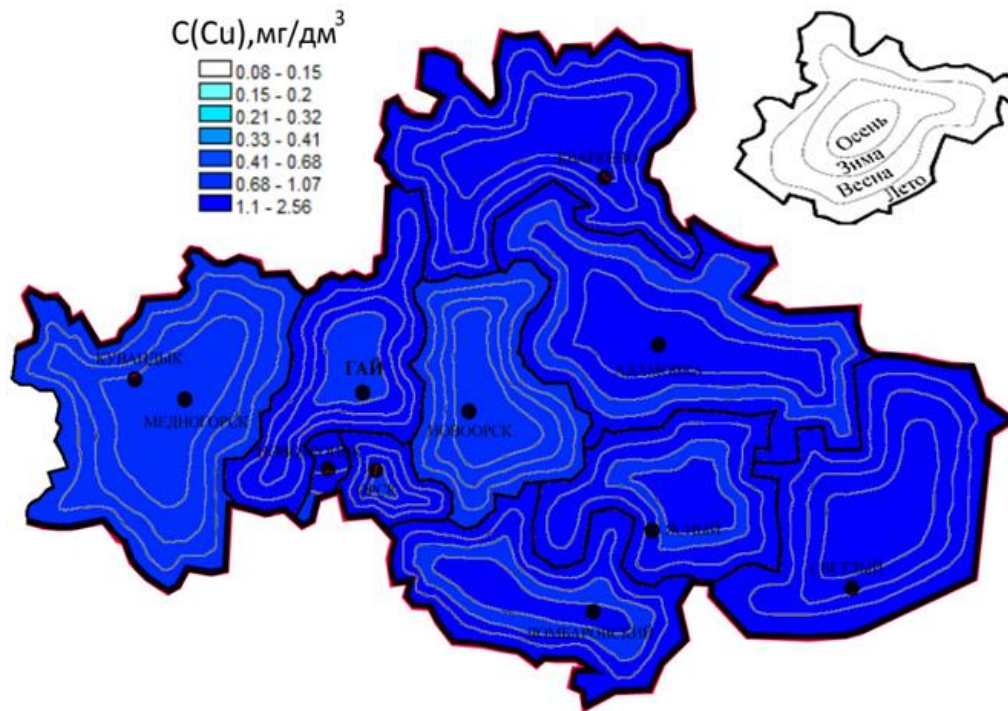


Рис. 4. Картограмма содержания меди в подземных водах в районах Восточной зоны

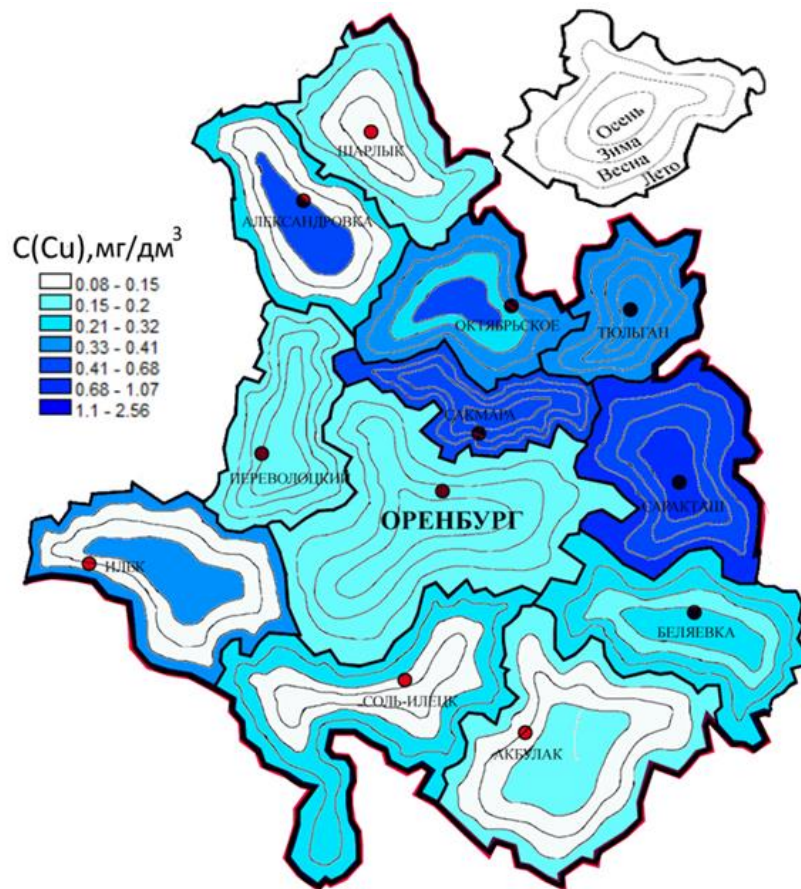


Рис. 5. Картограмма содержания меди в подземных водах в районах Центральной зоны

0,5ПДК и ниже. Наименьшее содержание меди обнаруживается в образцах воды из Илекского района в зимний период ($0,09 \text{ мг/дм}^3$). В подземной воде Саракташского района наблюдается наибольшая концентрация меди, равная $0,82 \text{ мг/дм}^3$ в осенний период.

В летнее время года отмечается наименьшая концентрация меди в воде Акбулакского района ($0,18 \text{ мг/дм}^3$) и наивысшая в Саракташском районе ($0,77 \text{ мг/дм}^3$).

Жителям, проживающим в районах Центральной зоны области, рекомендуется употреблять разнообразные продукты с высоким содержанием цинка и меди.

С медью благополучная ситуация наблюдается только в двух районах в течение всего года (Первомайский, Тоцкий). В Ташлинском и Северном районах в течение полугодия содержание меди составляет меньше половины от ПДК. Обедненными медью подземными водами пользуются жители нескольких районов (Бузулукского, Бугурусланского, Новосергиевского, Абдулинского и Первомайского). Жители Грачевки и Матвеевки используют воду, в которой меди нет совсем. В селе Асекеево такая ситуация сохраняется в течение шести месяцев. Получается, что большая часть населения Западной зоны испытывает существенный медный дефицит.

Распределение меди в подземных водах Западной зоны показано на рисунке 6.

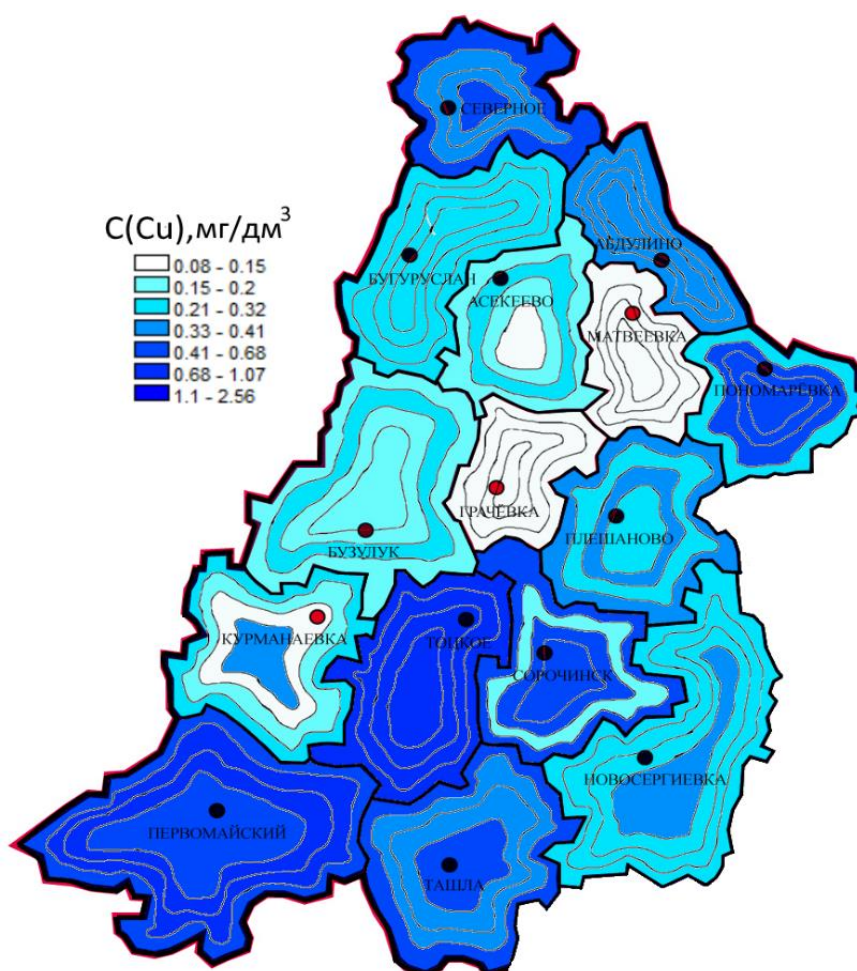


Рис. 6. Картограмма содержания меди в подземных водах в районах Западной зоны

В Западной зоне картина тоже пестрая – количество меди в воде существенно меняется не только по районам, но и по временам года. Благополучная ситуация наблюдается только в двух районах в течение всего года (Первомайский, Тоцкий).

К критическим точкам, соответствующим минимальному содержанию меди, можно отнести двадцать один район, жители которых вообще пьют воду, не содержащую медь (Матвеевский и Грачевский), а также шесть районов в осенне-зимний период.

Данные картографии должны способствовать мероприятиям, приводящим к нормированию балансов цинка и меди в организмах населения области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг качества питьевой воды в Оренбургской области выявил неравномерное распределение в ней эссенциальных элементов – цинка и меди – в зависимости от двух параметров – пространственного расположения поселений, так и от времени года. Для оперативного управления ситуацией необходимо апробировать новые формы представления информации, получаемой в процессе мониторинга.

В качестве новой формы визуализации информационной базы, полученной при мониторинге состояния питьевой воды, предложены двухмерные картограммы, отображающие сезонное распределение эссенциальных элементов на территории области.

Анализ результатов мониторинга сезонных изменений концентраций цинка и меди в подземных водах Оренбургской области с помощью картографии существенно ускоряет и расширяет процесс оценки экологической ситуации в целом и определение критических точек в конкретных случаях. Картографический анализ результатов мониторинга вод, проведенного в 2019–2020 годах, позволил получить информацию как об общем положении с питьевой водой по области и в каждой зоне, так и отметить особые точки, для которых требуется быстрое решение и принятие мер по обеспечению населения эссенциальными элементами – цинком и медью.

Результаты визуального анализа представленных картограмм показывают следующее: содержание цинка и меди в водах во всех зонах Оренбургской области не превышают значений ПДК.

Наиболее благополучное положение наблюдается в Восточной зоне области, где концентрация цинка в среднем составляет 4,65 мг/дм³, что не превышает ПДК и может являться оптимальным значением для ежесезонного поступления данного микроэлемента в рацион питания местного населения с питьевой водой.

В остальных двух зонах наиболее ощутимый дефицит эссенциальных элементов наблюдается в осенне-зимний период, что требуется учитывать жителям при составлении рациона питания.

Авторы считают, что целесообразным было бы осуществить разработку информационного картографического портала, позволяющего визуализировать и анализировать данные экологического мониторинга с применением геоаналитики на картах Оренбургской области: для каждого района разработать дашборд с диаграммами, отображающими основные показатели качества питьевых вод по запросу пользователя.

Список литературы

- Алексеев Ю. В. Тяжелые металлы в агроландшафте. – СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2008. – 216 с.
- Афтанас Л. И. Элементный статус населения России. Ч. 4: Элементный статус населения Приволжского и Уральского федерального округов. – СПб.: Медкнига «ЭЛБИ-СПб», 2013 – 576 с.
- Боев В. М., Лесцова Н. А. Осторожно, вода! – Оренбург: ИПК «Газпромпечатать», 2010. – 28 с.
- Добровольский В. В. Основы биогеохимии. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.
- Оберлис Д., Харланд Б., Скальный А. Биологическая роль макро- и микроэлементов у человека и животных. – СПб.: Наука, 2008. – 250 с.
- Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
- Прихожай Н. И., Новоженин И. А., Клевцов Н. В. Атлас мониторинга земель Оренбургской области. – Оренбург: Печатный дом «Димур», 2004. – 58 с.
- Рахманин Ю. А., Доронина О. Д. Стратегические подходы управления рисками для снижения уязвимости человека вследствие изменения водного фактора // Гигиена и санитария. – 2010. – № 2. – С. 8 – 13.

Романтеев Ю. П., Быстров В. П. Металлургия тяжелых цветных металлов. Свинец. Цинк. Кадмий. – М.: Издательский дом МИСиС, 2010. – 576 с.

Сальникова Е.В. Система экологического мониторинга содержания химических элементов в биосфере и их влияние на статус цинка у населения региона (на примере Оренбургской области): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Москва: ФГАУ ВО РУДН, 2019. – 48 с.

Токсикологическая химия. Аналитическая токсикология / [Ред. Р. У. Хабриева]. - М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 752 с.

Skalny A. V., Salnikova E. V., Burtseva T. I., Skalnaya M. G., Tinkov A. A. Zinc, copper, cadmium, and lead levels in cattle tissues in relation to different metal levels in ground water and soil // Environmental Science and Pollution Research. 2019. – Vol. 26, iss. 1. – P. 559-569.

Jarup L. Hazards of heavy metal contamination // Br Med Bull. – 2003. – Vol. 68. – P. 167-182.

Salnikova E.V., Kanygina O.N., Yudin A.A. Seasonal changes in the concentration of essential elements in the underground waters of the Orenburg region // Ekosistemy. 2022. Iss. 32. P. 5–14.

The problem of drinking water is acute in Orenburg region; therefore, the environmental situation has been monitored over the past 10 years. A large volume of measured and monitored water quality parameters requires a new approach to their analysis. Some of the problems can be solved by mapping the results of environmental monitoring. At the same time, it was found out that the quality of groundwater depended, first of all, on the geographical location of the sources, and secondly, on the season of the year. The content of zinc and copper, the essential elements for public health, was selected as the object of analysis. Samples were taken in 35 districts of Orenburg region and a number of hydrochemical indicators and essential elements were determined seasonally in the period from 2019 to 2020. The results demonstrated that the content of the studied essential elements in the Eastern zone of Orenburg region varied slightly. Significant seasonal changes were observed in Central and Western zones, which might indicate insufficient consumption of zinc and copper by local residents in the autumn-winter period. Residents of the Central zone are recommended to consume products with a high content of zinc and copper in an easily accessible form all year round in order to maintain an optimal daily intake of trace elements in the body. The authors proposed two-dimensional cartograms, reflecting two parameters simultaneously - space and time (location and time of year). It allows making the most complete and prompting analysis of changes in the content of zinc and copper in drinking waters. Real-time mapping in electronic format with downloading from a cloud database will make it possible to obtain information about the state of water bodies in the region quickly and make a decision on the need to optimize the diet.

Key words: zinc, copper, essential elements, concentration, cartograms, underground water, Orenburg region.

Поступила в редакцию 25.10.22

Принята к печати 15.11.22

УДК 581.524.3

Вторичные сукцессии фитоценозов в степных экосистемах Тувы

Самбуу А. Д.

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН

Кызыл, Россия

sambuu@mail.ru

Изучение сукцессии растительности под влиянием меняющегося антропогенного режима актуально и в теоретическом плане в аспекте изучения биоразнообразия и в практическом плане с точки зрения сохранения природных возобновляющихся ресурсов. Степной регион Центральной Азии, к которому принадлежат степи Тувы, поддерживал человеческую культуру тысячи лет и в течение этого периода подвергался серьезным климатическим и социальным изменениям. В прошлом эта территория была мало населена, и малая продуктивность травостоя вполне обеспечивала продуктами животноводства местное население, ведущее кочевой образ жизни. Народные обычаи строго регламентировали характер пастбы – ее сроки, циклы и продолжительность. Сыграв исключительную важную роль в истории человечества, степь первой из всех других ландшафтов оказалась на грани полной потери своего первоначального облика и природного потенциала вследствие замены травяных экосистем агроландшафтами. В настоящее время среди природных зон Тувы, степь и лесостепь подверглись наиболее сильной антропогенной трансформации в основном из-за выпаса, распашки, влияния огня, водохранилища и добычи полезных ископаемых открытым способом. В данной статье проведен анализ вторичных сукцессий степных экосистем Республики Тыва, которые происходят под влиянием внешних воздействий. Цель данной работы – изучение особенностей вторичных сукцессий, возникающих под действием выпаса, влияния огня, при зарастании залежей в степных экосистемах Тувы. Объектом исследования являются фитоценозы степного и лесостепного поясов межгорных котловин Тувы. Ключевые участки расположены в степных экосистемах Турано-Уюкской, Центрально-Тувинской и Убсунурской котловин. Выявлено, что пастбищная сукцессия обладает высокой подвижностью, обратимостью и закономерно отвечает на изменение интенсивности выпаса; пирогенные и залежные сукцессии детерминированы и направленно развиваются в сторону исходной экосистемы.

Ключевые слова: пастбище, залежь, сукцессия, степи, растительное сообщество, экосистема, Тува.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Т. А. Работнову (1978), вторичные сукцессии возникают там, где в результате воздействия каких-либо внешних по отношению к биогеоценозу факторов существовавший фитоценоз уничтожается и на его месте возникает новый. Затем происходит смена фитоценозов в направлении к климаксу в соответствии с экотопическими условиями и воздействующими на фитоценоз факторами. Вторичные сукцессии существенно отличаются от первичных тем, что они начинаются в условиях уже сформировавшейся почвы, содержащей микроорганизмы, споры и семена растений. Поэтому вторичные сукцессии протекают достаточно быстро и стадии сукцессии доступны наблюдению год за годом. Стадии сукцессии можно проследить и тогда, когда воздействие человека внезапно прекращается, например, на заброшенных пашнях или на более не используемых пастбищных землях.

За последние 50 лет в растительном покрове Тувы происходят заметные изменения, что связано с изменением нагрузки и режима выпаса скота на пастбищах, распашкой земель и заброшенностью пашен, со строительством Саяно-Шушенской ГЭС, с вырубкой лесов, палами и пожарами, освоением месторождений. В советские времена основные изменения в растительном покрове Тувы были связаны с распашкой целины, а распад государственных сельскохозяйственных предприятий в 1990-ые годы привел к резкому сокращению посевных площадей с переводом их на залежи. В связи с тем, что в республике основной вид ведения хозяйства животноводство, изменение пастбищ происходит постепенно, но с не меньшими последствиями для природы степей. Очевидно, уже с реализацией строительства железной

дороги, связывающей Туву с российской сетью железных дорог, в ближайшей перспективе здесь нужно ожидать изменения в направлении увеличения прессы на растительный покров. Все эти изменения растительного покрова приводят к исчезновению некоторых видов или к серии восстановительной сукцессии. Подобные изменения происходят во всех странах (Самбуу, 2013).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Тува занимает центральную часть Азии между 50–54° с.ш. и 89–99° в.д. Границы Тувы на западе, севере и востоке проходят в основном по водораздельным горным хребтам высотой 2000–3000 м над ур. м, на юге – по приподнятым равнинам и предгорьям на высоте 800–1000 м. Протяженность Тувы с запада на восток более 700 км, с севера на юг – от 100 до 450 км, общая площадь – 170,5 тыс. км².

Климат Тувы резко континентальный, обусловленный, главным образом, удалением от морей и океанов. Зимой территория находится почти в центре Азиатского антициклона. Среднегодовая температура составляет -3,7 °С, средняя января – -28°–35 °С, июля – 15–20 °С. Наибольшие амплитуды температур (100–120°) характерны для межгорных котловин. Распределение осадков по территории и по сезонам неравномерное. Среднегодовые осадки в котловинах составляют 200–300 мм, в горах – 700 мм. Большая часть осадков (80 %) выпадает в июле и августе, преимущественно в виде ливневых дождей. Вегетационный период составляет в среднем 125 дней. Мощность снегового покрова в котловинах – 10–20 см, в горах – 50–70 см (Бахтин, 1968).

Повышенная континентальность климата Тувы создает большое разнообразие фитоценозов, принадлежащих к высокогорно-тундровому, лесному, степному, луговому и болотному типам растительности. Леса занимают 49 % территории республики и приурочены к горным поднятиям. Степи в Туве являются широко распространенным типом растительности, занимают 17 % территории и расположены в основном в котловинах (Кушев, 1957).

Объектами исследования послужили фитоценозы степного и лесостепного поясов межгорных котловин Тувы. Ключевые участки расположены в степных экосистемах Турано-Уюкской, Центрально-Тувинской и Убсунурской котловин (рис. 1). Гидротермические показатели и координаты котловин приведены в таблице 1.

Исследования по изучению вторичной сукцессии степной растительности проводились в сезоны 1996–2022 годов. В каждой местности были выбраны ключевые участки (размером от 1 до 10 га), представляющие определенную стадию изучаемой сукцессии. Описывался видовой состав растительности этих участков и исходной экосистемы и тип воздействия. При изучении сукцессий мы использовали изменение двух основных показателей: 1. Изменение видового состава сообществ (Александрова, 1964; Шенников, 1964); 2. Изменение структуры доминантов (Воронов, 1973).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В течение тысячелетий землепользование в Туве обусловлено своеобразием природно-климатических условий и развитием отгонно-пастбищного животноводства. В настоящее время животноводство является главной традиционной отраслью хозяйства республики (Самбуу, Аюнова, 2016).

Пастбищная сукцессия. Типичный пример вторичной сукцессии – деградация пастбищ при усилении нагрузки и их восстановление при ее снижении.

За годы исследований в общем систематическом списке флоры ключевых участков зарегистрировано всего 92 вида высших сосудистых растений, относящихся к 59 родам, 24 семействам (табл. 2). Наиболее богаты видами семейства Poaceae, Asteraceae, Fabaceae и другие. Видовое богатство этих семейств по «Флоре СССР» (Мальшев, 1972) характеризует

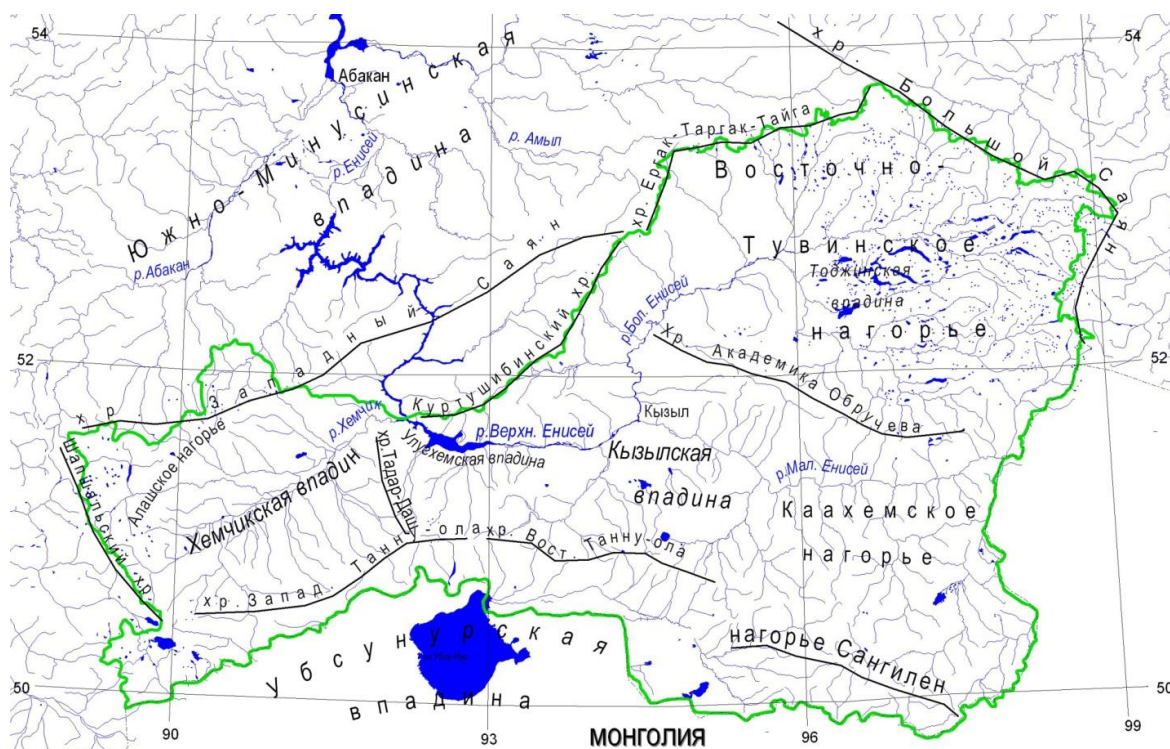


Рис. 1. Картограмма орографии Тувы и сопредельных регионов

Таблица 1

Характеристика районов исследования

Местность	Координаты	Высота над уровнем моря, м	Годовое количество осадков, мм	Среднеголетняя температура, °С		
				года	января	июля
Турано-Уюкская котловина	52°077' с.ш. 94°173' в.д.	800–1000	350–400	–3,7	–30,0	18,0
Центрально-Тувинская котловина	51°20'–51°33' с.ш. 90°22'–94°25' в.д.	500–1100	250–350	–4,5	–33,7	19,6
Убсунурская котловина	49°50'–50°05' с.ш. 95°03' в.д.	900–1250	180–290	–5,7	–31,5	17,7

аридные черты флоры. Полный список включает виды, зарегистрированные в сезоны 1998–2022 годов на ключевых участках.

Один из признаков сукцессии – смена видового состава сообществ.

Участок Эрзин характеризуется неизменным режимом выпаса. Круглогодичная пастбищная нагрузка составляет 1 овца на 0,5 га, что приводит к перевыпасу. За годы исследования выпало 11 %, вновь появилось до 17 %, постоянно существовали в сообществе 44 % растений. Высокая нагрузка и не меняющийся режим выпаса приводят к некоторому постоянству определенного состава сообществ.

Участок Морен находился на VI стадии пастбищной дигрессии (менее 1 овцы/0,2 га). В 1999 году пастбище было полностью оставлено, и его сообщества начали постепенно восстанавливаться, что характеризовалось большим (44 %) количеством появившихся видов и малым (4 %) – выпавших.

Участок Ямаалыг в течение 30 лет был под сильной пастбищной нагрузкой (1 овца/0,3 га) (рис. 2). В 1993 году с созданием государственного биосферного заповедника «Убсунурская котловина» степь используется как зимнее пастбище с минимальной нагрузкой (1 овца/5 га). В ходе сукцессии доля постоянных видов составляла 21 % от списка видов, флуктуирующих – 9, выпавших – 51 и появившихся – 19 %. Коренная смена режима выпаса привела к восстановительной пастбищной сукцессии.

Таблица 2

Флористическая характеристика видов ключевых участков

№	Семейство	Число родов	Число видов	Доля от общего числа видов, %
1	Poaceae	10	18	20,0
2	Asteraceae	7	13	14,0
3	Chenopodiaceae	8	13	14,0
4	Rosaceae	4	6	7,0
5	Brassicaceae	5	5	5,4
6	Fabaceae	4	5	5,4
7	Caryophyllaceae	2	2	2,3
8	Lamiaceae	2	3	3,3
9	Ranunculaceae	3	3	3,3
10	Cyperaceae	1	2	2,3
11	Scrophulariaceae	1	1	1,1
12	Boraginaceae	1	1	1,1
13	Polygonaceae	1	1	1,1
14	Alliaceae	1	5	5,4
15	Convolvulaceae	1	1	1,1
16	Iridaceae	1	3	3,3
17	Plantaginaceae	1	1	1,1
18	Urticaceae	1	1	1,1
19	Apiceae	1	1	1,1
20	Ephedraceae	1	3	3,3
21	Limoniaceae	1	1	1,1
22	Primulaceae	1	1	1,1
23	Athyriaceae	1	1	1,1
24	Crassulaceae	1	1	1,1
	Всего	59	92	100

Участок Чоогей в течение 30 лет находился под сильным выпасом. Ответом на смену сильной пастбищной нагрузки с 1995 года (1 овца/0,25 га) на легкую (1 овца/3,3 га) явилась демулационная сукцессия, характерной особенностью которой была смена видовой состава сообществ. За 26 лет сукцессии доля появившихся видов составляла 22 %, флуктуирующих – 19, постоянных – 31, выпавших – 28 %.

Участок Ончалаан более ста лет находится под постоянной умеренной зимней нагрузкой и в течение 26 лет наблюдения здесь сохраняется постоянный видовой состав сообществ. Вне зависимости от погодных условий в фитоценозе не появилось и не выпало ни одного вида.

Следующий показатель сукцессии – структура доминирования видов.

На участке Эрзин в период 1997–2022 годах доминантами сообщества были дигрессионные виды *Artemisia frigida* (43 % от зеленой фитомассы), *Potentilla acaulis* (16 %), *Cleistogenes squarrosa* (21 %). В период 2008–2010 годов значительных изменений в структуре



Рис. 2. Ключевой участок сухой степи Чоогей в Убсунурской котловине (Тува, 2022)

доминирования не происходит. В сообществах по-прежнему доминируют *Artemisia frigida* (28 %), *Cleistogenes squarrosa* (15 %), *Potentilla acaulis* (25 %), хотя их доли несколько поменялись. *Stipa krylovii* остается в числе субдоминантов.

На участке Морен смена режима выпаса с тяжелого на нулевой приводит к коренному изменению структуры доминантов. Так, в течение первого периода исследования доминантами сообществ были *Artemisia frigida* (35 %), *Carex duriuscula* (25 %) и *Cleistogenes squarrosa* (24 %), во втором периоде доля *Stipa krylovii* составляет 12 %, *Artemisia frigida*, *Carex duriuscula* выпадают из числа доминантов, их замещают *Achnatherum splendens*, *Agropyron cristatum*, *Festuca valesiaca*. В 2012 году доля *Achnatherum splendens* составляет 25 % фитомассы.

На участке Ямаалыг в 1998–2000 годах основными доминантами сообществ были *Stipa krylovii*, *Agropyron cristatum* и *Cleistogenes squarrosa*. Доля *Artemisia frigida* составляла в 1998 году 10 %. За десятилетие в фитоценозе произошли кардинальные изменения: доля *Stipa krylovii* и *Cleistogenes squarrosa* уменьшилась почти в 3 раза, *Artemisia frigida* выпала из числа доминантов, основными доминантами становятся *Festuca valesiaca* и *Caragana pygmaea*. За последние 2019–2022 годы участие *Festuca valesiaca* повысилось с 18 до 25 %, а *Caragana pygmaea* с 27 до 38 %. Недовыпас приводит к закустаренности степи.

На участке Чоогей с 1998 по 2022 годы при снятии пастбищной нагрузки произошло увеличение доли дерновинных злаков с 66 до 73 % и выпадение из числа доминантов непоедаемого вида *Potentilla acaulis*. Усиление нагрузки в 2021 году вновь приводит к смене доминантов с увеличением в несколько раз обилия *Potentilla acaulis* и *Artemisia frigida* и выпадением из числа доминантов *Agropyron cristatum*.

На стабильном пастбищном участке Ончалаан изменений в составе доминантов не происходит. В результате пастбищной сукцессии происходит незначительное изменение в структуре экологических групп растений с некоторой ксерофитизацией растительности на участках подгорных равнин.

Проведенный анализ по таким показателям как изменение видового состава, структуры доминирования видов доказывает тесную связь всех показателей фитоценоза с пастбищной нагрузкой. На любое изменение режима выпаса фитоценоз отвечает закономерными изменениями его видового состава, структуры доминирования и интенсивности продукционного процесса.

Пирогенная сукцессия. Пожар или пал воздействует на степную растительность по-разному в зависимости от силы и частоты горения травостоя или интенсивности выпаса. Когда не горевшее ранее сообщество подвергается пожару, возникает пик видов, который затем уменьшается.

В нашем случае пожар (или пал) был однократным, и мы наблюдали быстрое восстановление травостоя. В луговой степи количество видов за 10 лет повысилось в 2,6 раза, в настоящей степи – в 1,8, в сухой – в 2,3. Такое увеличение числа видов – результат их регенерации из почек или семян. Авторы указанные выше наблюдали увеличение роли клональных растений после пожара и предположили регенерацию видов из подземных органов.

При сохранении узлов кушения быстро восстанавливаются *Bromopsis inermis*, *Stipa krylovii*, *S. capillata*, *Carex pediformis*, *Koeleria cristata*, *Festuca valesiaca* и *Pulsatilla patens*.

На горевших участках выделились виды, устойчивые к сгоранию *Bromopsis inermis*, *Stipa krylovii*, *S. capillata*, *Carex pediformis*, *Pulsatilla patens* и неустойчивые – виды рода *Poa*, *Dianthus versicolor* и *Helictotrichon altaicum*. Последние сильно повреждаются огнем, так как *Dianthus versicolor* имеет тонкие, сухие и быстро сгорающие листья, а *Helictotrichon altaicum* отличается рыхлыми и сухими узлами кушения, которые значительно повреждаются огнем.

Послепожарная сукцессия влияет на структуру экологических групп (табл. 3). В качестве индикатора изменения мы выделили долю ксерофитов (%) от общего числа видов. В луговой степи структура экологических групп не меняется, в настоящей степи доля ксерофитов незначительно уменьшается. В сухой степи травостой двух первых лет сукцессии состоял из одних ксерофитов. За последние четыре года в фитоценозе появились ксеромезофиты, мезоксерофиты и один мезофит.

Таблица 3

Доля ксерофитов от общего числа видов в сукцессионных сериях

Ключевые участки	Годы восстановления и доля ксерофитов, %				
	1	2	3	4	5–6
Луговая степь (Сушь)	29	24	25	31	28
Настоящая степь (Чагытай)	40	32	33	35	36
Сухая степь (Элегест)	100	100	80	80	78

В целом в послепожарной сукцессии в первое десятилетие отмечается некоторая мезофитизация растительности. Характерной особенностью пирогенной сукцессии является отсутствие в травостое сорных видов и низших растений. Лишь на участке сухой степи Элегест отмечено появление *Parmelia vagans* на 5–6 год сукцессии сухой степи.

Необходимо отметить, что все наши данные относятся к влиянию однократного сжигания растительности. Если же выжигание производится регулярно, то в травостое может произойти смена одних доминирующих видов другими.

Основываясь на шестилетнем наблюдении, мы предполагаем, что последствие пожара или пала длится около 10 лет, после чего экосистема возвращается в терминальное состояние. За десятилетие эффект выжигания теряется, в связи с чем видовой состав и структура растительного вещества фитоценозов степей полностью восстанавливаются.

Залежная сукцессия. Нами при изучении залежной сукцессии определялись жизненные формы доминирующих видов по И. Г. Серебрякову (1962). Принималось во внимание около 70 % общей фитомассы. Если доля определенной жизненной формы была более 15 %, то она входила в название соответствующей стадии.

Анализ, учитывающий доминирование тех или иных жизненных форм растений, показал резкие различия в ходе сукцессии.

Корневищные злаки доминируют наравне со стержнекорневыми или дерновинными в луговой степи на всех стадиях сукцессии. В настоящей степи с 7 по 11 год сукцессии преобладают корневищные виды. В сухих степях дерновинные растения составляют основу травостоя в 11–17 год (II–III стадии). Во вторично опустыненной степи на 7 год восстановления в фитоценозе преобладают корневищные и дерновинные растения, к 26 году сообщество представлено типичной дерновинной степью.

С изменением видового состава и состава доминантов в ходе залежной сукцессии происходит изменение соотношения экологических групп растений (рис. 3). На начальной стадии сукцессии на участке луговой степи значительную долю в травостое составляют мезофиты (28%), на участке вторично опустыненной степи – ксерофиты (22%). Причем из степных растений встречаются как сорные, так и типичные степные виды. Количество мезофитов незначительно (до 8%). Резко снижается доля галофитов и мезофитов во всех травостоях сухих степей. На залежах 11 и 26 лет в 2–3 раза увеличивается обилие ксерофитов.

Таким образом, в ходе залежной сукцессии на участках наблюдается усиление ксерофитизации от ранних стадий восстановления к более поздним. Так, степень ксерофитизации, то есть отношение числа ксерофитов к мезофитам (К/М), на участках

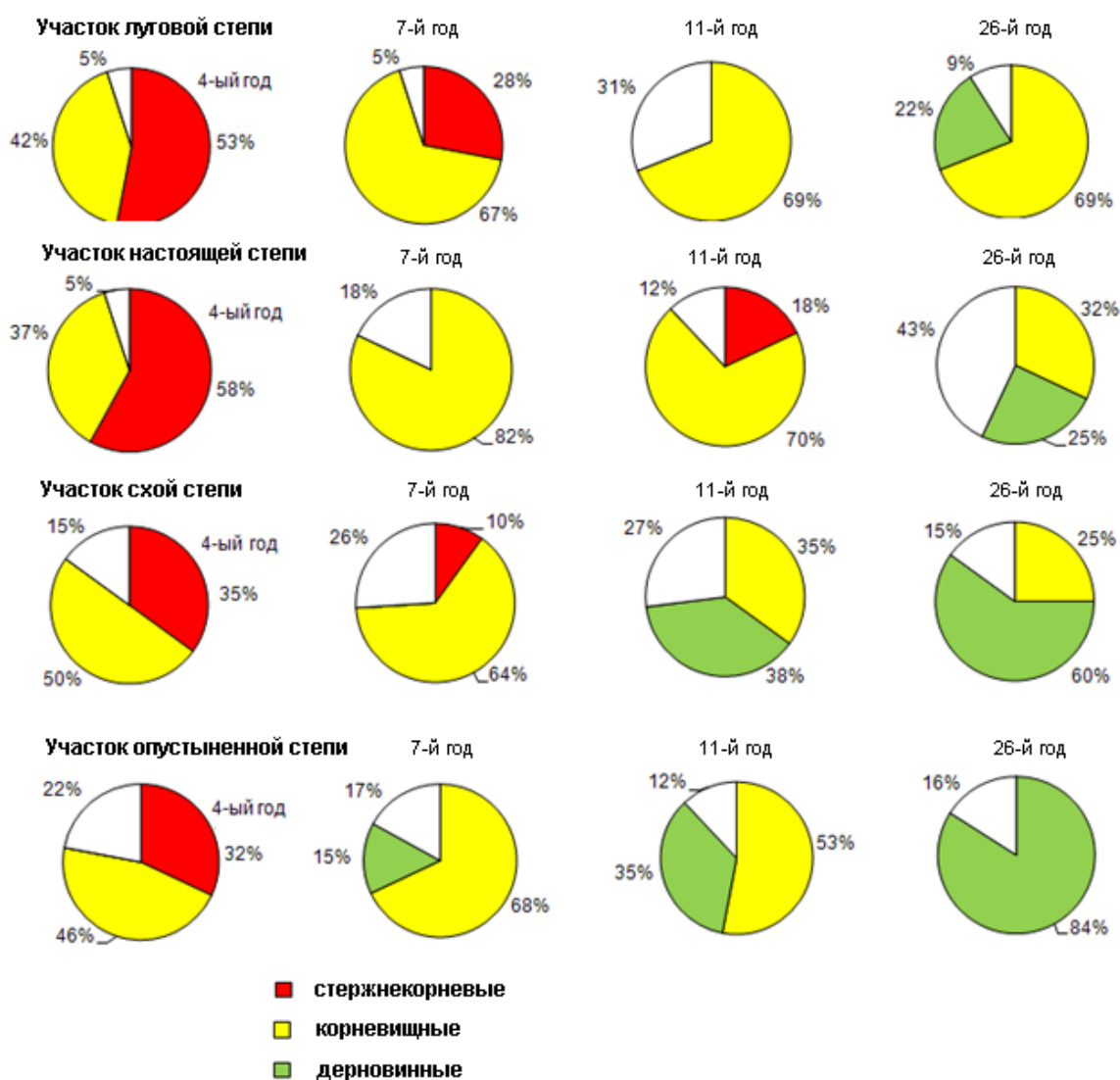


Рис. 3. Степень ксерофитизации фитоценозов в ходе залежной сукцессии

постепенно возрастает как от I стадии сукцессии к IV, так и от луговой степи к сухим степям. Если степень ксерофитности в IV стадии на участках луговой и настоящей степей составляет 1,2–1,7, то в сухой степи она повышается до 23. На участке вторично опустыненной степи показатель К/М также поднимается до 25. Высокая степень ксерофитности характерна для вторично опустыненной степи Унегети. На этих участках отмечена максимальная скорость ксерофитизации. Общая ксерофитизация растительного покрова в ходе сукцессии определяется уплотнением и иссушением почвы.

Показатель сходства видового состава сообществ в период 4–7 лет на всех участках был низким и мало изменился к 11 году. В период 7–26 лет сукцессионный процесс идет активно с максимальным количеством выпавших видов. К 11-му году сложились фитоценозы, близкие по составу к фитоценозам 26 лет. Показатель сходства для этих лет менялся от 0,6 на участке сухой степи до 0,75 на участке вторично опустыненной степи. Наиболее близки по видовому составу фитоценозы 26-летних залежей и исходных коренных степей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При *пастбищной дигрессии* происходит упрощение структуры и обеднение видового состава травостоя. Выпас и состояние пастбища находятся в тесной взаимосвязи: на каждое изменение характера выпаса экосистема отвечает сменой составов видов и доминантов. При неизменности воздействия фитоценоз сохраняет постоянный видовой состав, который меняется под влиянием погодных условий. При резком снижении нагрузки восстановительные процессы идут очень быстро. Из семенного фонда, содержащегося в почве, появляются виды разной экологии и различных местообитаний. В начальной стадии демуляции одновременно происходят вспышка видового обилия и постепенное выпадение видов. Два этих процесса со временем приводят к установлению довольно стабильного видового состава. При новом изменении режима выпаса в сторону увеличения нагрузки, вновь начинается деградация травостоя.

При однократном пале в ходе *пирогенной сукцессии* в начале происходит падение числа видов, а затем идет их быстрое восстановление. По нашим наблюдениям за шесть лет в луговой степи число видов повысилось в 2,6 раза, в настоящей степи – в 1,8, в сухой – в 2,3. На горевших участках зарегистрированы виды, устойчивые и неустойчивые к сгоранию. Последние сильно повреждаются огнем, т.к. имеют тонкие, сухие и быстро сгорающие листья или рыхлые и сухие узлы кущения. Характерной особенностью пирогенной сукцессии является отсутствие в травостое сорных видов и низших растений. Последствие весеннего пала или пожара длится около 10 лет, после чего экосистема возвращается в терминальное состояние.

В ходе *залежной сукцессии*, которая изучалась нами в течение 26 лет, на различных стадиях закономерно менялись жизненные формы доминирующих видов. Корневищные злаки доминируют наравне со стержнекорневыми или дерновинными на залежах в луговой и настоящей степях на всех стадиях сукцессии. На залежах в сухих степях дерновинные виды составляют основу травостоя уже на 11 год сукцессии. Во вторично опустыненной степи фитоценоз залежи на 7 год был представлен корневищно-дерновинными видами, к 26 году на месте залежи сформировалась типично дерновинная степь. Через 26 лет сукцессии фитоценоз приближается по своему видовому составу к терминальному состоянию.

Таким образом, пастбищная сукцессия обладает высокой подвижностью, обратимостью и закономерно отвечает на изменение интенсивности выпаса. Пирогенные и залежные сукцессии детерминированы и направлены развиваются в сторону исходной экосистемы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-05208/19 мк «Эколого-экономическая оценка деградации сельскохозяйственных земель Республики Тыва», частично в рамках госзадания ФГБУН Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН Проект № 0307-2021-0003.

Список литературы

- Работнов Т. А. Фитоценология. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 384 с.
- Самбуу А. Д. Сукцессии растительности в травяных экосистемах Тувы // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10. – С. 1095–1099.
- Бахтин Н. П. Климатические особенности и агроклиматические ресурсы Тувинской АССР // *Сборник работ Красноярской гидрометеорологической обсерватории*. – 1968. – № 1. – С. 26–68.
- Кушев С. Н. Рельеф // *Природные условия Тувинской Автономной области*. – М.: АН СССР, 1957. – Вып. 3. – С. 11–14.
- Шенников А. П. Введение в геоботанику. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. – 447 с.
- Александрова В. Д. Изучение смен растительного покрова // *Полевая геоботаника*. – Л., 1964. – Т. 3. – 222 с.
- Воронов А. Г. Геоботаника. – М.: Высшая школа, 1973. – 385 с.
- Самбуу А. Д., Аюнова О. Д. Стадии пастбищной дигрессии в сухих степях Тувы // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. № 5–2. – С. 293–295; URL: <http://applied-research.ru/ru/article/view?id=9241>
- Мальшев Л. И. Флора СССР. – Л.–М.: Изд-во АН СССР, 1972. – 302 с.
- Серебряков И. Г. Экологическая морфология растений // *Жизненные формы покрытосеменных и хвойных*. – М.: Высшая школа, 1962. – 375 с.

Sambuu A. D. Secondary successions of phytocenoses in steppe ecosystems of Tuva // *Ekosistemy*. 2022. Iss. 32. P. 15–23.

The study of vegetation succession under the influence of a changing anthropogenic regime is relevant both theoretically in terms of studying biodiversity and in terms of conservation of natural renewable resources. The steppe region of Central Asia, including the steppes of Tuva, supported human culture for thousands of years and during this period undergone serious climatic and social changes. In the past, this territory was sparsely populated and the low productivity of the grasses fully provided the local nomadic population with livestock products. Folk customs strictly regulated the nature of grazing – its timing, cycles and duration. Having played an exceptionally important role in the history of mankind, the steppe was the first of all other landscapes to be on the verge of losing its original appearance and natural potential completely due to the replacement of grass ecosystems with agricultural landscapes. Currently, among the natural zones of Tuva, the steppe and forest-steppe have undergone the most severe anthropogenic transformation mainly due to grazing, plowing, fire, reservoirs and open-pit mining. This article analyzes the secondary successions of steppe ecosystems of the Republic of Tuva, which occur under the influence of external influences. The purpose of this work is to study the features of secondary successions arising under the influence of grazing, fire, during the overgrowth of deposits in the steppe ecosystems of Tuva. Phytocenoses of steppe and forest-steppe soils of the intermountain basins of Tuva are the object of the study. The key sites are located in the steppe ecosystems of the Turan-Uyuk, Central Tuva and Ubsunur basins. It is revealed that pasture succession has high mobility, reversibility and responds naturally to changes in the intensity of grazing. Moreover, the findings prove that pyrogenic and fallow successions are determined and are developing back to the original ecosystem.

Key words: pasture, fallow, succession, steppes, plant community, ecosystem, Tuva.

*Поступила в редакцию 08.11.22
Принята к печати 27.11.22*

УДК 574.45: 543.272.37 (470.67)

Накопление азота фитоценозами дагестанской части Восточного Кавказа

*Салихов Ш. К., Гасанов Г. Н., Яхияев М. А., Гаджиев К. М., Баширов Р. Р.,
Рамазанова Н. И., Гимбатова К. Б., Кичева Ж. О., Ахмедова З. Н.*

*Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального
исследовательского центра РАН
Махачкала, Россия
salichov72@mail.ru*

Изучены запасы азота в почвах и компонентах фитоценоза (зеленая масса, ветошь, войлок, корни), а также продуктивность фитоценозов шести постоянных пробных площадей: предгорье (1000 м н. у. м.) – на Цудахарской экспериментальной базе; среднегорье (1700 м н. у. м.) и высокогорье (2100 м н. у. м.) – на экспериментальной базе «Верхний Гуниб» Горного ботанического сада ДФИЦ РАН, в течение 10 лет (2012–2021 гг.), в условиях заповедного режима. Выявлено, что запасы азота в почвах Горного Дагестана значимо различались – меньше всего запасов было в почвах Предгорья (горная лугово-степная сильно эродированная почва) на крутом склоне 35°. Максимум запасов азота накапливала горная лугово-лесная почва Высокогорья, расположенная у подножия леса с уклоном около 10°. Накопление фитомассы по гипсометрическим отметкам дагестанской части Восточного Кавказа составило на северной и южной экспозициях склонов: в надземной массе – 46,6 и 45,7; 54,17 и 59,79; 67,26 и 62,90 ц/га-год; в корневой массе – 112,17 и 88,24; 130,46 и 125,73; 144,44 и 133,55 ц/га-год в Предгорье, Среднегорье и Высокогорье. Выявлена высокая продуктивность фитоценозов, расположенных в близости с древесно-кустарниковой растительностью – фитоценозы склонов северной экспозиции подпровинций Горного Дагестана. Увеличения запасов азота в фитоценозе было связано с увеличением высоты местности над уровнем моря, что составило в надземной массе: от Предгорья к Среднегорью – 15,59 и 43,17 %; от Среднегорья к Высокогорью – 32,43 и 4,12 %; в подземной: 21,02 и 48,91 %; 11,14 и 4,69 %, соответственно на склонах северной и южной экспозиций. Больше азота накапливали фитоценозы Высокогорья (2100 м н. у. м.), меньше – фитоценозы Предгорья (1000 м н. у. м.). На всех гипсометрических отметках, больше азота накапливали фитоценозы, произрастающие на склонах северной экспозиции – запасов азота было выше на северном склоне (в среднем в надземной массе – на 10,41; в подземной – 24,24 %), что было связано с смывом азота в почвах южных склонов, из-за их большей крутизны. В результате десятилетних исследований, проведенных в 2012–2021 годах, выявлена положительная высокой силы коррелятивная связь показателей свойств почв с продуктивностью фитоценозов и запасами азота в фитомассе.

Ключевые слова: почва, азот, фитоценоз, заповедный режим, горные территории, Дагестан, Восточный Кавказ.

ВВЕДЕНИЕ

Продуктивность растений обусловлена почвенными условиями территории, в первую очередь плодородием почв, существенное воздействие на которое оказывает содержание в почве азота, не накапливаемого в материнских породах (Bhatt et al., 2019; Luo et al., 2019).

Азот – биогенный элемент, определяющий продуктивность наземных экосистем, где он связан с органикой почв, а минеральные, доступные для растений, формы накапливаются в низких концентрациях (Макаров и др., 2019; Mello, 2021; Mason et al., 2022).

Азот играет важную роль в синтезе АТФ, аминокислот, нуклеиновых кислот, хлорофилла, фитогормонов растений (Adams et al., 2018; Anas et al., 2020), повышает продуктивность и содействует устойчивости биогеоценозов к стрессам (Sun et al., 2020).

В современном мире, в связи с глобальной ролью азота, большой интерес проявляется к вопросу накопления азота в фитоценозах (Stevens, 2019; Шафран, 2020).

Содержание азота в фитоценозах территории горных регионов обусловлено экспозицией склонов, на которых растения получают различное количество фотосинтетически активной радиации, тепла, влаги (Соколова, 2016).

Общее содержание азота в гумусовых горизонтах почв варьирует от 0,03 % в песчаных почвах до 2,5–3,0 % в торфе, в черноземах содержание общего азота равно 0,4–0,6 % (Беляев, 2012).

Горные территории подвержены трансформации гидротермических условий, изменению структуры растительности в связи с различием накопления азота его компонентами (Эльканова и др., 2016; Dawes et al., 2017; Bhandari, Zhang, 2019). Данные процессы приводят к минерализации органики почв и накоплению азота, увеличению его запасов (Dawes et al., 2017). В почвах, на склонах разных экспозиций, формируется разный гидротермический режим. Для склонов северных и западных экспозиций присуща более высокая влажность почв, относительно склонов южных и восточных (Kong et al., 2019), соответственно изменяются: содержание гумуса, азота, подвижность элементов питания (Глазунов и др., 2020).

Запасы азота в структуре фитомассы фитоценозов связаны с содержанием в почвах, внесения удобрений, потерь вследствие вымывания, эрозии, выноса с урожаем, денитрификации (Завалин, Соколов, 2018; Кудеяров, 2019; Yue et al., 2019).

В Дагестане проведено немало исследований, посвященных функционированию фитоценозов ее горной территории (Litvinskaya et al., 2015; Муртазалиев, 2016; Гасанов и др., 2016; Вагабова и др., 2018; Маллалиев, Залибеков, 2018; Асадулаев и др., 2020). Не смотря на широкий охват проблем в данных исследованиях, не решен вопрос накопления и запасов азота в фитоценозах Горного Дагестана.

Актуальность нашего исследования связана со значимостью вопроса определения содержания и запасов азота в фитоценозах.

Цель исследования – определить продуктивность фитомассы, содержание и запасы азота в фитоценозах склонов северной и южной экспозиций горы Маяк и хребта Чакулабек дагестанской части Восточного Кавказа.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования по продуктивности фитоценозов, выявлению концентрации и запасов азота проводились на шести постоянных пробных площадях (ППП): в предгорье (1000 м н. у. м.) – на Цудахарской экспериментальной базе, в среднегорье (1700 м н. у. м.) и высокогорье (2100 м н. у. м.) – на экспериментальной базе «Верхний Гуниб» Горного ботанического сада ДФИЦ РАН, в условиях заповедного режима, в течение 2012–2021 годов. GPS-координаты участков: *a* – 42.327640 N 47.166180 E; *b* – 42.328297 N 47.164353 E; *c* – 42.40058950 N 46.91963550 E; *d* – 42.40176770 N 46.91865520 E; *e* – 42.402672 N 46.905175 E; *f* – 42.402786 N 46.903856 E (рис. 1).

ППП, площадью по 100 м², были разбиты на 100 площадок по 1 м² (1 м×1 м), полиэтиленовым шпагатом. Образцы почв и фитомассы брались по семь раз: в первой декаде каждого месяца с апреля по октябрь включительно, в трехкратной повторности.

Наземную массу с ППП отбирали методом укусов, с выделением фракций: зеленая масса, ветошь (мертвые части растений, не лишённые связи с растениями), войлок. Подземную массу определяли в эти же сроки, на тех же ППП, после укуса надземной массы, до глубины 40 см методом монолитов. Размер монолита 10×10×10 см. Содержание азота в фитомассе определено методом мокрого озоления (Ягодин и др., 1987). Запасы азота в фитоценозах определяли по методике А. А. Титляновой (Титлянова и др., 2018).

На каждом типе почв проведен отбор образцов по профилю (0–20, 20–40 см). Анализы почв проведены в лаборатории почвенных и растительных ресурсов ПИБР ДФИЦ РАН. Общий азот в почве определен фотометрическим методом «индофеноловой зелени» по методу ЦИНАО, легкогидролизуемый методом Тюрина и Кононовой, гумуса по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91) (Ягодин и др., 1987). Запасы азота вычислены по формуле: $Q=(m \times h \times d) \times 1000$, где: *Q* – запасы азота (кг/га) для почвенного слоя; *m* – содержание азота; *h* – мощность почвенного слоя (см); *d* – плотность почвенного слоя, г/см³.



Рис. 1. Взятие проб в отдельных пунктах исследований
a – северный склон Предгорной подпровинции; *b* – южный склон Предгорной подпровинции;
c – северный склон Среднегорной подпровинции; *d* – южный склон Среднегорной подпровинции;
e – северный склон Высокогорной подпровинции; *f* – южный склон Высокогорной подпровинции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Во многих работах российских (Васбиева, 2019; Ревин и др., 2020), и зарубежных (Tahseen et al., 2022) исследователей, приводятся данные о необходимости определения содержания легкогидролизуемого азота почвы для оценки плодородия почв.

Наши исследования выявили, что более плодородными являются почвы, находящиеся на склонах северной экспозиции Горного Дагестана, поскольку в них обнаружено больше легкогидролизуемой формы азота (табл. 1).

Таблица 1

Содержание и запасы азота в почвах Цудахарской и Гунибской экспериментальных баз ГорБС ДФИЦ РАН (2012–2021 гг.)

Тип почвы	Глубина, см	Гумус, %	Влажность, %	Плотность, г/см ³	N _{общ.} , %	N _{гидр.} , мг/100 г	Запасы, кг/га	
							N _{общ.}	N _{гидр.}
Предгорная подпровинция								
Горная лугово-лесная эродированная	0–20	4,45	19,1	1,07	0,231	10,96	4943,4	234,54
	20–40	2,81	17,7	1,15	0,141	4,88	3243,0	112,24
	0–40	3,63	18,4	1,11	0,186	7,92	8186,4	346,78
Горная лугово-степная сильно эродированная	0–20	2,92	13,2	1,08	0,150	5,47	3240,0	118,15
	20–40	1,99	16,9	1,18	0,102	2,79	2407,2	65,84
	0–40	2,46	15,1	1,13	0,126	4,13	5647,2	184,00
Среднегорная подпровинция								
Горная бурая лесная	0–20	4,72	26,8	1,04	0,241	13,44	5012,8	279,55
	20–40	2,73	25,9	1,14	0,142	5,28	3237,6	120,38
	0–40	3,73	26,4	1,09	0,192	9,36	8250,4	399,94
Горная лугово-степная	0–20	4,34	26,3	1,07	0,225	11,68	4815,0	249,95
	20–40	2,69	25,8	1,12	0,138	3,87	3091,2	86,69
	0–40	3,52	26,1	1,10	0,182	7,78	7906,2	336,64
Высокогорная подпровинция								
Горная лугово-лесная	0–20	5,14	27,8	1,03	0,264	15,82	5438,4	325,89
	20–40	3,36	27,3	1,15	0,174	7,14	4002,0	164,22
	0–40	4,25	27,6	1,09	0,219	11,48	9440,4	490,11
Горно-луговая дерновая	0–20	4,64	25,9	1,07	0,221	11,55	4729,4	247,17
	20–40	2,33	25,1	1,13	0,139	3,72	3141,4	84,07
	0–40	3,49	25,5	1,10	0,180	7,64	7870,8	331,24

Общего азота, как и легкогидролизуемого, также было больше на склонах северной экспозиции.

Запасы азота в почвах Горного Дагестана значительно различались, меньше всего запасов было в почвах Предгорной подпровинции, вследствие эрозии почв, особенно это проявилось на горной лугово-степной сильно эродированной почве, приуроченной к крутому склону 35°. Максимум запасов азота накапливала, расположенная у подножия леса, горная лугово-лесная почва Высокогорной подпровинции, с уклоном около 10° (табл. 1).

Накопление фитомассы по гипсометрическим отметкам дагестанской части Восточного Кавказа составило на северной и южной экспозициях склонов: в надземной массе – 46,6 и 45,7; 54,17 и 59,79; 67,26 и 62,90 ц/га·год; в подземной массе – 112,17 и 88,24; 130,46 и 125,73; 144,44 и 133,55 ц/га·год в Предгорной, Среднегорной и Высокогорной подпровинциях, соответственно (рис. 2).

Деревья аккумулируют соединения азота из атмосферы в 2–3 раза интенсивнее, чем травянистая (Кудреватых и др., 2018), вследствие чего происходит рост продуктивности растений (Sinha et al., 2020) и активности почвенных микроорганизмов (Zhang et al., 2019).

В нашем исследовании также выявлена большая продуктивность фитоценозов, расположенных вблизи к участкам с древесно-кустарниковой растительностью – фитоценозы склонов северной экспозиции подпровинций Горного Дагестана.

Содержание азота в структуре фитомассы подпровинций Горного Дагестана зависела от склоновой экспозиции и гипсометрических отметок (рис. 3).

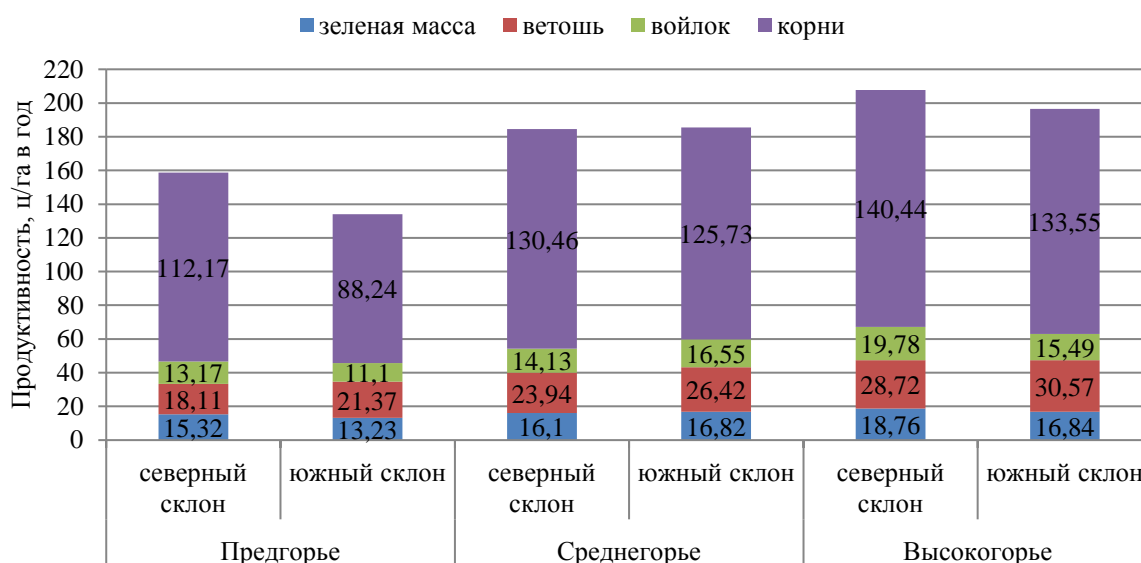


Рис. 2. Продуктивность травяных экосистем дагестанской части Восточного Кавказа (2012–2021 гг.)

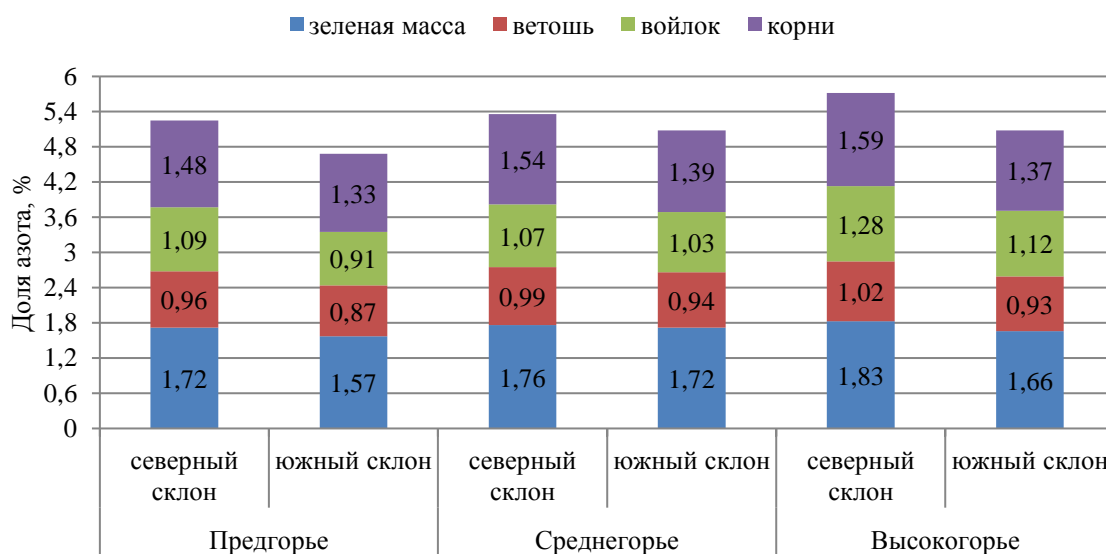


Рис. 3. Содержание азота в структуре фитомассы экосистем дагестанской части Восточного Кавказа (2012–2021 гг.)

Больше всего азота накапливали фитоценозы Высокогорья (2100 м н. у. м.), меньше всего – фитоценозы Предгорья (1000 м н. у. м.). На всех гипсометрических отметках, больше азота накапливали фитоценозы, произрастающие на склонах северной экспозиции.

Общей закономерностью было увеличение запасов азота в фитоценозе по мере увеличения высоты местности над уровнем моря, в надземной массе: от Предгорья к Среднегорью – 15,59 и 43,17 %; от Среднегорья к Высокогорью – 32,43 и 4,12 %; в подземной: 21,02 и 48,91 %; 11,14 и 4,69 %, соответственно, на склонах северной и южной экспозиций.

Экспозиция склона, также вносила свой вклад – запасов азота было выше на северном склоне (в среднем в надземной массе – на 10,41; в подземной – 24,24 %), что было вероятно обусловлено смывом азота в почвах южных склонов, из-за их большей крутизны (рис. 4).

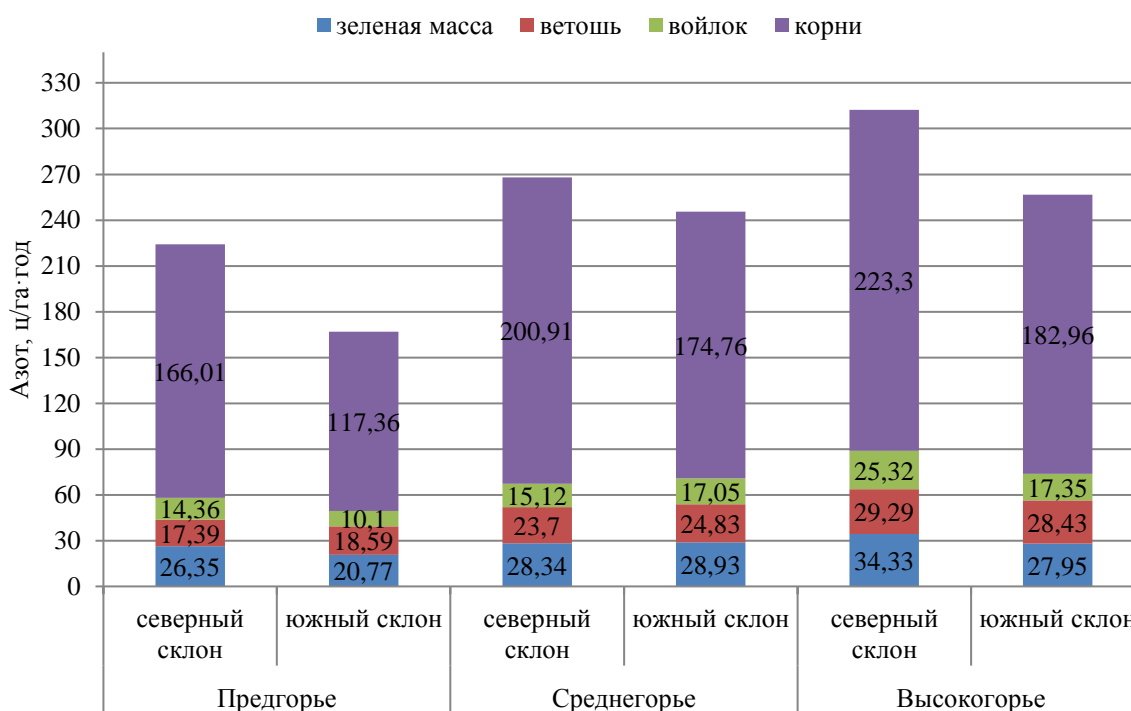


Рис. 4. Запасы азота в структуре фитомассы в экосистемах Горного Дагестан (2012–2021 гг.)

Показатели почв и компонентов фитомассы (зеленая масса, ветошь, войлок, корни) исследованных фитоценозов были подвергнуты статистической обработке (табл. 2).

В результате десятилетних исследований, проведенных в 2012–2021 годах, выявлена положительная высокой силы коррелятивная связь показателей свойств почв с продуктивностью и запасами азота в фитомассе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые исследованы и выявлены закономерности формирования, транслокации и запасов азота по фракциям растительного вещества (зеленая масса, ветошь, войлок, корни) на различных гипсометрических отметках и экспозициях склонов дагестанской части Восточного Кавказа.

Общей закономерностью для почв Горного Дагестана было большее содержание легкогидролизуемого и общего азота в слое 0–20 см, с уменьшением его вниз по почвенному профилю.

В почвах общего азота, как и легкогидролизуемого, было больше на площадках склонов северной экспозиции.

Запасы азота в почвах Горного Дагестана значительно различались – меньше всего запасов было в почвах Предгорной подпровинции, вследствие эрозии почв, особенно это проявилось на горной лугово-степной сильно эродированной почве, приуроченной к крутому склону 35°. Максимум запасов азота накапливала, расположенная у подножия леса, горная лугово-лесная почва Высокогорной подпровинции, расположенная почти на ровной поверхности.

Исследования, проведенные в 2012–2021 годы на территории дагестанской части Восточного Кавказа выявили, что продуктивность фитоценозов отличалась в зависимости от приуроченности к склоновой экспозиции.

Отмечена большая продуктивность фитоценозов, сформированных на склонах северной экспозиции подпровинций Горного Дагестана, что обусловлено близким расположением участков к лесным массивам.

Таблица 2

Регрессионная и коррелятивная связь показателей почв с продуктивностью фитомассы ($p=0,05$)

Показатели почв, слой 0–40 см	Продуктивность фитомассы	Запас азота в фитомассе
	Зеленая масса (корни)	
Гумус	$y=2,8477x+6,1733$ $r=0,905$	$y=7,1015x+2,8284$ $r=0,950$
	$y=28,7522x+20,6757$ $r=0,892$	$y=58,7584x-28,888$ $r=0,959$
Влажность	$y=0,322x+8,7123$ $r=0,899$	$y=0,7426x+10,5627$ $r=0,872$
	$y=3,5185x+40,1206$ $r=0,958$	$y=6,2398x+32,89$ $r=0,894$
Запас $N_{\text{общ.}}$	$y=0,00135x+5,5356$ $r=0,907$	$y=0,00335x+1,3311$ $r=0,948$
	$y=0,01354x+14,9709$ $r=0,888$	$y=0,02754x-39,6024$ $r=0,950$
Запас $N_{\text{гидр.}}$	$y=0,01651x+10,4295$ $r=0,899$	$y=0,04174x+13,2478$ $r=0,956$
	$y=0,1655x+64,0633$ $r=0,879$	$y=0,3494x+55,9098$ $r=0,976$

Больше всего азота накапливали фитоценозы Высокогорья (2100 м н. у. м.), меньше всего – фитоценозы Предгорья (1000 м н. у. м.). На всех гипсометрических отметках, больше азота накапливали фитоценозы, приуроченные к склонам северной экспозиции.

Общая закономерность накопления азота – повышение запасов азота в фитоценозах по мере увеличения высоты местности над уровнем моря. Экспозиция склона, также вносила свой вклад – запасов азота накапливалось больше на северном склоне.

Выявлена положительная высокой силы коррелятивная связь показателей свойств почв с продуктивностью фитоценозов и запасами азота в фитомассе.

Полученные результаты могут быть использованы для реализации проектов рационального управления продукционными и деструкционными процессами в природных и агроландшафтах. Они могут служить основой для дистанционного зондирования продуктивности ландшафтов, а также могут пользоваться научными учреждениями, ВУЗами при решении актуальных научных проблем и при подготовке магистров, бакалавров и аспирантов по биологическим, экологическим и другим специальностям.

Благодарности. Авторы выражают благодарность за предоставление УНУ «Система экспериментальных баз, расположенных вдоль высотного градиента» ГорБС ДФИЦ РАН.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания согласно тематическому плану ОП Прикаспийского института биологических ресурсов ДФИЦ РАН по теме «Динамика почвенного покрова и биопродуктивности экосистем Северо-Западного Прикаспия и Восточного Кавказа» (НИОКТР № АААА-А20-120062990014-2).

Список литературы

- Асадулаев З. М., Садыкова Г. А., Маллалиев М. М., Рамазанова З. Р., Мищенко Н. В., Десинов С. Л., Асадулаев Ш. З. Группировки пионерной растительности и некоторые подходы к искусственному обрастанию откосов автодорог Предгорного Дагестана // Юг России: экология, развитие. – 2020. – Т. 15, № 2. – С. 61–77. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-2-61-77
- Беляев А. Б. Элементы минерального питания в почвах. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2012. – 29 с.
- Вагабова Ф. А., Алиев А. М., Раджабов Г. К., Мусаев А. М. Сравнительное изучение компонентного состава эфирного масла *Artemisia splendens* Wild. и *Artemisia tschernieviana* Bess. флоры Дагестана // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 17–24. DOI: 10.29296/25877313-2018-01-04
- Васбиева М. Т. Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на содержание органического углерода и азотный режим дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. – 2019. – № 11. – С. 1365–1372. DOI: 10.1134/s0032180x19110133
- Гасанов Г. Н., Салихов Ш. К., Гаджиев К. М., Маллалиев М. М., Шайхалова Ж. О., Гимбатова К. Б. Видовой состав и продуктивность луговых фитоценозов горы маяк (Гунибское плато, республика Дагестан) // Растительные ресурсы. – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 214–224.
- Глазунов Г. П., Афонченко Н. В., Двойных В. В. Оценка влияния морфометрических показателей рельефа на плодородие черноземных почв // Достижения науки и техники АПК. – 2020. – Т. 34, № 7. – С. 10–18. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10702
- Завалин А. А., Соколов О. А. Азот и качество зерна пшеницы // Плодородие. – 2018. – № 1 (100). – С. 14–17.
- Кудеяров В. Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // Агрехимия. – 2019. – № 12. – С. 3–15. DOI: 10.1134/s000218811912007x
- Кудреватых И. Ю., Иващенко К. В., Ананьева Н. Д., Иванищева Е. А. Атмосферное осаждение азота и свойства почв в лесах Вологодской области // Почвоведение. – 2018. – № 2. – С. 155–164. DOI: 10.7868/S0032180X1802003X
- Макаров М. И., Бузин И. С., Тиунов А. В., Малышева Т. И., Кадулин М. С., Королева Н. Е. Изотопный состав азота в почвах и растениях горно-тундровых экосистем Хибин // Почвоведение. – 2019. – № 10. – С. 1185–1197. DOI: 10.1134/s0032180x19100071
- Маллалиев М. М., Залибеков М. Д. Новые виды сосудистых растений для флоры Дагестана и России // Ботанический журнал. – 2018. – № 1. – С. 122–124. DOI: 10.1134/s0006813618010076
- Муртазалиев Р. А. Анализ распределения видов флоры Дагестана // Ботанический журнал. – 2016. – Т. 101, № 9. – С. 1056–1074. DOI: 10.1134/s0006813616090052
- Ревин Н. Ю., Гурин А. Г., Резвякова С. В., Михалева Е. С. Азотный режим почвы при дерново-перегнойной системе содержания междурядий в яблоневом саду // Вестник аграрной науки. – 2020. – № 2 (83). – С. 29–35. DOI: 10.17238/issn2587-666x.2020.2.29
- Соколова Г. Г. Влияние высоты местности, экспозиции и крутизны склона на особенности пространственного распределения растений // Acta Biologica Sibirica. – 2016. – Т. 2, № 3. – С. 34–45. DOI: 10.14258/abs.v2i3.1453
- Титлянова А. А., Базилевич Н. И., Снытко В. А. и др. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. – Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. – 110 с. DOI: 10.31251/978-5-600-02350-5
- Шафран С. А. Баланс азота в земледелии России и его регулирование в современных условиях // Агрехимия. – 2020. – № 6. – С. 14–21. DOI: 10.31857/s0002188120060113
- Эльканова М. Х., Ахметжанова А. А., Елумеева Т. Г., Олимпченко В. Г. Изменение структуры надземной фитомассы альпийской пустоши Северо-Западного Кавказа при долговременном внесении элементов минерального питания // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел биологический. – 2016. – Т. 121, № 2. – С. 47–58.
- Ягодин Б. А., Дерюгин И. П., Жуков Ю. П. и др. Практикум по агрохимии. – М.: Агропромиздат, 1987. – 512 с.
- Adams M. A., Buchmann N., Sprent J., Buckley T. N., Turnbull T. L. Crops, nitrogen, water: are legumes friend, foe, or misunderstood ally? // Trends in Plant Science. – 2018. – Vol. 23, iss. 6. – P. 539–550. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.02.009
- Anas M., Liao F., Verma K. K. et al. Fate of nitrogen in agriculture and environment: agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency // Biological Research. – 2020. – Vol. 53, N 47. DOI: 10.1186/s40659-020-00312-4
- Bhandari J., Zhang Y. Effect of altitude and soil properties on biomass and plant richness in the grasslands of Tibet, China, and Manang District, Nepal // Ecosphere. – 2019. – Vol. 10, N 11. – P. e02915. DOI: 10.1002/ecs2.2915
- Bhatt M. K., Labanya R., Joshi H. C. Influence of long-term chemical fertilizers and organic manures on soil fertility: A review // Universal Journal of Agricultural Research. – 2019. – Vol. 7, N 5. – P. 177–188. DOI: 10.13189/ujar.2019.070502
- Dawes M. A., Schleppei P., Hagedorn F. The fate of nitrogen inputs in a warmer alpine treeline ecosystem: a 15N labeling study // Ecology. – 2017. – Vol. 105. – P. 1723–1737. DOI: 10.1111/1365-2745.12780

Kong W., Yao Y., Zhao Z., Qin X., Zhu H., Wei X., Shao M., Wang Z., Bao K., Su M. Effects of vegetation and slope aspect on soil nitrogen mineralization during the growing season in sloping lands of the Loess Plateau // *Catena*. – 2019. – Vol. 172. – P. 753–763. DOI: 10.1016/j.catena.2018.09.037

Litvinskaya S., Murtazaliev R. Vegetation Diversity of the Russian Part of the Caucasus in the Era of Climate Change / In: *Climate Change Impacts on High-Altitude Ecosystems* [Eds Öztürk, M., Hakeem, K., Faridah-Hanum, I., Efe, R.]. – Cham: Springer, 2015. – P. 523–544. DOI: 10.1007/978-3-319-12859-7_20

Luo R., Fan J., Wang W., Luo J., Kuzyakov Y., He J.-Sh., Chu H., Ding W. Nitrogen and phosphorus enrichment accelerates soil organic carbon loss in alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 650. – P. 303–312. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.038

Mason R. E., Craine J. M., Lany N. K., Jonard M., Ollinger S. V., Groffman P. M., Fulweiler R. W., Angerer J., Read Q. D., Reich P. B., Templer P. H., Elmore A. J. Evidence, causes, and consequences of declining nitrogen availability in terrestrial ecosystems // *Science*. – 2022. – Vol. 376, N 6590. – P. eabh3767. DOI: 10.1126/science.abh3767

Mello Prado R. Nitrogen: Mineral nutrition of tropical plants. – Cham: Springer, 2021. – P. 69–98. DOI: 10.1007/978-3-030-71262-4_4

Sinha D., Tandon P. K. An Overview of Nitrogen, Phosphorus and Potassium: Key Players of Nutrition Process in Plants. In: Mishra, K., Tandon, P.K., Srivastava, S. (eds) *Sustainable Solutions for Elemental Deficiency and Excess in Crop Plants*. Singapore: Springer, 2020. – P. 85–117. DOI: 10.1007/978-981-15-8636-1_5

Stevens C. J. Nitrogen in the environment // *Science*. – 2019. – Vol. 363, N 6427. – P. 578–580. DOI: 10.1126/science.aav8215

Sun Y., Wang M., Mur LAJ, Shen Q., Guo S. Unravelling the Roles of Nitrogen Nutrition in Plant Disease Defences // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2020. – Vol. 21, N 2. – P. 572. DOI: 10.3390/ijms21020572

Tahseen Saba, Wanlin Liu, Jingyan Wang, Fariha Saleem, Xikun Kang, Wenkai Hui, Wei Gong, Hebiao Li Effects of organic supplementation to reduced rates of chemical fertilization on soil fertility of *Zanthoxylum armatum* // *Dendrobiology*. – 2022. – Vol. 87. – P. 123–136. DOI: 10.12657/denbio.087.009

Yue K., Peng Y., Fornara D. A., Meerbeek K. V., Vesterdal L., Yang W., Peng Ch., Tan B., Zhou W., Xu Z., Ni X., Zhang L., Wu F., Svenning J.-C. Responses of nitrogen concentrations and pools to multiple environmental change drivers: A meta-analysis across terrestrial eco-systems // *Global Ecology and Biogeography*. – 2019. – Vol. 28, N 5. – P. 690–724. DOI: 10.1111/geb.12884

Zhang S., Zheng Q., Noll L., Hu Y., Wanek W. Environmental effects on soil microbial nitrogen use efficiency are controlled by allocation of organic nitrogen to microbial growth and regulate gross N mineralization // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2019. – Vol. 135. – P. 304–315. DOI: 10.1016/j.soilbio.2019.05.019

Salikhov Sh. K., Gasanov G. N., Yakhyaev M. A., Gadzhiev K. M., Bashirov R. R., Ramazanov N. I., Gimbatova K. B., Kicheva Zh. O., Akhmedova Z. N. Nitrogen accumulation by phytocenoses of the Dagestan part Eastern Caucasus // *Ekosistemy*. 2022. Iss. 32. P. 24–32.

During 10 years (2012–2021), the researchers studied the reserves of nitrogen in soils and phytocenosis components (green mass, rags, felt, roots), as well as the productivity of phytocenoses of six permanent experimental plots in protected areas: at the Tsudakhar experimental base at the Foothills (1000 m. a.m.s.l.); at the experimental base "Upper Gunib" of the Mountain Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences in the Middle Mountains (1700 m. a.m.s.l.) and in the Highlands (2100 m. a.m.s.l.). It was revealed that nitrogen reserves in the soils of Mountainous Dagestan differed significantly – the least reserves were found in the soils of the Foothills (mountain meadow-steppe heavily eroded soil) on a steep slope of 35°. The maximum nitrogen reserves were accumulated by the mountain meadow-forest soil of the Highlands, located at the foot of the forest with a slope of about 10°. At the northern and southern exposures of the slopes, the accumulation of phytomass according to the hypsometric marks of the Dagestan part of the Eastern Caucasus was: 46.6 and 45.7; 54.17 and 59.79; 67.26 and 62.90 c/ha·a year in the aboveground mass; 112.17 and 88.24; 130.46 and 125.73; 144.44 and 133.55 c/ha·a year in the root mass in the Foothills, Middle Mountains and Highlands. The high productivity of phytocenoses of the slopes of the northern exposure of the sub-provinces of Mountainous Dagestan, located close to trees and shrubs, was revealed. The increase of nitrogen reserves in the phytocenoses was caused by the increase of the elevation. In the aboveground mass it was 15.59 and 43.17 % from the Foothills to the Midlands; 32.43 and 4.12 % from the Midlands to Highlands; in the underground mass it was 21.02 and 48.91 %; 11.14 and 4.69 %, respectively, on the slopes of the northern and southern expositions. The phytocenoses of the Highlands (2100 m.a.m.s.l.) accumulated more nitrogen, the phytocenoses of the Foothills (1000 m.a.m.s.l.) accumulated less. At all hypsometric marks, phytocenoses growing on the slopes of the northern exposure accumulated more nitrogen. The nitrogen reserves were higher on the northern slope (on average, by 10.41% in the aboveground mass; by 24.24% in the underground mass), resulting from washing out of nitrogen from the soils of the southern slopes, due to their greater steepness. Ten-year studies proved a positive high-strength correlation of soil properties indicators with the productivity of phytocenoses and nitrogen reserves in phytomass.

Key words: soil, nitrogen, phytocenoses, protected area, mountainous territories, Dagestan, Eastern Caucasus.

*Поступила в редакцию 17.11.22
Принята к печати 28.11.22*

УДК 595.765.8

К распространению ясеновой изумрудной узкотелой златки *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) на юге Ростовской области

Романчук Р. В.^{1,2,4}, Мещерякова И. С.^{2,4}, Поушкова С. В.^{2,3},
Касаткин Д. Г.², Хачиков Э. А.^{1,4,5}, Курдюшкин Д. П.⁵

¹ Академия биологии и биотехнологии имени Д. И. Иванковского Южного федерального университета
Ростов-на-Дону, Россия
roma.romanchuk.95@bk.ru

² Ростовский филиал Всероссийского центра карантина растений
Ростов-на-Дону, Россия
inna_levchenko22@mail.ru
dorcadion@yandex.ru

³ Южный научный центр Российской академии наук
Ростов-на-Дону, Россия
roushkova@ssc-ras.ru

⁴ Ростовское отделение Русского энтомологического общества
Ростов-на-Дону, Россия
e_hachikov@mail.ru

⁵ Учебно-опытное хозяйство Южного федерального университета «Недвиговка»
Ростов-на-Дону, Россия
dkurdyushkin@sfedu.ru

Работа посвящена изучению процесса распространения ясеновой изумрудной узкотелой златки *Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888 в Ростовской области, инвазивного вида, впервые отмеченного в этом регионе в 2021 году. В статье уточняется распространение вредителя, приводится предварительный анализ приуроченности насекомого к различным типам насаждений ясеней, обсуждается степень его вредоносности в условиях региона. Обследования проводились в насаждениях ясеня пенсильванского (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.) и ясеня европейского (*F. excelsior* L.) различного типа и конструкций на территории Ростовской области в течение вегетационного периода 2022 года. Результаты исследования позволяют предположить, что ясеновая изумрудная узкотелая златка проникла на территорию области 2–3 годами ранее первого задокументированного обнаружения. Наиболее интенсивное поражение ясеней отмечено в лесополосах, расположенных вдоль железных и автомобильных дорог, что указывает на наиболее вероятные пути проникновения златки в Ростовскую область, а также свидетельствует в пользу предположения о наибольшей значимости этого типа лесонасаждений в распространении вредителя. Между тем, отмечается очевидная зависимость распространения вида по направлению наибольшей доступности кормовой базы, так как именно лесополосы вдоль основных дорог представлены насаждениями с участием видов ясеня. Следовательно, не стоит ставить в значительную зависимость от транспорта расселительные возможности хорошо летающего вида. Подчеркивается, что в условиях значительного лесодефицита, появление нового агрессивного специализированного вредителя одной из основных лесообразующих пород в регионе ставит под реальную угрозу ясеновые насаждения области.

Ключевые слова: ясеновая изумрудная узкотелая златка, *Agrilus planipennis*, инвазивный вид, вредитель ясеня, Ростовская область.

ВВЕДЕНИЕ

Биологические инвазии являются серьезной экологической и экономической проблемой. На территории юга России новые инвазивные виды появляются практически регулярно (Есипенко, 2012; Иванов и др., 2021). В качестве примера видов-вселенцев, имеющих существенное хозяйственное значение и из года в год привлекающих внимание специалистов, можно привести самшитовую огнёвку *Cydalima perspectalis* (Walker, 1859) (Гниненко и др., 2014; Иванов и др., 2015), каштановую минирующую моль *Cameraria ohridella* (Deschka & Dimic, 1986) (Камаев, Тодоров, 2014), томатную моль *Tuta absoluta* (Meyrick, 1917)

(Жимерикин, Миронова, 2012), мраморного щитника *Halyomorpha halys* Stål, 1855 (Гапон, 2019) и некоторых других. В число опасных чужеродных вредных насекомых входит и объект настоящего исследования.

Ясеновая изумрудная узкотелая златка *Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888 – восточноазиатский вид, нативный ареал которого охватывает юг Дальнего Востока Российской Федерации, Корейский полуостров, Тайвань и Северо-Восточный Китай, Монголию и Японию (Юрченко и др., 2013). В естественном ареале златка заселяет местные виды ясеня (*Fraxinus mandshurica* Rupr., *F. chinensis* Roxb.) и выполняет функцию потребителя отмирающих частей растений, не нанося ущерба лесному хозяйству (Baranchikov et al., 2008; Баранчиков и др., 2014).

В середине 90-х годов XX века *A. planipennis* резко расширила свой ареал, почти одновременно проникнув в США, Канаду и в европейскую часть России, где проявила себя в качестве опасного вредителя местных неустойчивых представителей рода *Fraxinus*, среди которых наиболее поражаемыми оказались *F. pennsylvanica* March., *F. americana* L., *F. nigra* March. и *F. quadrangulata* Michx. (McFarlane, Meyer, 2005; Anulewicz et al., 2008; Yang et al., 2010; Tanis, McCullough, 2012; Баранчиков и др., 2014). Последствия от инвазии ясеновой изумрудной узкотелой златки исчисляются десятками миллионов погибших деревьев (Orlova-Bienkowskaja, 2013), только в США наносимый ежегодный ущерб превышает 1,3 млрд долларов (Баранчиков и др., 2014). В Европе *A. planipennis* присвоен карантинный статус, вид включен в перечень A2 Европейско-средиземноморской организации по защите растений (ЕОКЗР, ЕРРО) (*Agrilus planipennis*..., 2022) и перечень A2 Карантинных Объектов Евразийского Экономического Союза (Решение..., 2016).

Впервые в европейской части Российской Федерации (РФ) златка отмечена в 2003 году в Москве, где сильно повреждала интродуцированный североамериканский *F. pennsylvanica* и аборигенный европейский *F. excelsior* L. За двадцатилетний период *A. planipennis* преодолела расстояние около 600 км к югу от Москвы и достигла Украины (Drovalenko et al., 2019; Orlova-Bienkowskaja et al., 2020; Egorov et al., 2021). В 2012 году вредитель был отмечен в Тульской, Калужской и Смоленской областях. В 2013 году – Тверской, Орловской, Воронежской, Тамбовской, Ярославской, Рязанской и Владимирской областях. В 2018–2020 годах *A. planipennis* распространилась в Волгоградскую, Белгородскую, Брянскую, Курскую и Астраханскую области, отмечена в Санкт-Петербурге (Баранчиков, 2013; Orlova-Bienkowskaja, 2013, Волкович, Суслов, 2020; Orlova-Bienkowskaja, Bienkowski, 2022a).

В Ростовской области первые свидетельства присутствия вредителя зафиксированы на территории города Азов в 2021 году (Orlova-Bienkowskaja, Bienkowski, 2022a, 2022b). Спустя год свежие находки *A. planipennis* были сделаны уже в нескольких районах области: Аксайском, Мясниковском и Неклиновском.

Цель настоящей работы – уточнить распространение ясеновой изумрудной узкотелой златки в южной части Ростовской области с предварительным анализом приуроченности вредителя к различным типам насаждений ясеней и степени вредоносности в условиях региона.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Рекогносцировочное обследование проводили в насаждениях ясеня пенсильванского (*F. pennsylvanica*) и ясеня европейского (*F. excelsior*) различного типа и конструкций на юге Ростовской области в течение вегетационного периода 2022 года.

Факт наличия *A. planipennis* устанавливали на основании внешних признаков, указанных в разделе «Результаты и обсуждение». При подозрении на заселение деревьев вскрывали кору и осматривали личиночные ходы. Во время лета имаго осматривали кроны деревьев на наличие жуков, окашивали кроны ясеней и прилежащие к насаждениям участки травянистой растительности энтомологическим сачком. Выявленные повреждения, а также пораженные насаждения тщательно фотодокументировались.

Имаго и личинок определяли в соответствии с диагностическими признаками, указанными в литературе (Illustrated Guide..., 2015). Фотосъемка имаго выполнена с использованием камеры Canon EOS 800D, линьки – Canon EOS 5D Mark III с объективом Canon MP-E 65mm/2.8.

В результате проведенных обследований наличие вредителя было зафиксировано в полезащитных лесополосах, озеленительных посадках, лесополосах вдоль железных дорог с участием ясеня пенсильванского в Аксайском, Неклиновском и Мясниковском районах Ростовской области (рис. 1). Детальная информация о выявленных повреждениях и собранном материале содержится в разделе «Результаты и обсуждение».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На территории Ростовской области род *Fraxinus* L., 1753 широко представлен двумя видами – аборигенным ясенем европейским (*F. excelsior*) и североамериканским интродуцентом ясенем пенсильванским (*F. pennsylvanica*). Ясень европейский является неотъемлемым компонентом естественных лесов, входит в состав байрачных и пойменных дубрав, где составляет 5–11 % проективного покрытия (Зозулин, 1992), широко применяется в городском озеленении (составляет около 4 % зеленых насаждений города Ростова-на-Дону) (Карта..., 2022), входит в состав государственных защитных лесополос, где занимает 17,9 % лесопокрытой площади (Засоба и др., 2019). Ясень пенсильванский на территории Ростовской области повсеместно встречается в составе искусственных лесных массивов и лесополос различных конструкций и назначения. Совместно с ясенем европейским является доминирующей породой в государственных защитных лесополосах (25 % от общего количества пород), уступая по численности только дубу черешчатому (Засоба и др., 2019). В черте города *F. pennsylvanica* широко применяется при озеленении многоэтажной застройки (около 1 % деревьев) (Карта..., 2022), входит в состав куртинных, линейных и аллейных уличных насаждений.

Ростовская область – один из самых малолесных регионов РФ, лесистость территории области составляет 2,4 %. Общая площадь лесов Ростовской области составляет 374,3 тыс. га, в том числе земли лесного фонда – 360,6 тыс. га. Покрытая лесом площадь составляет 212,1 тыс. га, большую часть которой (70 %) занимают искусственные лесонасаждения (Ростовская область..., 2014; Лесной план..., 2018). В условиях значительного лесодефицита появление нового агрессивного специализированного вредителя одной из основных лесобразующей пород в регионе может иметь катастрофические последствия. На данном этапе локальные очаги *A. planipennis* помимо Азовского (Orlova-Bienkowskaja, Bienkowski, 2022a, 2022b) отмечены в Аксайском, Неклиновском, Мясниковском районах области (рис. 1).

Признаками поражения деревьев ясеневой изумрудной узкотелой златкой являются ажурность крон, усыхание отдельных ветвей, наличие на стволах участков коры со вздутиями, изменением окраски, растрескиванием, а также характерные лётные отверстия в форме буквы «D», во множестве отмеченные в ходе полевых исследований (рис. 2 *a–c*). По вскрытой корой у деревьев с подозрением на заселение вредителем, были обнаружены личиночные ходы и сами личинки (рис. 2 *d, e*).

Общие сведения о материале, собранном в ходе рекогносцировочных обследований: Аксайский р-н, окр. хутора Ленина, робиниево-ясеневая лесополоса (с преобладанием *F. pennsylvanica*) вдоль возделываемого поля, ручной сбор, 47°06'5.5", 39°52'19.5", 21.VI.2022, Р. В. Романчук leg. – 1 экз. (Д. Г. Касаткин det.) (рис. 2*f*); Аксайский р-н, окр. п. Дорожный, 47°7'45.81", 39°53'1.25", VII.2022, Д. Г. Касаткин, повреждения деревьев и мёртвые имаго в кукольных колыбельках; Неклиновский р-н, хутор Морской Чулек, юго-западная окраина сельскохозяйственного производственного кооператива (СПК) «Янтарь-2», робиниево-ясеневая лесополоса (с преобладанием *F. pennsylvanica*) на вершине остепнённой балки вдоль железной дороги, ручной сбор, окашивание крон, 47°17'7.0", 39°13'15.9", 02.VII.2022, Э. А. Хачиков, И. С. Мещерякова leg. – 7 экз. (Э. А. Хачиков det.); фотофиксация характерных

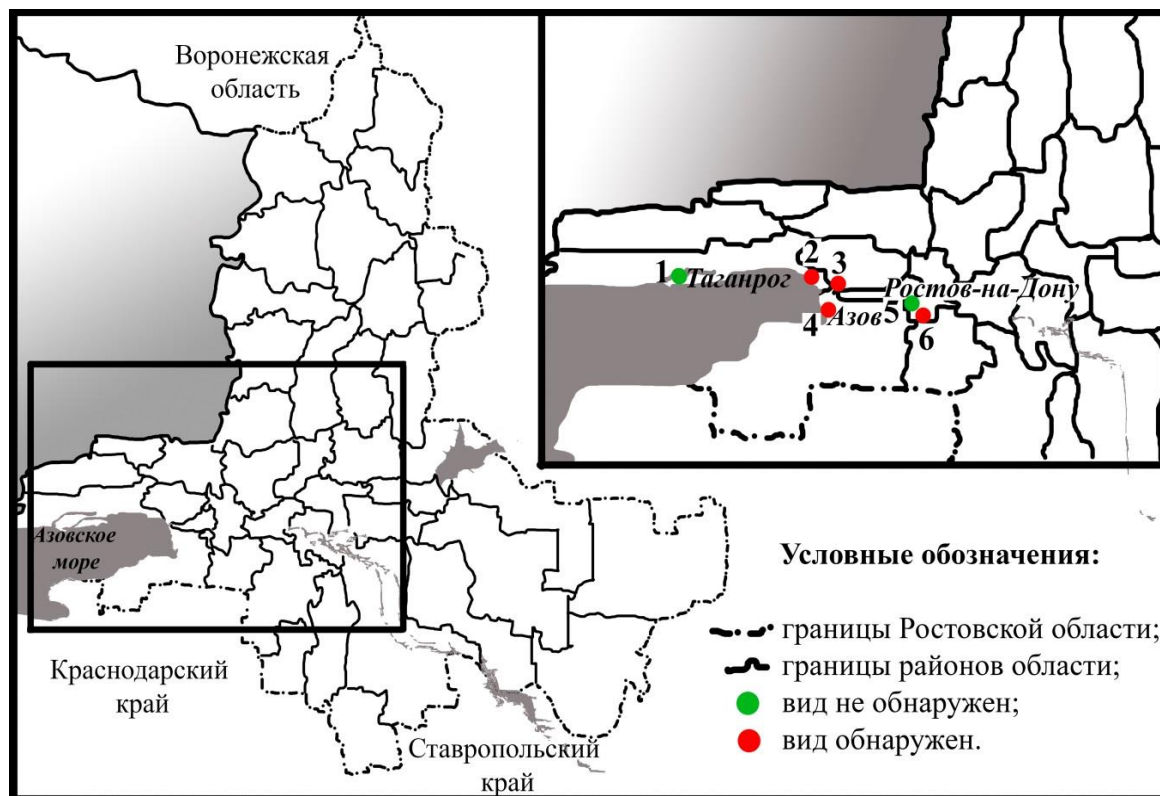


Рис. 1. Карта-схема точек сбора и распространения ясеневой узкотелой златки (*Agrilus planipennis*) в Ростовской области
 1 – город Таганрог, городские насаждения; 2 – Неклиновский р-н, хутор Морской Чулек, лесополосы; 3 – Мясниковский р-н, хутор Недвиговка, озеленительные посадки; 4 – город Азов (по Orlova-Bienkowskaja, Bienkowski, 2022a, 2022b); 5 – город Ростов-на-Дону, городские насаждения различного типа и назначения; 6 – Аксайский район, окр. хутора Ленина, полезащитная лесополоса.

лётных отверстий на 2 деревьях (рис. 2a), 03.IX.2022, Р. В. Романчук; хутор Морской Чулек, остановочный пункт «1300 км», лесополоса, ручной сбор, 47°17'12.68", 39°11'38.86", 17–18.IX.2022, Д. Г. Касаткин leg. – 3 экз. (larvi) (Д. Г. Касаткин det.) (рис. 2 g, h); Мясниковский р-н, западная окраина хутора Недвиговка, учебно-опытное хозяйство ЮФУ (учхоз), наличие усыхания ясеней пенсильванских, 47°16'19.2", 39°19'21.7", 05.VIII.2022, Э. А. Хачиков, Д. П. Купрюшкин (рис. 2 i, j); фотофиксация характерных лётных отверстий на 15 деревьях, 03.IX.2022, Р. В. Романчук, Е. А. Богаева (рис. 2 b, c); Неклиновский р-н, лесополоса по трассе А-280, 47°17'11.12", 39°22'6.87", VII.2022, повреждения деревьев и мертвые имаго в куколочных колыбельках, Д. Г. Касаткин.

Численность вредителя, количество лётных отверстий, общее физиологическое состояние ясеней в выявленных очагах говорит о проникновении ясеневой изумрудной узкотелой златки на территорию области 2–3 годами ранее момента первого обнаружения (Orlova-Bienkowskaja, Bienkowski, 2022a, 2022b), то есть в 2018–2019 годах, практически одновременно с проникновением в прилегающие субъекты: Волгоградскую, Воронежскую и Луганскую области (Мешкова и др., 2021).

Наиболее интенсивное поражение, с видимым усыханием кроны ясеней отмечено в лесополосах, расположенных вдоль железных и автомобильных дорог (табл. 1), что можно считать косвенным подтверждением гипотезы о распространении вредителя авто и железнодорожным транспортом (Selikhovkin et al., 2022) и указывает на возможные пути проникновения *A. planipennis* на территорию РО. Но в то же время, следует учитывать

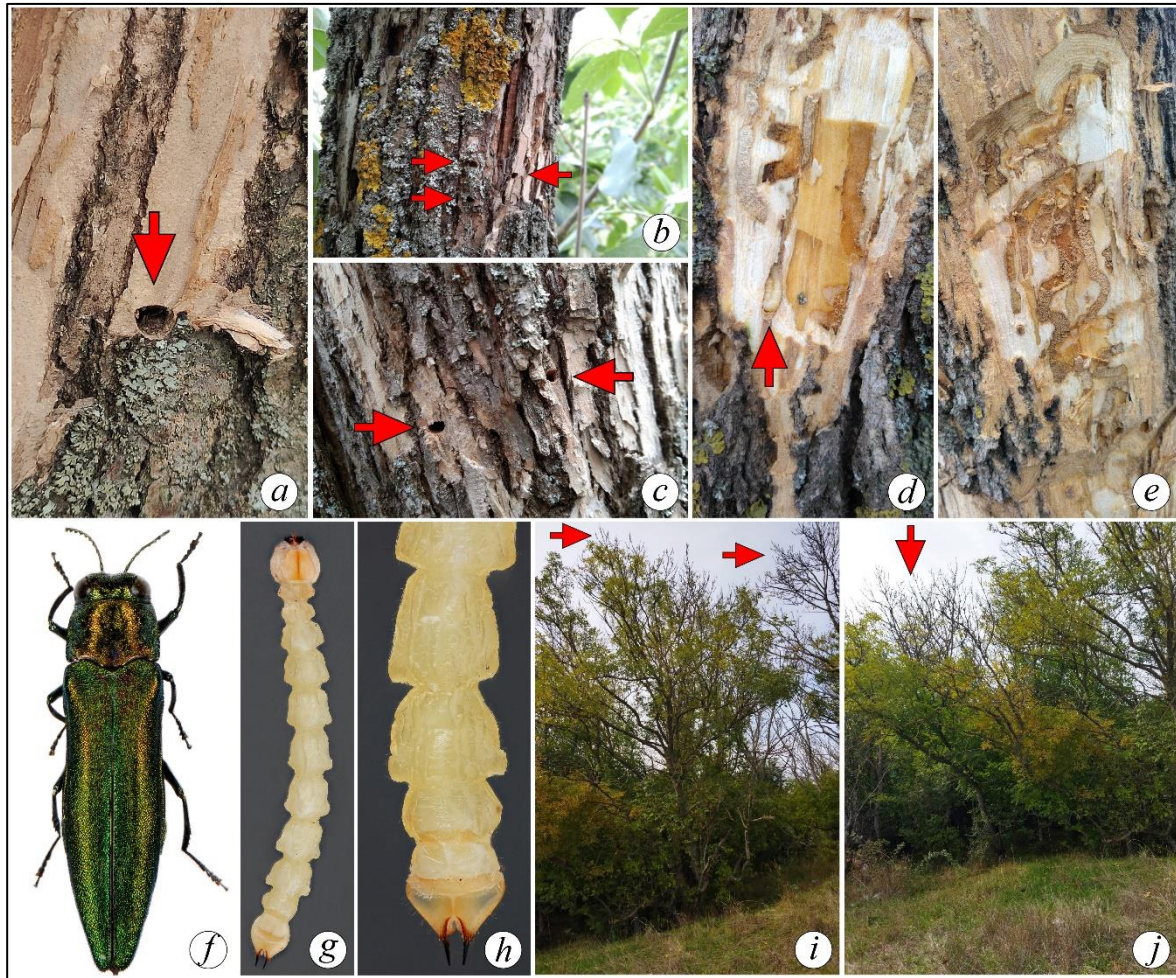


Рис. 2. Особенности экологии ясеневой узкотелой златки *Agrilus planipennis* в Ростовской области

Характерное лётное отверстие *A. planipennis* в форме буквы «D» (окрестности СПК «Янтарь-2», фото Р. В. Романчука) (a); лётные отверстия на стволе ясеня пенсильванского (Мясниковский р-н, хутор Недвиговка) (фото Р. В. Романчука и Е. А. Богаевой) (b, c); вскрытые личиночные ходы (фото Д. Г. Касаткина) (d, e); внешний вид имаго *A. planipennis* (хутор Ленина, фото Н. С. Елфимовой) (f); внешний вид личинки (остановочный пункт «1300 км», фото Д. Г. Касаткина) (g, h) и усыхание ветвей ясеня пенсильванского (Мясниковский р-н, хутор Недвиговка) (фото С. В. Поушковой, Э. А. Хачикова) (i, j). Стрелками указаны лётные отверстия (a–c); личинка, обнаруженная под корой (d); усохшие ветви ясеня пенсильванского (i–l).

очевидную зависимость распространения вида по «пути наименьшего сопротивления», то есть по направлению наибольшей доступности кормовой базы, так как именно лесополосы вдоль основных дорог представлены насаждениями с участием видов ясеня. Кроме того, на наш взгляд не стоит ставить в столь значительную зависимость от транспорта расселительные возможности прекрасно летающего вида.

Следует отметить, что все случаи повреждения *A. planipennis* на территории Ростовской области были отмечены на *F. pennsylvanica*, при обследовании городских насаждений на *F. excelsior* следы повреждения златкой обнаружены не были. Ранее, на начальных этапах инвазии златки в европейскую часть России, специалистами отмечалось явное предпочтение вредителем ясеня пенсильванского по сравнению с ясенем европейским (Varanchikov et al., 2008). К настоящему времени установлено, что в ряде регионов РФ (Москва, Санкт-Петербург, Орёл, Воронеж, Тула) *F. excelsior* поражается наравне с *F. pennsylvanica*, или же

показатели плотности заселения у *F. excelsior* выше (Orlova-Bienkowskaja, 2013; Баранчиков и др., 2014; Selikhovkin et al., 2022). Исходя из этого, вероятность заселения вредителем не только искусственных насаждений, но и естественных лесов Ростовской области с участием ясеня европейского нельзя исключать.

Таблица 1

Результаты наблюдений за распространением ясеневой узкотелой златки *Agrilus planipennis* на территории Ростовской области в 2022 году

Район, населенный пункт	Тип насаждений	Дата обнаружения	Ясень европейский <i>Fraxinus excelsior</i> L.		Ясень пенсильванский <i>F. pennsylvanica</i> March.	
			Общее кол-во деревьев	Заселенных деревьев, шт./%	Общее кол-во деревьев	Заселенных деревьев, шт./%
Аксайский, хутор Ленина	Полеза-щитная лесополоса	21.VI.2022	0	0	8	0
Неклиновский, Морской Чулек	Лесополоса вдоль железной дороги (ж/д)	02.VII.2022	0	0	20	16/80
		03.IX.2022	0	0	20	2/10
Неклиновский, «1300 км»	Лесополоса вдоль ж/д	17.IX.2022	0	0	30	23/76
		18.IX.2022	0	0	30	27/90
Мясниковский, хутор Недвиговка	Озеленительные посадки	05.VIII.2022	0	0	15	13/86
		03.IX.2022	0	0	15	15/100
Ростов-на-Дону, Первомайский район, Парк культуры и отдыха им. Николая Островского	Парк	20.VIII.2022	10	0	0	0
Ростов-на-Дону, Пролетарский район	Линейные уличные насаждения	11.VII.2022	0	0	5	0
		20.VIII.2022	0	0	5	0
Ростов-на-Дону, Советский район	Куртинные уличные насаждения	11.VII.2022	0	0	3	0
		20.VIII.2022	0	0	2	0
		17.IX.2022	0	0	5	0
Таганрог, парк Горького	Парк	09.VII.2022	10	0	0	0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты наблюдений за распространением ясеневой изумрудной узкотелой златки *Agrilus planipennis* в южной части Ростовской области в течение 2022 года указывают на резкий подъем численности вредителя по сравнению с 2021 годом, а также на существенное увеличение числа и площади поражённых участков. При этом необходимо отметить

отсутствие на данном этапе инвазии влияния таких лимитирующих факторов, как естественные враги (хищники и паразиты) и активное участие человека (фитосанитарные мероприятия, возможная разработка и внедрение методов биологической борьбы). Согласно литературным данным, личинки употребляются в пищу насекомоядными птицами, преимущественно, дятловыми (Picidae) (Herms, McCullough, 2013; Мешкова и др., 2021). Но оценить их роль в качестве фактора регуляции численности вредителя пока не представляется возможным в силу недостатка данных. Мы также не располагаем сведениями о том, добычей каких конкретно хищников становятся взрослые особи. Очевидно, что в сложившихся условиях, расселение *A. planipennis* по территории Ростовской области ставит под угрозу ясеневые насаждения в регионе.

Оперативного и эффективного средства борьбы с ясеневой изумрудной узкотелой златкой на настоящий момент нет. Как правило, в качестве действенного и наиболее быстрого способа купирования очагов вредителя, предлагается полное уничтожение поражённых деревьев в заражённой зоне. В целом, это действительно тот метод, реализовать который можно в достаточно короткий срок. В качестве перспективной альтернативы для решения проблемы биологической защиты ясеня от *A. planipennis* выступает производство паразитических насекомых (Юрченко и др., 2013). Однако этот процесс куда более время- и ресурсозатратный, требующий проведения длительных специальных исследований. В этом аспекте определённую долю оптимизма внушают результаты поисков эффективных местных паразитоидов златки в её новом ареале в Подмоскowie (Гниненко, Клюкин, 2014). Было установлено, что в период с 2013 по 2014 год, три вида наездников-браконид вызвали почти 80 % смертность личинок златки (Гниненко, Клюкин, 2014).

Учитывая актуальность защиты ясеня как элемента озеленительных посадок городских территорий, естественных лесов и лесополос, считаем, что инвазия ясеневой изумрудной златки требует внимания муниципальных органов. Еще раз подчёркиваем, что в условиях значительного лесодефицита, появление нового агрессивного специализированного вредителя одной из основных лесобразующих пород в регионе может иметь серьёзные последствия. Ситуация, пущенная на самотёк, в конечном итоге с большой вероятностью приведёт к массовому размножению жука и, как следствие, уничтожению в Ростовской области ясеней как пенсильванского, так и европейского.

Благодарности. За ценные советы и консультации при поиске литературных источников и подготовке рукописи авторы признательны профессору кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии ЮФУ, д.б.н. О. С. Безугловой, старшему научному сотруднику Ботанического сада ЮФУ, к.б.н. Б. Л. Козловскому, научному сотруднику Южного научного центра РАН, к.б.н. Т. А. Соколовой, доценту кафедры ботаники Академии биологии и биотехнологии ЮФУ, к.б.н. Т. А. Карасёвой и заведующему лабораторией клеточных и геномных технологий растений Ботанического сада ЮФУ, к.б.н. В. А. Чохели. За изготовление и цифровую обработку фотоснимка имаго *Agrilus planipennis* авторы благодарны заведующему сектором зообентоса Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») Н. С. Елфимовой.

Работа выполнена в рамках госзадания ЮНЦ РАН № 122020100332-8 (С. В. Поушкова).

Список литературы

- Баранчиков Ю. Н. ЕАВ – ведущая аббревиатура в Европейской лесозащите в первой половине текущего столетия // VII Чтения памяти О. А. Катаева (Материалы международной конференции). – Санкт-Петербург, 2013. – С. 8–9.
- Баранчиков Ю. Н., Серая Л. Г., Гринаш М. Н. Все виды европейских ясеней неустойчивы к узкотелой златке *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae) – Дальневосточному инвайдеру // Сибирский лесной журнал. – 2014. – № 6. – С. 80–85.
- Волкович М. Г., Суслов Д. В. Первая находка ясеневой изумрудной узкотелой златки *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae) в Санкт-Петербурге свидетельствует о реальной угрозе дворцово-парковым

ансамблям Петергофа и Ораниенбаума // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы, и их роль в лесных экосистемах (XI Чтения памяти О. А. Катаева): материалы Всероссийской конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 24–27 ноября 2020 г. [ред. Д. Л. Мусолин, Н. И. Кириченко, А. В. Селиховкин]. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2020. – С. 119–120. DOI: 10.21266/SPBFTU.2020.KATAEV

Гапон Д. А. Мраморный щитник *Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Heteroptera: Pentatomidae): расширение ареала в европейской части России, описание имаго, личиночных стадий и диагностика вида // Кавказский энтомологический бюллетень. – 2019. – Т. 15, № 2. – С. 241–247.

Гниненко Ю. И., Клюкин М. С. Паразитоиды ясеневой узкотелой златки *Agrilus planipennis* (Fairm.) (Coleoptera: Buprestidae) в Подмосковье // Вредители и болезни древесных растений России (VIII чтения памяти О. А. Катаева): материалы Международной конференции. Санкт-Петербург, 18–20 ноября 2014 г. [Ред. Д. Л. Мусолин, А. В. Селиховкин]. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2014. – С. 22.

Гниненко Ю. И., Ширяева Н. В., Щуров В. И. Самшитовая огневка – новый инвазивный организм в лесах Российского Кавказа // Карантин растений. Наука и практика. – 2014. – № 1 (7). – С. 32–36.

Еспенко Л. П. Биологические инвазии как глобальная экологическая проблема Юга России // Юг России: экология, развитие. – 2012. – № 4. – С. 21–25.

Засоба В. В., Чеплянский И. Я., Поповичев В. В. Семидесятилетний опыт создания государственных защитных лесных полос в степной зоне России // Живые и биокосные системы. – 2019. – № 27. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jbks.ru/archive/issue-27/article-3> (просмотрено 03.10.2022).

Зозулин Г. М. Леса Нижнего Дона. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1992. – 208 с.

Иванов С. П., Швецов В. А., Будашкин Ю. И., Пузанов Д. В., Жидков В. Ю. Апробация метода борьбы с самшитовой огневкой (*Cydalima perspectalis*) на основе искусственного разведения и выпуска в очаги поражения самшита колхидского складчатокрылых ОС-энтомофагов – *Euodynerus posticus* // Экосистемы. – 2015. – № 4. – С. 30–44.

Иванов С. П., Фатерыга А. В., Жидков В. Ю., Пивоваренко Н. А. Гигантская смоляная пчела *Megachile (Callomegachile) sculpturalise* Smith, 1853 (Hymenoptera, Apoidea, Megachilidae) – инвазивный вид в Крыму (заметки о его биологии) // Современные достижения в области апидалогии: сборник статей I Международной научно-практической конференции. 24 июня 2021 г. – Уфа: ФГБОУ ВО «БГПУ им. М. Акмуллы», 2021. – С. 16–23.

Камаев И. О., Тодоров Н. Г. Исследование эффективности синтетического феромона и феромонных ловушек для каштановой моли (*Cameraria ohridella* Deschka et Dimic, 1986) в Московской области // Карантин растений. Наука и практика. – 2014. – Т. 1, № 7. – С. 25–55.

Карта деревьев Ростова-на-Дону. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rostov-trees.ru/#11/47.2565/39.7049> (просмотрено 03.10.2022).

Лесной план Ростовской области на 2018 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zakon.kadastr61.ru/mainmenu/stati/ekologiya/2018/07/15/lesnoj-plan-rostovskoj-oblasti/> (просмотрено 03.10.2022).

Мешкова В. Л., Кучерявенко Т. В., Скрыльник Ю. Е., Зинченко О. В., Борисенко А. И. Начало расселения *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae) на территории Украины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2021. – № 236. – С. 163–184. DOI 10.21266/2079-4304.2021.236.163-184

Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 30.11.2016 N 158 (ред. от 15.07.2022) «Об утверждении единого перечня карантинных объектов Евразийского экономического союза».

Ростовская область – один из самых малолесных регионов России // ЛесПромИнформ [Электронный ресурс]. – 2014. – Вып. 2, № 100. – Режим доступа: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=3603> (просмотрено 01.10.2022).

Юрченко Г. И., Кузьмин Э. А., Бурдэ П. Б. Особенности биологии и основные паразитоиды ясеневой изумрудной узкотелой златки (*Agrilus planipennis* Fairmaire) на юге Приморского Края // Чтения памяти Алексея Ивановича Куренцова. – 2013. – № 14. – С. 174–178.

Agrilus planipennis (AGRLPL). Categorization. [Электронный ресурс]. – EPPO Global Database. – 2011. – Режим доступа: <https://gd.eppo.int/taxon/AGRLPL/categorization> (просмотрено 27.08.2022).

Anulewicz A. C., McCullough D. G., Cappaert D. L., Poland T. M. Host range of the emerald ash borer (*Agrilus planipennis* Fairmaire) (Coleoptera: Buprestidae) in North America: results of multiple-choice field experiments // Environmental Entomology. – 2008. – Vol. 37. – P. 230–241. DOI 10.1603/0046-225x(2008)37[230:hrotea]2.0.co;2

Baranchikov Y. N., Mozolevskaya E. G., Yurchenko G. I., Kenis M. Occurrence of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* in Russia and its potential impact on European forestry // OEPP/EPPO Bulletin. – 2008. – Vol. 38. – P. 233–238.

Drovalenko A. N., Orlova-Bienkowskaja M. J., Bieńkowski A. O. Record of the emerald ash borer (*Agrilus planipennis*) in Ukraine is confirmed // Insects. – 2019. – Vol. 10, N 10. – P. 338. DOI 10.3390/insects10100338

Egorov A. A., Afonin A. N., Musolin D. L., Selikhovkin A. V., Milyutina E. A. On the north-eastern invasive range limit of *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) in the European Russia // Alien species of animals, fungi and plants in Belarus and neighboring countries (Book of Abstracts of the 1 st International Scientific Conference) [D. G. Zhorov et al. eds.]. – Minsk: BSU, 2021. – P. 14-15.

Hermes D. A., McCullough D. G. Emerald Ash Borer Invasion of North America: History, Biology, Ecology, Impacts, and Management // Annual Review of Entomology. – 2013. – Vol. 59. – P. 13–30. DOI:10.1146/annurev-ento-011613-162051

Illustrated guide to the emerald ash borer *Agrilus planipennis* Fairmaire and related species (Coleoptera, Buprestidae) / M. L. Chamorro, E. Jendek, R. A. Haack, T. R. Petrice, N. E. Woodley, A. S. Konstantinov, M. G. Volkovitsh, Xing-Ke Yang, V. V. Grebennikov, S. W. Lingafelter. – Pensoft: Sofia–Moscow, 2015. – 199 p.

McFarlane D. W., Meyer S. P. Characteristics and distribution of potential ash tree hosts for emerald ash borer // Forest Ecology and Management. – 2005. – Vol. 213, N 1–3. – P. 15–24. DOI 10.1016/j.foreco.2005.03.013

Orlova-Bienkowskaja M. J. European range of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) is expanding: the pest destroys ashes in the northwest of Moscow oblast and in part of Tver oblast // Russian Journal of Biological Invasions. – 2013. – N 5. – P. 32–37. DOI: 10.1134/S2075111714010081

Orlova-Bienkowskaja M. J., Drovalenko A. N., Zabaluev I. A., Sazhnev A. S., Peregudova E. Y., Mazurov S. G., Komarov E. V., Struchaev V. V., Martynov V. V., Nikulina T. V., Bieńkowski A. O. Current range of *Agrilus planipennis* Fairmaire, an alien pest of ash trees, in European Russia and Ukraine // Annals of Forest Science. – 2020. – Vol. 77, N 2. – P. 29. DOI 10.1007/s13595-020-0930-z

Orlova-Bienkowskaja, M. J., Bieńkowski A. O. Southern range expansion of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis*, in Russia threatens ash and olive trees in the Middle East and Southern Europe // Forests. – 2022a. – Vol. 13, N 4. DOI 10.3390/f13040541

Orlova-Bienkowskaja, M. J., Bieńkowski A. O. Low heat availability could limit the potential spread of the emerald ash borer to Northern Europe (prognosis based on growing degree days per year) // Insects. – 2022b. – Vol. 13, N 1. DOI 10.3390/insects13010052

Selikhovkin A.V., Musolin D.L., Popovichev B.G., Merkuryev S.A., Volkovitsh M.G., Vasaitis R. Invasive Populations of the Emerald Ash Borer *Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888 (Coleoptera: Buprestidae) in Saint Petersburg, Russia: A Hitchhiker? // Insects. – 2022. – Vol. 13, N 191. – P. 1–13.

Tanis S. R., McCullough D. G. Differential persistence of blue ash and white ash following emerald ash borer invasion // Canadian Journal of Forest Research. – 2012. – Vol. 42, N 8. – P. 1542–1550.

Yang Z.-Q., Wang X.-Y., Gould J. R., Reardon R. C., Zhang Y.-N., Liu G.-J., Liu E.-S. Biology and behavior of *Spathius agrili*, a parasitoid of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* in China // Journal of Insect Science. – 2010. – Vol. 10, N 30. – P. 1–13.

Romanchuk R. V., Meshcheryakova I. S., Poushkova S. V., Kasatkin D. G., Khachikov E. A., Kupryushkin D. P. The distribution of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) in the south of the Rostov region // Ekosistemy. 2022. Iss. 32. P. 33–41.

The paper is devoted to the distribution process of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888 in the Rostov region. This invasive species was first recorded in this region in 2021. The article clarifies the scale of the pest distribution, provides a preliminary analysis of the association of the emerald ash borer with various types of ash plantations, and discusses the degree of its harmfulness in the region. Surveys were carried out in plantings of green ash (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.) and European ash (*F. excelsior* L.) of various types and designs on the territory of the Rostov region during the vegetation season of 2022. The results of the study suggest that the emerald ash borer entered the territory of the region 2–3 years before the first documented discovery. The most intense damage to ash trees was observed in the forest belts located along railways and roads, which confirms the hypothesis of the spread of the pest by road and rail and indicates possible ways of penetration of the emerald ash borer into the Rostov region. Meanwhile, there is an obvious dependence of the species distribution in the direction of the greatest availability of food resources, since it is the forest belts along the main roads that are represented by plantings of ash species. Consequently, the dispersal capacity of a well-flying species should not be considered significantly dependent on transport. It is emphasized that in conditions of significant forest deficiency, the emergence of a new aggressive specialized pest of one of the main forest-forming species poses a real threat to the ash plantations of the region.

Key words: emerald ash borer, *Agrilus planipennis*, invasive species, ash pest, Rostov region.

Поступила в редакцию 21.11.22

Принята к печати 30.11.22

УДК 633.811:674.031.931:581.33:581.143

Сезонная динамика роста и развития пыльников *Jasminum fruticans* L. (Oleaceae) в условиях Южного берега Крыма

Кузьмина Т. Н.

Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН
Ялта, Республика Крым, Россия
tnkuzmina@rambler.ru

Годичные ритмы жизненных циклов генезиса генеративных структур являются механизмами адаптации растений, позволяющими снизить риски стрессовых воздействий сезонных неблагоприятных абиотических факторов. *Jasminum fruticans* L. (Oleaceae) – естественный представитель флоры Южного берега Крыма, который цветет в апреле – мае. Генеративные почки у него закладываются летом предшествующего цветению года. Учитывая, что в процессе генезиса пыльники проходят ряд критических периодов, связанных с детерминацией структур, в течение которых они наиболее уязвимы для негативного воздействия стрессовых факторов, то интерес представляет сезонная периодичность генезиса мужской генеративной сферы у данного вида, обуславливающая продуцирование фертильных пыльцевых зерен. В течение 2017–2020 годов определяли длину и стадию развития пыльников длинно- и короткостолбчатых растений. Значение относительной скорости роста пыльника определяли как отношение его прироста за промежуток времени к единице времени. Материал анализировали, начиная от закладки генеративной почки до начала цветения (с июня по апрель). Выделены стадии генезиса пыльников, и показана их линейная очень тесная положительная связь с длиной. Определены периоды усиления и снижения ростовой активности пыльников *J. fruticans*. Показано, что в течение летнего и осеннего периодов пыльники находятся на стадии покоя. Формирование спорогенной ткани происходит зимой, что сопряжено с усилением интенсивности их роста. Максимальный пик относительной скорости роста пыльников, независимо от морфологической формы растения, происходит в мейотический период. В условиях Южного берега Крыма микроспорогенез у *J. fruticans* отмечался в первой декаде марта, когда среднесуточная температура находится в пределах +10 °С. Цитоморфологический анализ пыльцевых зерен выявил высокую долю морфологически нормальной пыльцы (70–85 %) у данного вида.

Ключевые слова: пыльник, генезис, микроспорогенез, пыльцевые зерна, сезонная динамика, интенсивность роста, гетеростилия, *Jasminum*, Oleaceae.

ВВЕДЕНИЕ

Годичные циклы генезиса генеративных структур у покрытосеменных растений обладают адаптивным характером, который обуславливает снижение стрессового воздействия абиотических факторов в критические периоды развития. Для древесных растений областей с умеренным типом климата стратегия генезиса мужской генеративной сферы направлена на снижение рисков негативного влияния низких температур (Миргородская, 2018). В тоже время, для видов, произрастающих в субтропических областях, также важно нивелирование негативного влияния высоких температур и засухи, характерных для продолжительного летнего периода. На Южном берегу Крыма (ЮБК) средиземноморский тип субтропического климата. Зимы на южном побережье короткие и мягкие с преимущественно положительными температурами, а летний период засушливый и жаркий может длиться 4–4,5 месяца (Важов, 1977, Антюфеев, 2014). Для ряда древесных растений Крыма отмечают, что органообразовательные процессы в почках проходят в течение зимнего периода (Методические указания..., 1977). При этом, сведения о сезонной периодичности генезиса генеративных структур древесных растений и кустарников, произрастающих на ЮБК, как правило, основываются на данных фенологических наблюдений и сведений о стадии генезиса органа (Елманов и др., 1969; Галушко, 1980; Яблонский, 1982; Браилко, Кузьмина, 2015). Однако, для определения характера явления целесообразно использование показателей изменения уровня динамического ряда (Куприенко

и др., 2009). Общепринятым показателем динамики роста органа является его относительная скорость (Лебедев, 1978; Заика, 1982; Шевелуха, 2016). Изучение закономерностей формирования репродуктивных структур растений, как правило, связано с вопросами изучения динамики роста семян и зародышей (Erdelska, 1981; Васильева, Батыгина, 1997). Характеристика роста и развития пыльников, как правило, рассматривается в связи с сопряженностью их размеров и стадий развития (Резникова, 1982; Добровольская и др., 2008). Следует учитывать, что определение интенсивности ростовых процессов позволяет не только выявить закономерности генезиса, но и установить периодичность критических стадий развития, что является одним из важных направлений в области репродуктивной биологии растений (Шевченко, Плугатарь, 2019).

Jasminum fruticans L., жасмин кустарниковый, (сем. Oleaceae) представитель флоры Средиземноморья, Средней и Атлантической областей Европы, средней Азии, а также Южного берега Крыма (Голубев, 1996). Особенностью его репродуктивной сферы является диморфная гетеростилия (Guintián et al., 1998; Thompson, Dommée, 2000; Кузьмина, 2017). Известно, что вид цветет в конце весны, а генеративные почки у него закладываются летом в предшествующий цветению год. Ранее было дано описание генезиса пыльников *J. fruticans* (Кузьмина, 2018).

Цель данной работы – дать характеристику сезонной динамики роста пыльников с учетом основных стадий их генезиса у длинно- и короткостолбчатых растений *J. fruticans* в условиях Южного берега Крыма.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом исследования была мужская генеративная сфера дистильного кустарника флоры Крыма – *Jasminum fruticans* L., представленного в естественной флоре полуострова особями с цветками двух морфологических форм: длинностолбчатой и короткостолбчатой. Сбор материала проводили на территории Никитского ботанического сада (г. Ялта, Республика Крым). Исследование проходило с июля по апрель в период 2017–2020 годов. На рисунке 1 представлены еженедельные показания средней, максимальной и минимальной температуры воздуха, количества осадков и средней относительной влажности воздуха за 2017–2020 годы в период генезиса пыльников *J. fruticans*, рассчитанные на основании данных агрометеостанции «Никитский сад» (пгт. Никита, г. Ялта, Республика Крым).

Начиная с момента закладки генеративных почек до начала цветения, еженедельно для каждой морфологической формы анализировали пыльники 18–24 терминальных бутонов. Бутоны фиксировали в течение суток в уксусном спирте (alcohol 96 % : acetic acid – 3:1). Временные препараты пыльников окрашивали 1 % ацетоорсеином. Анализ препаратов проводили с помощью микроскопа AxioScope A.1 (Zeiss, Германия). Морфометрические измерения пыльников делали с помощью программного приложения AxioVision Rel. 4.8.2. (Zeiss, Германия).

Для цитоморфологической оценки зрелых пыльцевых зерен для каждой морфологической формы готовили постоянные препараты средних образцов пыльцы из пыльников 50 цветков. Препараты окрашивали метилгрюнпиронином (Шевченко и др., 1986). В ходе анализа подсчитывали количество морфологически нормальных, аномальных и стерильных пыльцевых зерен. К группе морфологически нормальных были отнесены пыльцевые зерна с однородно окрашенной цитоплазмой и дифференцированными спермиями. При визуальных признаках деструкции цитоплазмы, ядра вегетативной клетки и спермиев пыльцевые зерна оценивались как аномальные. В случае дегенерации содержимого пыльцевого зерна, его характеризовали как стерильное. Подсчет пыльцевых зерен делали с использованием программных приложений AxioVision Rel. 4.8.2 (Zeiss, Германия) и ImageJ 1.48v (National Institutes of Health, США; <http://imagej.nih.gov/ij>) в 100 полях зрения.

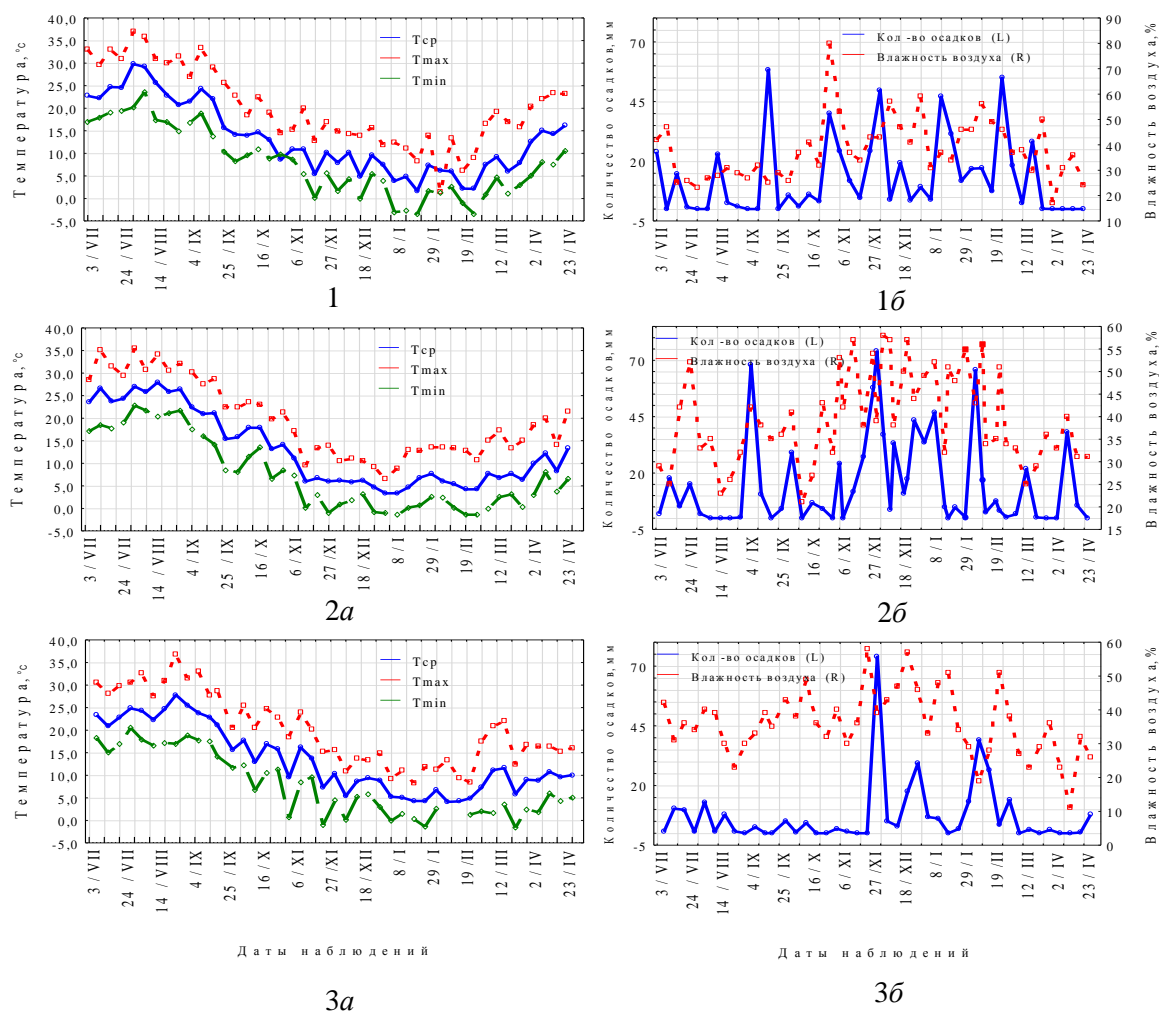


Рис. 1. Метеоданные в период генезиса пыльников *Jasminum fruticans* за 2017–2020 годы 1 – 2017–2018 годы, 2 – 2018–2019 годы, 3 – 2019–2020 годы.

Относительную скорость роста (R) определяли как величину прироста за промежуток времени, отнесенную к единице времени, и вычисляли по формуле:

$$R = \frac{l_2 - l_1}{l_1 t},$$

где: l_1 , l_2 – предыдущая и последующая величины; t – интервал времени в сутках (Vasilyeva et al., 1987).

Данные дескриптивной статистики, корреляционный анализ, построение графиков и расчет относительной скорости роста проводили с помощью программного приложения Statistica 10.0 (StatSoft. Ins., США) (Гашев и др., 2018). Расчет 95 % доверительных интервалов (95 % ДИ) для долей морфологически нормальных, аномальных и стерильных пыльцевых зерен проводили по методу Уилсона с помощью онлайн-калькулятора (<http://vassarstats.net/prop1.html>). Морфометрические данные представлены в виде $\bar{x} \pm S \bar{x}$, где \bar{x} – среднее арифметическое, $S \bar{x}$ – стандартная ошибка среднего; δ – стандартное отклонение. Статически значимыми приняты значения на уровне $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно общепринятой современной классификации в формировании пыльника выделяют три периода: премейотический, мейотический и постмейотический (Батыгина, Васильева, 2002). Основываясь на характеристиках состояния спорогенной ткани/микроспор или мужского гаметофита, можно выделить 8 стадии развития пыльника. Для премейотического периода характерны стадии археспория и спорогенной ткани. Мейотический период связан с редукционным делением и образованием тетрад микроспор. В постмейотический период проходят стадии молодых микроспор, вакуолизированных микроспор, поздней интерфазы и дифференцирующего деления, двухклеточного пыльцевого зерна и зрелой трехклеточной пыльцы. Размеры пыльников двух морфологических форм *J. fruticans* с учетом стадии их развития представлены в таблице 1. Корреляционный анализ показал линейную очень тесную положительную зависимость между стадией развития пыльника и его длиной ($r=0,98$ и $r=0,97$, соответственно для пыльников длинно- и короткостолбчатых растений). На рисунке 2 представлены фактические кривые длин пыльников длинно- и короткостолбчатых растений *J. fruticans*.

На основе данных фактических кривых роста были рассчитаны значения относительных скоростей роста (R) (рис. 3), что позволяет проследить периоды повышения и снижения ростовой активности пыльников у длинно- и короткостолбчатых растений *J. fruticans*. Установлено, что примордии пыльников *J. fruticans* независимо от морфологической формы растения закладываются в последней декаде июня. Визуально различимыми они становятся в первых числах июля года, предшествующего цветению. Характерно, что в период закладки примордиев пыльников среднесуточная температура воздуха в годы исследования колебалась в диапазоне $+20 - +26$ °С, а максимальная температура достигала $+35$ °С. В целом продолжительность премейотического периода у *J. fruticans* независимо от морфологической формы растения составляет 8 месяцев. В ходе этого периода развития у *J. fruticans* можно выделить «первую фазу роста», начало которой приходится на I декаду июля. В I декаде августа она сменяется «фазой покоя», которая длится до II декады декабря. Переход в фазу покоя происходит в наиболее жаркий и засушливый период года, когда, как правило, отсутствуют осадки, а среднесуточная температура воздуха в этот период достигает $+29$ °С. Максимальные её значения в отдельные годы наблюдений составляли $+36,8$ °С. Возобновление ростовых процессов пыльников *J. fruticans* происходит во I декаде декабря («вторая фаза роста»). В этот период происходит формирование спорогенной ткани и клеточных слоев стенки микроспорангия, которое идет в центробежном направлении, что типично для представителей семейства Oleaceae (Литвиненко, 1987; Камелина, 2009). Характерно, что у *J. fruticans*, независимо от морфологической формы, эта стадия развития сопровождается усилением интенсивности ростовых процессов. В период стимуляции роста пыльника и образования спорогенной ткани среднесуточные показатели температуры воздуха были в пределах $+5$ °С.

Максимальный пик ростовой активности соответствует периоду микроспорогенеза и приходится на I–II декады марта, когда среднесуточная температура воздуха находилась в пределах $+10$ °С. Мейотический период генезиса пыльника *J. fruticans* самый короткий в ходе формирования пыльника. Показатели относительной скорости роста пыльников на стадии микроспорогенеза составляют $0,07$ сут.⁻¹ и $0,08$ сут.⁻¹, соответственно для пыльников длинно- и короткостолбчатых цветков.

Постмейотический период, в процессе которого происходит созревание микроспорангия и формирования мужского гаметофита, начинается при снижении интенсивности ростовых процессов пыльника, которые сменяются усилением роста. Пики относительной скорости роста приходятся на I–II декады апреля, то есть на период дифференцирующего митоза, двухклеточных пыльцевых зерен и последующего спермиогенного деления, завершающего формирование мужского гаметофита. Именно в постмейотический период становятся четко выраженными различия размеров пыльников у длинно- и короткостолбчатых цветков

Таблица 1

Длина пыльника на различных стадиях развития у длинно- (L-форма) и короткостолбчатых (S-форма) растений *Jasminum fruticans*

Стадия развития пыльника	Длина пыльников, мм							
	L-форма				S-форма			
	Длина	Min	Max	δ	Длина	Min	Max	δ
1	0,16	0,03	0,25	0,04	0,17	0,05	0,40	0,04
2	0,36	0,13	0,79	0,14	0,38	0,14	0,88	0,14
3	0,89	0,70	1,32	0,08	0,87	0,72	1,05	0,10
4	1,14	0,97	1,37	0,11	1,13	0,91	1,30	0,10
5	1,43	1,05	1,58	0,13	1,43	1,13	1,66	0,15
6	1,70	1,60	1,81	0,07	1,78	1,72	1,83	0,04
7	1,94	1,81	2,09	0,08	1,98	1,85	2,10	0,08
8	2,42	2,10	2,95	0,21	2,48	2,10	3,46	0,33

Примечание к таблице. Стадия развития пыльника: 1 – археспориальная ткань; 2 – спорогенная ткань; 3 – микроспорогенез; 4 – молодые микроспоры; 5 – вакуолизованные микроспоры; 6 – дифференцирующий митоз; 7 – двухклеточные пыльцевые зерна; 8 – трехклеточные пыльцевые зерна. Для L-формы n=2043; для S-формы n=2025.

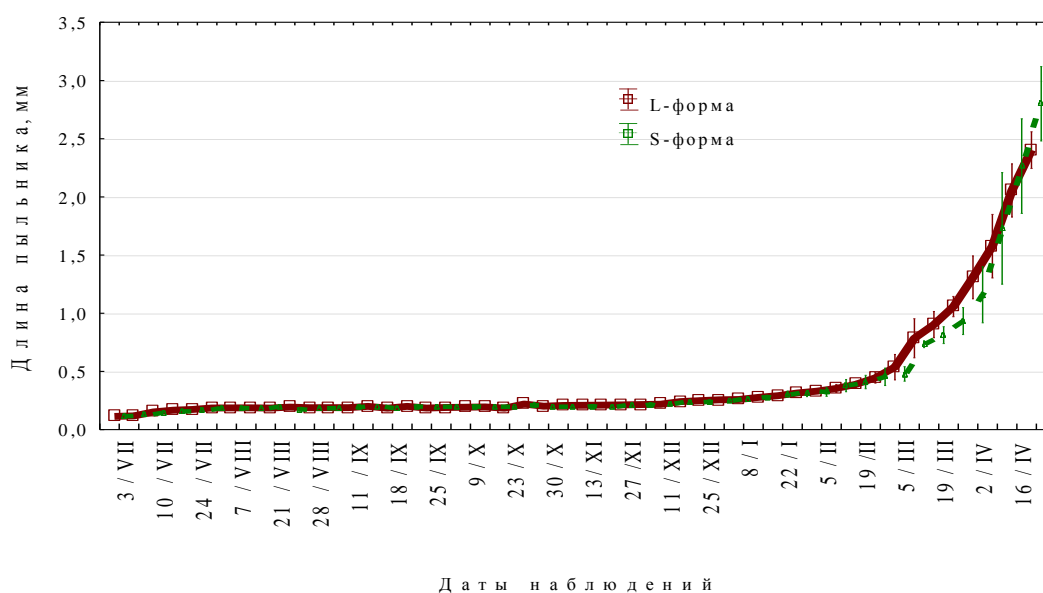


Рис. 2. Кривые длин пыльников длинно- (L-форма) и короткостолбчатых (S-форма) цветков *Jasminum fruticans*

Среднее арифметическое \pm стандартная ошибка среднего; данные за 2017–2020 годы.

J. fruticans. Значения среднесуточных показаний температур воздуха на данной стадии находились в диапазоне +8...+16 °С. Созревания гаметофитов и начало пыления происходит в III декаде апреля, тогда же начинается цветение.

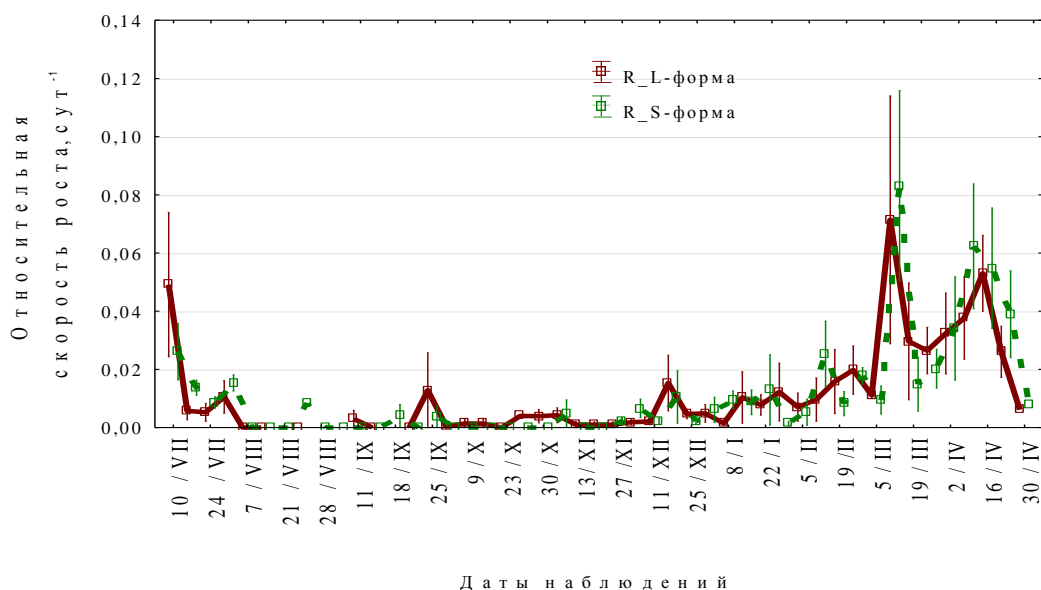


Рис. 3. Динамика средних значений относительной скорости роста пыльников длинно- (L-форма) и короткостолбчатых (S-форма) цветков *Jasminum fruticans* Среднее арифметическое ± стандартная ошибка среднего; данные за 2017–2020 годы.

Цитоморфологическая оценка зрелых пыльцевых зерен длинно- и короткостолбчатых цветков *J. fruticans* показала, что в средних образцах преобладают морфологически нормальные пыльцевые зерна. Так, у длинностолбчатой формы их доля превышает 85 % (95 % ДИ: 85,00–87,00 %), а в пыльниках короткостолбчатых цветков формируется около 70 % (95 % ДИ: 70,05–72,64 %) морфологически нормальных пыльцевых зерен (табл. 2), что свидетельствует о высоком уровне фертильности мужского гаметофита.

Таким образом, развитие пыльников *J. fruticans*, независимо от морфологической формы цветка, характеризуется чередованием периодов усиления и понижения их ростовой активности. Волнообразный характер динамики роста описан для различных структур растений (Яблонский, 1970; Лебедев, 1978; Полевой, Саламатова, 1991; Шевелуха, 2016). При этом изменение интенсивности, локализации и направленности ростовых процессов связывают как с наследственными особенностями, так возрастными и физиолого-биохимическими изменениями, происходящими в растениях. На изменение динамики интенсивности роста оказывают влияние сезонные и суточные колебания факторов внешней среды (температуры, влажности, освещенности, состояние почвенного и воздушного питания) (Лебедев, 1978; Шевелуха, 2016). По мнению Б. П. Токина (1977) внешние факторы могут, как ускорять, так и замедлять и даже приостанавливать развитие.

Известно, что в ходе развития структуры проходят критические периоды. П. Г. Светлов (1960) определил их как периоды детерминации развития, в которые повышается чувствительность клеток к действию внешних факторов, что сопровождается снижением регуляторной деятельности. В ходе органогенеза пыльников критическими считаются ранняя стадия мейоза, стадия тетрад микроспор и стадиях двухклеточных пыльцевых зерен (Добровольская и др., 2009; Batygina, Vasilyeva, 2003). При этом мейотический период, или микроспорогенез, сопровождающийся генетической рекомбинацией и редукцией числа хромосом в ходе образования гаплоидных микроспор, а также качественной перестройкой соматических тканей стенки микроспорангия, является наиболее уязвимым к изменениям влагообеспечения и температурным воздействиям периодом, когда повышаются риски образования аномальных или стерильных гаметофитов (Batygina, Vasilyeva, 2003). Следует

Цитоморфологическая характеристика пыльцевых зерен длинно- и короткостолбчатых цветков *Jasminum fruticans*

Год	Длинностолбчатые цветки				Короткостолбчатые цветки			
	Количество пыльцевых зерен	Доля пыльцевых зерен, %			Количество пыльцевых зерен	Доля пыльцевых зерен, %		
		Морфологически нормальные	Аномальные	Стерильные		Морфологически нормальные	Аномальные	Стерильные
2017	884	83	8	9	815	79	7	14
2018	947	85	9	6	771	57	23	20
2019	1890	87	10	3	1041	68	24	8
2020	2157	86	9	5	2065	75	17	8
Хср±Sx	5878	85,25± 0,85	9± 0,40	5,75± 1,25	4692	69,75± 4,81	17,75± 3,90	12,50± 2,87

отметить, что у *J. fruticans* микроспорогенез приходится на I–II декады марта, когда условиях Южного берега Крыма среднесуточная температура воздуха около +10 °С, что существенно снижает риски образование аномалий в ходе редукционного деления клеток, а, следовательно, формирования стерильных гаметофитов.

Учитывая существующую на сегодняшний день типизацию сезонной периодичности основных стадий генезиса мужской генеративной сферы растений, можно отметить, что *J. fruticans* в большей степени соответствует растениям 1 группы, к которой отнесены представители семейств Caprifoliaceae (*Lonicera tolmachevii* Pojark), Grossulariaceae (*Ribes nigrum* L.), Juglandaceae (*Pterocarya pterocarpa* (Michx.) Kunth ex I. Iljinsk.), Magnoliaceae (*Magnolia sieboldii* K. Koch.), Oleaceae (*Syringa vulgaris* L.) и Rosaceae (*Amygdalus ledebouriana* Schlecht., *Louiseania triloba* (Lindl.) Pachom. (*Prunus triloba* Lindl.), *Padus avium* Mill., *Armeniaca mandschurica* (Maxim.) Skvorts; Staphyleaceae (*Staphylea colchica* Stev.) Миргородская, 2018). Аналогичные ритмы развития пыльников отмечены в условиях Южного берега Крыма для ряда плодовых культур, в частности для персика (*Prunus persica* (L.) Batsch.), миндаля (*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb.) и абрикоса (*Prunus armeniaca* L.) (Елманов и др., 1969; Яблонский, 1982). Спорогенную ткань в зимний период отмечают в пыльниках *Lonicera tatarica* L. (Браилко, Кузьмина, 2015) и культиваров рода *Syringa* L. (Oleaceae) (Jedrzejuk, Szlachetka, 2005). Известно, что устойчивость спорогенной ткани пыльников обусловлена снижением белоксинтезирующей активности ее клеток (Миргородская, 2018), что служит гарантией стабильности данной структуры к повреждающим воздействиям низких температур (Яблонский, 1970). Однако следует учитывать, что период низких температур, характерный для осенне-зимнего периода, является необходимым условием для полноценных процессов формирования генеративных структур растений (Мирославов, Бармичева, 2009; Котеева и др., 2015; Khodorova et al., 2010; Khodorova, Boitel-Conti, 2013).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, у *J. fruticans*, независимо от морфологической формы растения, продолжительность генезиса пыльников от закладки до созревания составляет 10 месяцев. Наиболее длительным является премейотический период, который занимает 8 месяцев, в течение которых четыре месяца (с августа по декабрь) пыльник находится на стадии археспориальной ткани. В этот период практически отсутствует рост пыльников. Усиление интенсивности ростовых процессов начинается с I декады декабря года, предшествующего цветению, на стадии деления и дифференциации клеточных слоев стенки микроспорангия и спорогенной ткани. Переход пыльников к стадии микроспорогенеза отмечается в сезон стабильных положительных температур, который в условиях ЮБК характерен для начала марта. Среднесуточная температура воздуха в этот период находится в пределах +10 °С. Созревание гаметофитов завершается через 1–1,5 месяца после формирования микроспор. Сезонные ритмы генезиса пыльников *J. fruticans* позволяют нивелировать стрессовые влияния метео-климатических факторов, главным образом, в критические периоды генезиса, что является залогом продуцирования фертильных пыльцевых зерен, доля которых составляет 70–85 %.

Работа выполнена в рамках плановой темы сектора структурной ботаники и репродуктивной биологии растений Никитского ботанического сада – Национального научного центра «Изучение репродуктивных процессов редких и ценных видов семейств Oleaceae, Iridaceae, Asphodelaceae и Scitaginaceae с целью познания морфогенетических и функциональных закономерностей системы репродукции и в связи с задачами сохранения и размножения растений», номер государственной регистрации № 0829-2019-0039.

Список литературы

- Антюфеев В. В., Казмирова Р. Н., Евтушенко А. П. Агроклиматические, микроклиматические и почвенные условия в приморской полосе Южного берега Крыма. Теоретические основы и практические рекомендации для рационального размещения растений при реконструкции насаждений // Сборник научных трудов ГНБС. – 2014. – Т. 137. – 88 с.
- Батыгина Т. Б., Васильева В. Е. Размножение растений: Учебник. – СПб: Изд-во С.-Петербургского университета, 2002. – 232 с.
- Брайло В. А., Кузьмина Т. Н. Декоративные жимолости на Южном берегу Крыма: особенности внутрипочечного развития и цветения // Ученые записки Казанского университета. Серия. Естественные науки – Т. 157, кн. 3. – С. 47–57.
- Важов В. И. Агроклиматическое районирование Крыма // Труды Никитского ботанического сада. — 1977. – Т. 70. – С. 92–120.
- Васильева В. Е., Батыгина Т. Б. Автономность зародыша // Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции. Т. 2. Семя / [Ред. Т. Б. Батыгина]. – СПб: Мир и семья, 1997. – С. 579–588.
- Галушко Р. В. Ритмы внутрипочечного развития средиземноморский древесных растений // Сборник научных трудов Никитского ботанического сада. – 1988. – Т. 106. – С. 46–54.
- Гашев С. Н., Бетляева Ф. Х., Лупинос М. Ю. Математические методы в биологии. Анализ биологических данных в системе Statistica. – М.: Изд-во Юрайт, 2018. – 208 с.
- Голубев В. Н. Биологическая флора Крыма. – Ялта: Изд-во НБС-ННЦ, 1996. – 126 с.
- Добровольская А. А., Родионова Г. Б., Воронков А. С., Ковалева Л. В. Спорофитно-гаметофитные взаимодействия в системе пыльник-мужской гаметофит у петунии // Физиология растений. – 2009. – Т. 56, № 3. – С. 437–444.
- Елманов С. И., Яблонский Е. А., Шолохов А. М. Анатомио-морфологические и физиологические исследования цветковых почек абрикоса в связи с их зимостойкостью // Труды Государственного Никитского ботанического сада – Т. 60. – 1969. – С. 65–79.
- Заика В. Е. Современное состояние теории роста // Математическая биология развития. – М.: Наука, 1982. – С. 40–49.
- Камелина О. П. Систематическая эмбриология цветковых растений. Двудольные. – Барнаул: Изд-во «АРТИКА», 2009. – 501 с.
- Котеева Н. К., Миргородская О. Е., Булышева М. М., Мирославов Е. А. Формирование пыльцы *Ribes nigrum* (Grossulariaceae) в связи с периодом пониженных температур // Ботанический журнал. – 2015. – Т. 100, № 10. – С. 1001–1014.

- Кузьмина Т. Н. Диморфизм цветков *Jasminum fruticans* L. // Вестник Пермского университета. Серия Биология. – 2017. – Вып. 3. – С. 233–239.
- Кузьмина Т. Н. Формирование мужских генеративных структур у *Jasminum fruticans* L. (Oleaceae) // Ботанический журнал. – 2018. – Т. 103, № 5. – С. 654–663.
- Куприенко Н. В., Пономарева О. А., Тихонов Д. В. Статистика. Анализ рядов динамики: учебное пособие. – СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. – 203 с.
- Лебедев С. И. Физиология растений. – Киев: Вища школа, 1978. – 440 с.
- Литвиненко Н. М. Семейство Oleaceae // Сравнительная эмбриология цветковых растений. Davidiaceae – Asteraceae. – Л.: Наука, 1987. – С. 154–158.
- Методические указания по фенологическим наблюдениям над деревьями и кустарниками при их интродукции на юге СССР / [Сост. Голубева И. В., Галушко Р. В., Кормилицын А. М.]. – Ялта, 1977. – 25 с.
- Миргородская О. Е. Развитие мужского гаметофита некоторых древесных покрытосеменных растений в условиях умеренного климата: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – СПб: Ботанический института им. В. Л. Комарова РАН, 2018. – 22 с.
- Мирославов Е. А., Бармичева Е. М. Апоптозоподобная деградация пыльцевых зерен у *Scilla sibirica* связана с отсутствием пониженных температур при их развитии // Физиология растений – 2009. – Т. 56, № 6. – С. 942–947.
- Полевой В. В., Саламатова Т. С. Физиология роста и развития растений: учебное пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. – 240 с.
- Резникова С. А. Цитология и физиология развивающегося пыльника. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
- Светлов П. Г. Теория критических периодов развития и ее значение для понимания принципов действия среды на онтогенез // Вопросы цитологии и общей физиологии / [Ред. Ю. И. Полянский]. – М.–Л., 1960. – С. 263–285.
- Токин Б. П. Общая эмбриология. Учебник для биологических специальностей университетов. – М.: Высшая школа, 1977. – 512 с.
- Шевелуха В. С. Рост растений и его регуляция в онтогенезе. Избранные сочинения. Т. 1. – М.: Изд-во ИТРК, 2016. – 594 с.
- Шевченко С. В., Ругузов И. А., Ефремова Л. М. Методика окраски постоянных препаратов метиловым зеленым и пиронином // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 1986. – Т. 60. – С. 99–101.
- Шевченко С. В., Плугатарь Ю. В. Репродуктивная биология цветковых растений и задачи рационального приропользования // Plant Biology and Horticulture: theory, innovation. – 2019. – № 3 (152). – С. 15–25.
- Яблонский Е. А. Влияние температуры на зимнее развитие генеративных почек абрикоса // Физиология растений. – 1982. – Т. 29, № 6. – С. 1075–1082.
- Яблонский Е. А. Темпы роста и зимостойкость сортов абрикоса, персика и миндаля // Исследования по физиологии, биохимии, цитологии, эмбриологии и радиобиологии растений. Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 1970. – Т. 44. – С. 50–61.
- Batygina T. B., Vasilyeva V. E. Periodization in the development of flowering plant reproductive structures: critical periods // Acta Biologica Cracoviensia. Series Botanica. – 2003. – Vol. 45, N 1. – P. 27–36.
- Erdelska O. Dynamics of early embryo development in reference to endosperm and embryo types in angiosperm // Acta Soc. Bot. Polon. – 1981. – Vol. 50, N 1–2. – P. 269–272.
- Gutián J., Gutián P., Medrano M. Floral biology of the distylous Mediterranean shrub *Jasminum fruticans* (Oleaceae) // Nordic Journal of Botany. – 1998. – Vol. 18. – P. 195–201.
- Jedrzujuk A., Szlachetka W. Development of flower organs in common lilac (*Syringa vulgaris* L.) cv. Mme Florent Stepman // Acta Biologica Cracoviensia. Series Botanica. – 2005. – Vol. 42, N 2. – P. 41–52.
- Khodorova N. V., Boitel-Conti M. The role of temperature in the growth and flowering of geophytes // Plants. – 2013. – Vol. 2. – P. 699–711.
- Khodorova N. V., Miroslovov E. A., Shavarda A. L., Laberche J.-C., Boitel-Conti M. Bud development in *Corydalis bracteata* requires low temperature: a study of developmental and carbohydrate changes // Annals of Botany. – 2010. – Vol. 105. – P. 891–903.
- Thompson J. D., Dommée B. Morph-specific patterns of variation in stigma height in natural populations of distylous *Jasminum fruticans*. // New Phytol. – 2000. – Vol. 148. – P. 303–314.
- Vasilyeva V. E., Batygina T. B., Titova G. E. Morpho-physiological correlation in the development of the reproductive structures of *Nelumbo nucifera* Gaertn. // Phytomorphology: An International Journal of Plant Morphology. – 1987. – Vol. 37. – P. 349–357.

Kuzmina T. N. Seasonal dynamics of growth and development of anthers of *Jasminum fruticans* L. (Oleaceae) in conditions of the Southern Coast of Crimea // Ekosistemy. 2022. Iss. 32. P. 42–51.

The annual rhythms of life cycles of the genesis of generative structures are the mechanism of plant adaptation. *Jasminum fruticans* L. (Oleaceae) is a representative of natural flora of the Southern Coast of Crimea. The species is blooming in April–May. Generative buds are formed in summer in the year preceding flowering. The study is aimed at revealing the seasonal periodicity of the genesis of the male generative sphere of *J. fruticans*. The length and the stage of development of anthers of long- and short-styled plants were determined during 2017–2020. The value of the relative growth rate (R) of the anther was calculated as the ratio of its growth over a certain period of time to a unit of time. The material was taken for the analysis, starting with the formation of the generative bud and up to the beginning of flowering (from June to April). The stages of the genesis of anthers were determined. A linear close positive relationship between the stage of anther development and its length was shown. The stages of increase and decrease of growth activity of anthers were revealed. The anthers of *J. fruticans* were dormant during summer and autumn periods. Growth increased in winter, when sporogenic tissue was formed. The maximum peak of the relative growth rate of anthers occurred during the meiotic period, regardless of the morphological form of the plant. In the conditions of the Southern Coast of Crimea, microsporogenesis of *J. fruticans* was observed in the first decade of March, when the average daily temperature was within +10 °C. Cytomorphological analysis of pollen grains revealed a high proportion of morphologically normal pollen (70–85 %).

Key words: anther, genesis, microsporogenesis, pollen grains, seasonal dynamics, growth intensity, heterostyly, *Jasminum*, Oleaceae.

Поступила в редакцию 18.02.22
Принята к печати 12.12.22

УДК 579.6 : 579.222

Микробиологическая деградация гормоноподобных ксенобиотиков

Зайцева Т. Б., Руссу А. Д., Медведева Н. Г.

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН

Санкт-Петербург, Россия

zaytseva.62@list.ru, angelarussu@list.ru, ngmedvedeva@gmail.com

Загрязнение объектов окружающей среды гормоноподобными ксенобиотиками, оказывающими негативное влияние на эндокринную систему животных и человека, представляет серьезную экологическую проблему. Нонилфенол (НФ) является одним из наиболее распространенных гормоноподобных ксенобиотиков. Для очистки природных экосистем, загрязненных данным поллютантом, наиболее экологичными являются биотехнологические методы с использованием микроорганизмов, в частности, бактерий. Цель данной статьи – выделение из загрязненной нонилфенолом почвы и идентификация активного бактериального штамма-деструктора НФ, изучение его деструктивных свойств в воде и почве. Идентификацию выделенного штамма 8 проводили по фенотипическим признакам с использованием стандартных методов и методом секвенирования по Сэнгеру фрагмента последовательности гена 16S рРНК (*rrs*). Содержание НФ определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Новый бактериальный штамм *Lelliottia jeotgalis* 8 выделен из дерново-подзолистой почвы, загрязненной нонилфенолом. Выявлена высокая эффективность штамма для деградации НФ в аэробных условиях в водной среде при различных концентрациях НФ (50–300 мг/л) и в почве (100 мг/кг с.п.). Представленное исследование впервые демонстрирует способность *L. jeotgalis* 8 деструктировать НФ. Результаты этого исследования предоставляют полезную информацию для применения *L. jeotgalis* 8 в процессах биоремедиации загрязненных гормоноподобными ксенобиотиками экосистем.

Ключевые слова: гормоноподобный ксенобиотик нонилфенол; биодеградация; *Lelliottia jeotgalis* 8; идентификация.

ВВЕДЕНИЕ

Гормоноподобные ксенобиотики – различные синтетические вещества, которые, имитируя функции нормальных гормонов, разрушают эндокринную систему, оказывают неблагоприятное воздействие на человека и состояние окружающей среды (Ismanto et al., 2022).

К числу гормоноподобных соединений относится нонилфенол (НФ) – продукт неполного разложения широко используемых в промышленных и бытовых препаратах неионогенных поверхностно-активных веществ оксиэтилированных нонилфенолов, занимающих одно из первых мест среди контаминантов экосистем (Acir, Klaus, 2018).

В окружающую среду НФ попадает в основном со сточными водами и обнаруживается в воздухе, почве, воде, донных отложениях (Gavrilescu et al., 2015). Загрязнение нонилфенолом объектов окружающей среды происходит, главным образом, за счет сбросов в окружающую среду бытовых и промышленных сточных вод, недостаточно очищенных на водоочистных сооружениях. Об этом свидетельствует тот факт, что, как правило, наиболее высокие концентрации нонилфенолов фиксируются в точках отбора непосредственно вблизи стоков (Barber et al., 2015).

Уровень загрязнения водных экосистем нонилфенолом может достигать сотен микрограмм в литре (Sole et al., 2000), морских и пресноводных донных осадков – тысяч мг/кг (Guo et al., 2021), почв – сотен миллиграмм на килограмм (Careghini et al., 2015). НФ оказывает негативное воздействие на природные экосистемы, вызывая существенные изменения в численности и составе микробиоты (Кузикова и др., 2019; Kuzikova et al., 2022).

Загрязнение нонилфенолом окружающей среды вызывает серьезную озабоченность вследствие его токсичности для водных организмов, животных и людей (Guo et al., 2021;

Khalid, Abdollahi, 2021; Shao et al., 2021). Поскольку НФ обладает низкой растворимостью и высокой гидрофобностью, он способен накапливаться в человеческом организме и вызывать или усугублять различные заболевания. НФ нарушает работу репродуктивной, эндокринной, иммунной и центральной нервной систем, может обладать канцерогенными свойствами, вызывает сердечно-сосудистые и аллергические заболевания, артериальную гипертензию и так далее (Suen et al., 2012; Acir, Klaus, 2018; Ismanto et al., 2022).

Высокая токсичность НФ в сочетании с его персистентностью и значительным потенциалом биоаккумуляции в водных организмах, стали основанием для признания для его включения в список приоритетных опасных веществ в рамках Европейской водной рамочной директивы (Directive 2000/60/EC). В настоящее время в ряде стран введены ограничения на производство и использование НФ, регламентировано содержание НФ в объектах окружающей среды.

В окружающей среде (воде, донных осадках, почве) НФ может трансформироваться до менее токсичных соединений за счет абиотических (гидролиза, фотолиза) и биологических процессов (Bhandari et al., 2021). Однако одной из основных стратегий снижения содержания НФ в окружающей среде является микробная деградация.

Известно, что микроорганизмы различных таксономических групп обладают способностью деградировать НФ (Ma et al., 2018; Zaytseva, Medvedeva, 2019; Kuzikova et al., 2020; Feng et al., 2022).

Способностью к деструкции нонилфенола обладает широкий спектр бактериальных штаммов, принадлежащих к разным родам: *Acidovorax*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Maricurvus*, *Pseudomonas*, *Sphingomonas*, *Rizobium* и другие (Bhandari et al., 2021). Отмечается, что деградация НФ может осуществляться не только отдельными бактериальными культурами, но и их консорциумами (Bai et al., 2017).

Цель настоящей работы – выделить из загрязненной гормоноподобным ксенобиотиком нонилфенолом почвы активный бактериальный штамм-деструктор НФ, идентифицировать его и изучить его деструктивные свойства в воде и почве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования использованы образцы верхних горизонтов дерново-подзолистой суглинистой почвы (Ленинградская область), технический нонилфенол – НФ (CAS: 84852-15-3) производства Sigma-Aldrich (США).

Почвенные бактерии-деструкторы НФ выделяли из загрязненной нонилфенолом в концентрации 300 мг/кг сухой почвы (с.п.) и инкубированной в течение 90 суток почвы с использованием метода накопительной культуры в жидкой Минимальной Минеральной Среде (ММС) следующего состава (массовая доля): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0,4; KH_2PO_4 – 0,15; K_2HPO_4 – 0,15; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,02, содержащей НФ (50 мг/л) в качестве селективного агента. Накопительные культуры инкубировали на роторном шейкере Certomat BS-1 при 230 об./мин., 28 °С в темновых условиях. Каждые 4 суток производили пересев – пассаж (10 % об.) в свежую среду того же состава. Выделение бактериальных культур проводили после 4 и 5-го пассажей методом Коха на двух средах – на СПА, содержащем 50 мг/л НФ, и на агаризованной среде ММС, содержащей агар – 2 %; глюкозу – 0,5 %; дрожжевой экстракт – 0,2 %; НФ – 50 мг/л. Посевы инкубировали при 28 °С в течение 3 дней. Морфологически различные колонии бактерий были отобраны для дальнейшего изучения их способности деструктировать НФ.

Отобранные бактериальные изоляты инкубировали в ММС, содержащей НФ (100 мг/л), на роторном шейкере при 230 об./мин, 28 °С в темноте в течение 7 дней, после чего отбирали образцы для измерения концентрации НФ и выбора наиболее активных штаммов-деструкторов.

Идентификацию бактериального штамма-деструктора нонилфенола проводили по фенотипическим признакам с использованием общепринятых методик (Krige, Padgett, 2011) и по секвенированию ITS региона ДНК.

При идентификации штамма 8 применен метод секвенирования по Сэнгеру фрагмента последовательности гена 16S рРНК (*rrs*). Для амплификации участка гена 16S рРНК (около 1500 пн) применяли праймеры fD1 (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') и rD1 (5'-CTTAAGGAGGTGATCCAGCC-3') (Weisburg et al., 1991).

Определение нуклеотидной последовательности ПЦР-продукта проводили на генетическом анализаторе ABI 3500xl («Applied Biosystems», США). Штамм 8 был идентифицирован в Ведомственной коллекции полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения (ВКСМ, Санкт-Петербург).

Культивирование штамма 8 проводили в глубинных условиях на среде ММС, содержащей НФ, на роторном шейкере Certomat BS-1 при 230 об./мин., 28 °С в темновых условиях. Нонилфенол вносили в питательную среду в виде этанольных растворов, создавая концентрации 50,0–300,0 мг НФ/л. Продолжительность культивирования составляла 7 суток.

В экспериментах по изучению деструкции НФ штаммом 8 в почве поллютант вносили в почву в виде ацетоновых растворов по методике, описанной ранее (Кузикова и др., 2019), создавая концентрацию 100 мг НФ/кг с.п. Почвенные образцы (контрольные и содержащие штамм 8) инкубировали в темновых условиях при комнатной температуре в течение 30 суток и влажности почвы 60 % при периодическом перемешивании.

В качестве инокулята в экспериментах по деградации НФ как в жидкой среде, так и в почве использовали суспензии клеток, выращенных при 28 °С в течение 48–72 часов на агаризованной среде ММС, содержащей агар – 2 %; глюкозу – 0,5 %; дрожжевой экстракт – 0,2 %; НФ – 50 мг/л. Бактериальные суспензии вносили в содержащие нонилфенол жидкую среду культивирования ММС и почву в таком количестве, чтобы плотность клеток составляла $2 \pm 1 \times 10^8$ клеток/мл и $4 \pm 1 \times 10^8$ клеток/г с.п. соответственно.

Содержание НФ в почвенных образцах, культуральных жидкостях (клетки+среда) и в абиотических контролях определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе «Hewlett-Packard» H 1090 по методикам, представленным ранее (Кузикова и др., 2019; Kuzikova et al., 2020).

Скорость убыли НФ в быстрой фазе оценивали по продолжительности периода 50 % деструкции поллютанта T_{50} и по величине коэффициента скорости реакции первого порядка k (сутки⁻¹), рассчитанных с использованием линейного регрессионного анализа (Liu et al., 2013).

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета компьютерных программ Statistica software (версия 6). Статистическая значимость была установлена при $p \leq 0,05$. Полученные данные представлены как среднее значение \pm стандартное отклонение трех независимых повторов каждого варианта с тремя параллельными повторностями в каждом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из образца дерново-подзолистой почвы, загрязненной нонилфенолом (300 мг/кг с.п.), выделен бактериальный штамм 8, продемонстрировавший высокую деструктивную активность в отношении НФ (50 мг/л): после 4 суток культивирования степень биодеструкции поллютанта составила 75 %. Следует отметить, что в контрольных вариантах (без клеток бактерий) убыль нонилфенола в среде не происходила (данные не приводятся).

Клетки штамма 8 – граммотрицательные неспорообразующие подвижные палочки. На СПА штамм образует округлые колонии молочного цвета диаметром 3–4 мм, имеющие выпуклый профиль, ровный край, гладкую, блестящую поверхность, мелкозернистую структуру, жидкую консистенцию. Штамм 8 – каталазоположительный, оксидазоотрицательный, является факультативным анаэробом. Реакция Фогес-Проскауэра положительная, индол не образует. Штамм не способен к использованию мочевины. Атмосферный азот ассимилирует слабо. Способен к денитрификации, потребляет азот минеральных солей, катаболизирует лактозу, рамнозу, арабинозу, фруктозу, галактозу, маннозу, ксилозу, маннит, сорбит, глюкозу (с образованием кислоты и газа), дульцит, инозит, крахмал. Протеолитической активностью в отношении казеина и желатин не обладает.

Штамм проявляет амилолитическую и липолитическую активность в отношении Твин 60. Штамм способен к росту в широком диапазоне температур (5–36 °С) и pH 3–9, однако при pH 3 рост слабый. Хорошо растет в присутствии 2,5–6,5 % NaCl (при 10 % NaCl рост очень слабый).

Методом секвенирования фрагмента последовательности гена 16S рРНК показано, что ген 16S рибосомальной РНК штамма 8 проявляет высокие степени идентичности (>99 %) с аналогичными генами бактерий *Lelliottia*: *Lelliottia amnigena* partial HAMBI 289 (99,66 %), *Lelliottia* sp. WB101 (99,79 %), *Lelliottia jeotgali* PFL01T (99,59 %), *Lelliottia amnigena* JCM1237T (99,37 %) и 100 % сходство гена 16S рибосомальной РНК с аналогичным геном типового штамма *Lelliottia jeotgalis* PFL01T. По совокупности морфолого-культуральных, физиолого-биохимических свойств и результатов, полученных при секвенировании фрагмента последовательности гена 16S рРНК, штамм 8 идентифицирован как *Lelliottia jeotgali* 8.

Следует отметить, что деструктивные свойства в отношении алкилфенолов у бактерий рода *Lelliottia* выявлены впервые. Выделенные бактерии-деструкторы *Lelliottia* входят в филум *Proteobacteria*, который, как показано ранее, является доминирующим филумом в таксономической структуре микробного сообщества дерново-подзолистой суглинистой почвы после ее загрязнения нонилфенолом (Кузикова и др., 2019).

Установлено, что выделенный бактериальный штамм *L. jeotgali* способен деструктировать НФ жидкой среде в широком диапазоне концентраций 50–300 мг/л (рис. 1).

Анализ кривых степени удаления НФ в условиях данных экспериментов позволил выделить 2 фазы – более быструю и замедленную (рис. 1). Следует отметить, что аналогичный двухфазный характер убыли НФ ранее также был отмечен в присутствии бактерий, цианобактерий и микромицетов (Bai et al., 2017; Zaytseva, Medvedeva, 2019; Kuzikova et al., 2020).

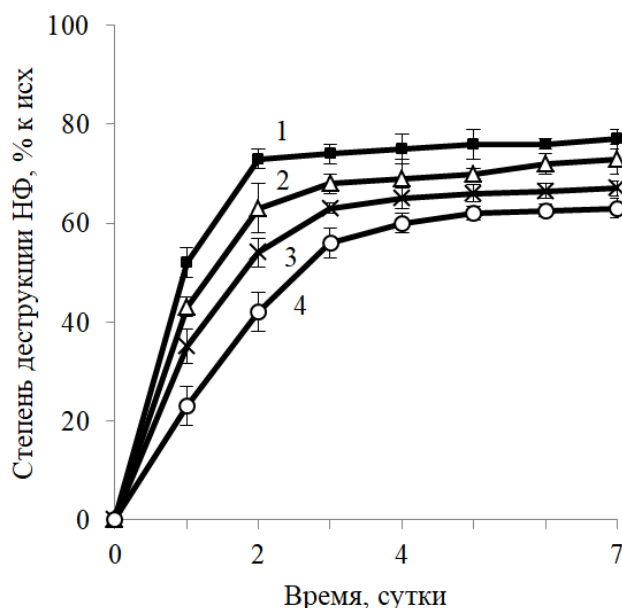


Рис. 1. Зависимость степени деструкции нонилфенола бактерией *Lelliottia jeotgali* от его содержания в среде: 1 – 50 мг/л; 2 – 100 мг/л; 3 – 200 мг/л; 4 – 300 мг/л

Продолжительность быстрой фазы убыли НФ зависела от его содержания в среде и составляла 2 суток при 50 и 100 мг НФ/л и 3 суток – при 200 и 300 мг НФ/л. К окончанию быстрой фазы удаления НФ степень его биодеструкции бактерий *L. jeotgali* в зависимости от его исходной концентрации составила 60–73 %. Затем наблюдалось замедление процесса биодеструкции.

Повышение содержания НФ в среде приводило к дозо-зависимому увеличению времени его 50 % удаления и снижению скорости биодegradации (табл. 1).

Так, при увеличении начального содержания НФ от 50 до 300 мг/л коэффициент скорости деструкции k снизился в 2,4 раза, а длительность полураспада нонилфенола возросла в 2,2 раза.

Таблица 1

Зависимость величины коэффициента скорости дегradации нонилфенола k и продолжительности его полудеструкции бактерией *L. jeotgali* 8 от концентрации нонилфенола в среде

Нонилфенол, мг/л	Уравнение линейной регрессии	k , сутки ⁻¹	T_{50} , сутки	R^2	Степень биодеструкции нонилфенола (7 суток), %
50	$\ln(C_t/C_0) = -0,64 \times t - 0,04$	$0,64 \pm 0,07$	$1,15 \pm 0,11$	0,957	$77 \pm 0,11$
100	$\ln(C_t/C_0) = -0,45 \times t - 0,02$	$0,45 \pm 0,05$	$1,51 \pm 0,23$	0,953	$73 \pm 0,25$
200	$\ln(C_t/C_0) = -0,33 \times t - 0,05$	$0,33 \pm 0,04$	$1,95 \pm 0,09$	0,981	$67 \pm 0,09$
300	$\ln(C_t/C_0) = -0,27 \times t - 0,02$	$0,27 \pm 0,03$	$2,49 \pm 0,18$	0,971	$63 \pm 0,18$

Примечание к таблице. k – коэффициент скорости деструкции нонилфенола; T_{50} – продолжительность периода 50 % деструкции НФ; R^2 – коэффициент детерминации.

Полученные результаты сопоставимы с данными других авторов, показавших снижение скорости деструкции НФ с повышением его концентрации в среде бактериальными штаммами *Sphingobium amniense* и *Sphingomonas cloacae* (Ikunaga et al., 2004). Однако Watanabe с соавторами (Watanabe et al., 2012) представили противоположные результаты: при увеличении концентрации нонилфенола от 50 до 100 мг/л скорость его деструкции бактерией *Pseudomonas fulva* оставалась постоянной, в то время как скорость его дегradации бактерией *Acidovorax* sp. возрастала.

При изучении деструкции НФ в почве выявлено, что в контрольном варианте (без *L. jeotgali* 8) происходит дегradация поллютанта автохтонной микробиотой: коэффициент скорости его дегradации составил 0,021 суток⁻¹, время полудегradации – 32,1 суток, степень деструкции после 30 суток инкубирования – 42 % (рис. 2, табл. 2).

Внесение в почву клеток *L. jeotgali* 8 приводило к значительному ускорению процесса деструкции НФ: коэффициент k возрастал в 5,7 раза, уровень T_{50} снижался в 5,3 раза, степень деструкции после 30 суток инкубирования повышалась в 2,1 раза (рис. 2, табл. 2).

Следует отметить, что дегradации НФ в почве, как и в жидкой среде имеет двухфазный характер. Предполагается, что замедление процесса биодеструкции может быть вызвано ухудшением качества среды вследствие образования токсичных для бактерий метаболитов или гибелью деструкторов (Vai et al., 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из образца дерново-подзолистой почвы, загрязненной нонилфенолом выделен бактериальный штамм-деструктор НФ, идентифицированный как *Lelliottia jeotgali* 8. Выделенный штамм способен к деструкции нонилфенола в аэробных условиях в жидкой среде при различных концентрациях НФ (50–300 мг/л) и в почве (100 мг/кг с.п.).

Результаты данного исследования предоставляют полезную информацию для применения бактерии *L. jeotgali* 8 в процессах биоремедиации.

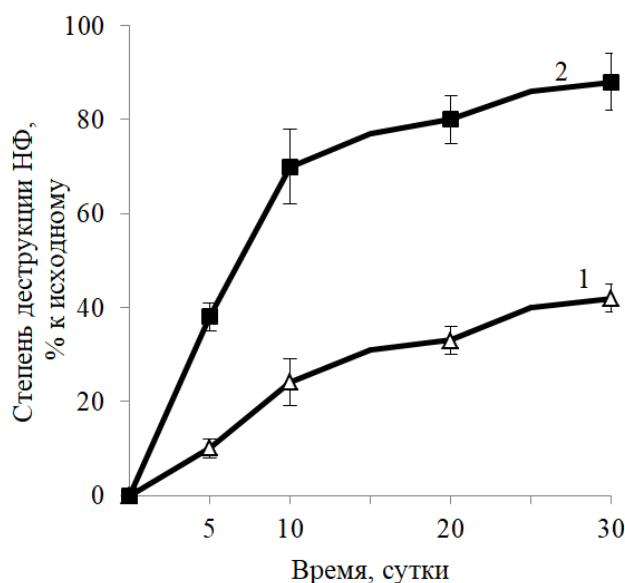


Рис. 2. Деструкция нонилфенола в почве бактерией *L. jeotgali* 8: 1 – контрольный вариант (без *L. jeotgali* 8), 2 – вариант почвы, обработанный клетками *L. jeotgali* 8

Таблица 2

Влияние бактерии *L. jeotgali* 8 на скорость деградации нонилфенола в почве

Вариант почвы	Уравнение линейной регрессии	k , сутки ⁻¹	T_{50} , сутки	R^2	Степень биодеструкции нонилфенола (30 суток), %
Контроль (без <i>L. jeotgali</i> 8)	$\ln(C_t/C_0) = -0,021 \times t - 0,019$	$0,021 \pm 0,005$	$32,1 \pm 2,6$	0,957	42
Обработанная клетками <i>L. jeotgali</i> 8	$\ln(C_t/C_0) = -0,12 \times t + 0,04$	$0,12 \pm 0,03$	$6,1 \pm 0,7$	0,989	88

Примечание к таблице. k – коэффициент скорости деструкции нонилфенола; T_{50} – продолжительность периода 50 %-й деструкции НФ; R^2 – коэффициент детерминации.

Полученные результаты могут быть использованы при решении актуальной фундаментальной задачи по разработке конвергентных биотехнологий для очистки экосистем, загрязненных гормоноподобными экотоксикантами.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122041100086-5).

Список литературы

- Кузикова И. Л., Зайцева Т. Б., Кичко А. А., Зиновьева С. В., Руссу А. Д., Маячкина Н. В., Медведева Н. Г. Влияние нонилфенолов на численность и таксономическую структуру почвенного микробного сообщества // Почвоведение. – 2019. – № 6. – С. 724–735.
- Acir I.-H., Klaus G. Endocrine-disrupting metabolites of alkylphenol ethoxylates – A critical review of analytical methods, environmental occurrences, toxicity, and Regulation // Science of the Total Environment. – 2018. – N 635. – P. 1530–1546. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.079
- Bai N., Abuduaini R., Wang S., Zhang M., Zhu X., Zhao Y. Nonylphenol biodegradation characterizations and bacterial composition analysis of an effective consortium NP-M2 // Environmental Pollution. – 2017. – Vol. 220. – P. 95–104. DOI:10.1016/j.envpol.2016.09.027

- Barber L. B., Loyo-Rosales J. E., Rice C. P., Minarik T. A., Oskouie A. K. Endocrine disrupting alkylphenolic chemicals and other contaminants in wastewater treatment plant effluents, urban streams, and fish in the Great Lakes and Upper Mississippi River Regions // *Science of The Total Environment*. – 2015. – Vol. 517. – P. 195–206. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.035.
- Bhandari G., Bagheri A. R., Bhatt P., Bilal M. Occurrence, potential ecological risks, and degradation of endocrine disrupter, nonylphenol, from the aqueous environment // *Chemosphere*. – 2021. – Vol. 275, 130013. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.13
- Careghini A., Mastorgio A. F., Saponaro S., Sezenna E. Bisphenol A, nonylphenols, benzophenones, and benzotriazoles in soils, groundwater, surface water, sediments, and food: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2015. – Vol. 22. – P. 5711–5741. DOI: 10.1007/s11356-014-3974-5
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy // *Official Journal of the European Communities*. – L. 327 (1). – P. 1–72.
- Feng Y., Wang A., Fu W., Song D. F. Growth performance, antioxidant response, biodegradation and transcriptome analysis of *Chlorella pyrenoidosa* after nonylphenol exposure // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 806, N 150507. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150507.
- Gavriescu M., Demnerová K., Aamand J., Agathos S., Fava F. Emerging pollutants in the environment: Present and future challenges in biomonitoring, ecological risks and bioremediation // *New Biotechnology*. – 2015. – Vol. 32. – P. 147–156.
- Guo H., Liang Z., Zheng P., Li L., Xian J., Zhu X. Effects of nonylphenol exposure on histological changes, apoptosis and timecourse transcriptome in gills of white shrimp *Litopenaeus vannamei* // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 781, N 146731. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146731
- Ikunaga Y., Miyakawa S., Hasegawa M., Kasahara Y., Kodama O., Ohta H. Degradation profiles of branched nonylphenol isomers by *Sphingobium amiense* and *Sphingomonas cloacae* // *Soil Science and Plant Nutrition*. – 2004. – Vol. 50, N 6. – P. 871–875. DOI:10.1080/00380768.2004.10408548
- Ismanto A., Hadibarata T., Kristanti R. A., Maslukah L., Safinatunnajah N., Kusumastuti W. Endocrine disrupting chemicals (EDCs) in environmental matrices: Occurrence, fate, health impact, physio-chemical and bioremediation technology // *Environmental Pollution*. – 2022. – Vol. 302, N 119061. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119061
- Khalid M., Abdollahi M. Environmental Distribution of Personal Care Products and Their Effects on Human Health // *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*. – 2021. – Vol. 20, N 1. – P. 216–253. DOI: 10.22037/ijpr.2021.114891.15088.
- Krige N. R., Padgett P. J. Phenotypic and physiological characterization methods // *Methods in Microbiology* [Eds.: Rainey F., Oren A.]. – Academic Press, New York, 2011. – Vol. 38. – P. 15–60. DOI: 10.1016/B978-0-12-387730-7.00003-6
- Kuzikova I., Andronov E., Zaytseva T., Metelkova L., Zhakovskaya Z., Medvedeva N. A microcosm approach for evaluating the microbial nonylphenol and butyltin biodegradation and bacterial community shifts in co-contaminated bottom sediments from the Gulf of Finland, the Baltic Sea // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2022. – Vol. 46. – P. 69849–69860. DOI: 10.1007/s11356-022-20751-8
- Kuzikova I., Rybalchenko O., Kurashov E., Krylova Y., Safronova V., Medvedeva N. Defense Responses of the Marine-Derived Fungus *Aspergillus tubingensis* to Alkylphenols Stress // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2020. – Vol. 231, N 6. – P. 271. DOI: 10.1007/s11270-020-04639-2.
- Liu Y., Dai X., Wei J. Toxicity of the nonylphenol and its biodegradation by the alga *Cyclotella caspia* // *Journal of Environmental Science*. – 2013. – Vol. 25, N 8. – P. 1662–1671.
- Shao Y., Zhao W., Wei J., Wang S., Wang Y., Zhang Y. Growth and reproduction effects and transgenerational effects of nonylphenol in *Moina mongolica* Daday (Crustacea: Cladocera) // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 23. – P. 29221–29230. DOI:10.1007/s11356-021-12592-8
- Sole M., Lopez de Alda M. J., Castillo M., Porte C., Ladegaard-Pedersen K., Barcelo D. Estrogenicity determination in sewage treatment plants and surface waters from Catalanian area (NE Spain) // *Environmental Science & Technology*. – 2000. – Vol. 34. – P. 5076–5083. DOI: 10.1021/es991335n
- Suen J.-L., Hung C.-H., Yu H.-S., Huang S.-K. Alkylphenols—potential modulators of the allergic response // *Kaohsiung Journal of Medical Sciences*. – 2012. – Vol. 28, N 7. – P. 43–48.
- Watanabe W., Hori Y., Nishimura S., Takagi A., Kikuchi M., Sawai J. Bacterial degradation and reduction in the estrogen activity of 4-nonylphenol // *Biocontrol Science*. – 2012. – Vol. 17, N 3. – P. 143–147.
- Weisburg W. G., Barns S. M., Pelletier D. A., Lane D.J. 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study // *Journal of Bacteriology*. – 1991. – Vol. 173. – P. 697–703.
- Zaytseva T. B., Medvedeva N. G. Molecular mechanisms of the response to 4-tert-octylphenol-induced stress in a cyanobacterium *Planktothrix agardhii* // *Microbiology*. – 2019. – Vol. 88, N 4. – P. 416–422. DOI: 10.1134/S0026261719040143.

Zaytseva T.B., Russu A.D., Medvedeva N.G. Microbiological degradation of endocrine disrupting xenobiotics // *Ekosistemy*. 2022. Iss. 32. P. 52–59.

Pollution of environmental objects with endocrine disrupting xenobiotics, which negatively influence the endocrine system of animals and humans, is a significant environmental problem. Nonylphenol (NP) is one of the most common endocrine disruptors. The biotechnological methods using microorganisms, in particular bacteria, are the most environmentally friendly for the purification of natural ecosystems contaminated with this pollutant. The aim of this research was to isolate efficient nonylphenol-degrading bacterial strain from the NP-contaminated soil and to identify it. Moreover, the authors studied its NP-degrading capacity in water and soil. The strain 8 was identified by phenotypic features using standard methods and by Sanger sequencing of a fragment of the 16S rRNA gene sequence (*rrs*). The nonylphenol concentration was determined by high-performance liquid chromatography. A new bacterial strain *Lelliottia jeotgalis* 8 was isolated from sod-podzolic soil contaminated with nonylphenol. The high efficiency of the strain for NP degradation under aerobic conditions in the aquatic environment at various NP concentrations (50–300 mg/L) and in soil (100 mg/kg d.w.) was revealed. The present study demonstrates the ability of *L. jeotgalis* to degrade NP. The results of this study provide useful information for the application of *L. jeotgalis* 8 in the processes of bioremediation of ecosystems contaminated with endocrine disrupting xenobiotics.

Key words: endocrine disrupting xenobiotic nonylphenol; biodegradation; *Lelliottia jeotgalis* 8; identification.

Поступила в редакцию 15.11.22

Принята к печати 19.12.22

УДК 598.2(477.75)

Технологические приемы улучшения качества компоста, полученного из органических отходов мусороперерабатывающего завода

Ржевская В. С.^{1,2}, Минкина Т. М.², Крыжко А. В.³, Бурлуцкая Е. И.¹, Лисовенко Р. В.¹

¹ Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского
Симферополь, Россия
viktoriyar45@mail.ru

² Южный федеральный университет имени М. Д. Сеченова
Ростов-на-Дону, Россия
tminkina@mail.ru

³ Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма
Симферополь, Россия

Проведено сравнительное исследование технологических приемов и способов обработки (адсорбция поллютантов, микробная биоремедиация) компоста, полученного на мусороперерабатывающем заводе. Компост получали из органических отходов на мусороперерабатывающем заводе путем сепарации органических отходов от остального мусора и высушивания в биобарабане без дополнительного внесения микроорганизмов. Полученный указанным методом компост содержал тяжелые металлы, превышающих ПДК. Для микробной ремедиации использовали консорциум молочнокислых бактерий, дрожжей и мицелиальный гриб рода *Trichoderma*, а в качестве адсорбента тяжелых металлов – биочар. Микробный консорциум получали путем совместного культивирования молочнокислых бактерий и дрожжей в жидкой питательной среде MRS в лабораторном биореакторе. Биочар получали путём пиролиза из шелухи подсолнечника путём варьирования конечной температуры от 500 °С до 700 °С. Компост, полученный из органических отходов на мусороперерабатывающем заводе, полностью и гибировал всхожесть семян гороха сорта Мадонна, а семян ржи сорта Марусенька – на 52 %, а также задерживал их прорастание на 2 недели и снижал морфометрические показатели растений. Использование таких технологических приемов как внесение адсорбента поллютантов, так и микробного консорциума, в компост, полученный на МПЗ, снижает его токсическое воздействие на ростовые процессы растений. Эффективность использования микробного консорциума и биочара снижает его токсическое воздействие на ростовые процессы растений превышает таковую у каждого технологического приема в отдельности. Изучение фитостимулирующих свойств при внесении в компост микробного консорциума и биочара показало увеличение длины надземной части ржи сорта Марусенька на 14,9 % и 22,0 % по сравнению с компостом, полученным на мусороперерабатывающем заводе; а у растений гороха сорта Мадонна – снизило ингибирование длины надземной части в 1,5 раза. Использование компоста, обработанного микробным консорциумом или биочаром в качестве субстрата позволяет использовать компост в качестве субстрата для выращивания растений.

Ключевые слова: коммунальные бытовые отходы, переработка органических отходов, биоремедиация, адсорбция поллютантов, биочар, микробный консорциум, тяжелые металлы, органическое удобрение.

ВВЕДЕНИЕ

Переработка твердых коммунальных отходов (ТКО) имеет мировое значение, в том числе и для Российской Федерации (Васильев и др., 2014; Гомоницкая и др., 2015). В настоящее время одной из проблем мусороперерабатывающих предприятий России является то, что для вторичной переработки может быть использовано не более 20–25 % от общего объема ТКО, в состав которых входит органическая фракция. Около 80 % органических отходов захоранивают на полигонах, что приводит к загрязнению окружающей среды (Заболотских и др., 2016). Сортировка ТКО и выделение из них органической фракции, для дальнейшей ее переработки до состояния удобрения, улучшит экологическую обстановку и повысит эффективность, а также рентабельность мусороперерабатывающих заводов (МПЗ).

Согласно одной из технологий, органическая фракция ТКО после сепарации подвергается процессу компостирования в биотермических барабанах. Компостирование представляет собой биотермический процесс разложения органического вещества в

результате деятельности аборигенной аэробной сапрофитной микрофлоры. В процессе компостирования температура поднимается до 50–60 °С, что приводит к подавлению патогенной микрофлоры, яиц санотропных мух. Компостирование происходит с применением принудительной аэрации – для предотвращения процесса гниения и при постоянном перемешивании – для увеличения удельной поверхности и гомогенизации. В результате компостирования образуется рассыпчатая масса, внешне напоминающая почву. По физико-механическим, агрохимическим, токсикологическим, ветеринарно-санитарным и гигиеническим показателям удобрения должны соответствовать нормативу ГОСТ Р 55571 – 2013. Компост является хорошим удобрением, так как содержит минеральные и органические вещества. Однако, не на всех заводах в результате переработки органической фракции ТКО получается компост, соответствующий ГОСТ Р 55571 – 2013, из-за содержания в нём – стекла, полимерных материалов, тяжелых металлов (Заболотских и др., 2016).

Для улучшения состава компоста возможно использовать различные подходы – введение в компостируемую массу адсорбентов поллютантов, микробную биоремедиацию и другие. Одним из материалов, обладающим адсорбционными свойствами и используемым для ремедиации почв, фильтрационных систем и показавшим в последние десятилетия немало положительных эффектов, является биочар (Biederman et al., 2013; Ahmad et al., 2014; Cayuela et al., 2014).

Биочар (биоуголь) – высокопористый материал, обладающий большой площадью поверхности, что способствует повышенной сорбции поллютантов и снижению их мобильности в загрязненных почвах (Зерщикова и др., 2011). Биочар получают из биомассы различного происхождения (древесные опилки, органические отходы, навоз) с помощью пиролиза при температурах от 200 до 800 °С в условиях ограниченного присутствия кислорода (Kookana, 2010).

Активное внедрение биочара в практику сельского хозяйства привело к повышению качества сельскохозяйственных почв (Попова, 2019). Биочар улучшает структуру почвы за счет изменения объемной плотности и размера почвенных агрегатов. Также он задерживает в почве влагу, способствует накоплению элементов питания в доступных растениям формах (LeCroya et al., 2013; Xua et al., 2013; Григорьян, 2016; Зинченко, 2020).

Помимо применения в сельском хозяйстве, биочар имеет огромную перспективу в переводе отходов в состояние материалов для вторичного использования (Разумов, 2015). Благодаря таким свойствам биочара, как высокая пористость и большая площадь поверхности для адсорбции, он может адсорбировать различные поллютанты, находящиеся в органических отходах в большом количестве. Присущие биочару свойства: сокращать выбросы в окружающую среду закиси азота и метана, долговременно изымать значительную часть углерода из обменного резервуара (Sohi et al., 2010; Fischer et al., 2012), открывают широкую перспективу его применения в переработке отходов на МПЗ.

Использование микроорганизмов для обезвреживания и переработки промышленных и коммунальных отходов повышает уровень протеолитической и целлюлозоразрушающей активности почвы. Совместное внесение в почву промышленных органических отходов и микробных препаратов, активизирует микробный ценоз, расширяет видовой состав почвенной микрофлоры и ускоряет заселение высшими растениями. Также повышается приживаемость высаженных черенков древесных культур, многолетних трав, используемых для фиторемедиации (Водолеев, 2014; Черданцева, 2016).

Исследование новых подходов при совместном использовании биочара и микробного консорциума, для повышения фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органических отходов ТКО, является актуальным и требует дополнительных исследований (Gorovtsov, 2019).

Целью настоящей работы является выявление и оценка фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органической части твердых коммунальных отходов, а также подбор технологических приемов и способов его обработки для дальнейшего использования в качестве органического удобрения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом исследования является компост, полученный из органических отходов мусороперерабатывающего завода в г. Санкт-Петербург. Органические отходы, отделённые от остального мусора, помещали в биобарабан без дополнительного внесения микроорганизмов и без подогрева в течение 2 суток сушили при постоянном вращении барабана. В результате этого образовался компост – рыхлая сыпучая масса темно-серого цвета. Влажность компоста – 45 %, массовая доля стекла размером 3–5 мм – 10 %, 5–10 мм – 10 % и более 10 мм – 10 %. Содержание органического вещества – 35 % на сухое вещество, рН водной вытяжки – 6,2, индекс токсичности 74. Гибель дафний при разбавлении <100 – менее 10%. Острая токсичность: при в/ж введении вытяжки без разведения – LD₅₀>5000,0. У компоста отсутствует кожно-резорбтивное, сенсibiliзирующее действие, раздражающее действие на кожу и на слизистую оболочку глаз. Для оценки фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органической части ТКО и подбора способов его обработки, было заложено 2 серии опытов.

Схема опыта 1. Для проведения исследований по перспективности использования компоста, полученного из органических отходов, для посадки культурных растений или органического удобрения были использованы три варианта субстрата: компост, почвенная смесь и комбинация – компост с почвенной смесью в соотношении 1:1. Для определения всхожести и фитостимулирующей активности компоста, семена растений ржи и гороха высаживали в стаканы с субстратом по 30 штук. Полив растений проводили отстоянной водопроводной водой и однократно (за весь период опыта) внесённым 1 % микробным консорциумом молочнокислых бактерий и дрожжей (7 мл на один стакан почвы объемом 200 мл).

Схема опыта 2. В связи с тем, что компост, полученный из органических отходов на мусороперерабатывающем заводе, непригоден для прорастания семян для второго опыта в качестве контроля 1 использовали компост, однократно обработанный 1 % раствором микробного консорциума молочнокислых бактерий и дрожжей и выдержанный в течение одного месяца (табл. 1). В качестве контроля 2 использовали почвенную смесь. Для улучшения фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органических отходов, использовали по отдельности 2 компонента – микробный консорциум молочнокислых бактерий, дрожжей и грибы рода *Trichoderma* (варианты опыта 3, 4, 5), а также биочар (варианты 6-10).

Микробный консорциум включает: штаммы молочнокислых бактерий *L. casei* IMB В-7343, *L. plantarum* IMB В-7344, *L. lactis* IMB В-7352, дрожжи *S. cerevisiae* IMB Y-5046, мицелиальный гриб *Trichoderma asperellum* F-1527. Микроорганизмы депонированы в Депозитории института микробиологии и вирусологии НАН Украины (г. Киев) и Всероссийской коллекции промышленных штаммов микроорганизмов (г. Москва).

Микробный консорциум получали путем совместного культивирования молочнокислых бактерий и дрожжей в жидкой питательной среде MRS. Культивирование микроорганизмов проводили в биореакторе Minifors 2 объемом 4 л (Ifors HT, Швейцария) при температуре 32 °С и 50 об/мин в течение 3-х суток. Учет численности микроорганизмов в консорциуме проводили методом предельных разведений. Микробный консорциум содержал клетки микроорганизмов: *L. casei* IMB В-7343 – $6,2 \times 10^8$ КОЕ/мл, *L. plantarum* IMB В-7344 – $7,4 \times 10^8$ КОЕ/мл, *L. lactis* IMB В-7352 – $1,2 \times 10^9$ КОЕ/мл, *S. cerevisiae* IMB Y-5046 – $2,7 \times 10^6$ КОЕ/мл, метаболиты микроорганизмов, экскретированные в культуральную жидкость, неизрасходованные компоненты среды MRS.

Мицелиальный гриб культивировали на скошенном агаре Сабуро 14 суток, смыв провели стерильной дистиллированной водой. Смыв гриба, содержащего смесь спор и фрагментов мицелия ($1,7 \cdot 10^9$ КОЕ/мл), в количестве 1 мл вносили в 100 мл суспензии, содержащей микробный консорциум молочнокислых бактерий и дрожжей.

Таблица 1

Схема опыта 2

№ варианта опыта	Варианты опыта		
	Варианты субстрата	Полив	
1	Контроль 1 (компост)	Вода	
2	Контроль 2 (почва)	Вода	
3	Внесение микробного консорциума в компост (далее по тексту, компост МК)	Компост МК	Вода
4		Компост МК : почва (1:5)	Вода
5		Компост МК : почва (1:10)	Вода
6	Внесение биочара в компост (далее по тексту, компост Б)	Компост Б	Вода
7		Компост Б : почва (1:5)	Вода
8			МК
9		Компост Б : почва (1:10)	Вода
10			МК

Для обработки компоста, полученного из органических отходов, вносили на 1 кг компоста, 1 мл микробного консорциума молочнокислых бактерий, дрожжей и гриба *T. asperellum* F-1527. Влажность субстрата доводили до 70 % и выдерживали в течение 4 месяцев. В опыте использовали компост, обработанный микробным консорциумом в качестве субстрата (вариант 3) и в смеси с почвой в соотношении 1:5 (вариант 4) и 1:10 (вариант 5). Полив вариантов 3–5 проводили отстоянной водопроводной водой.

Биочар получен из шелухи подсолнечника путём пиролиза на кафедре почвоведения и земельных ресурсов ЮФУ. Для этого 100 г сырья засыпали в толстостенный сосуд из нержавеющей стали с герметичной крышкой (реторту). Реторту помещали в лабораторную муфельную печь. Далее, путём варьирования конечной температуры от 500 °С до 700 °С, скорость нагрева 3–15 °С/мин и времени обработки от 10 до 45 минут было получено несколько образцов биочара. Выход биочара составил 34 % (Sushkova et al., 2021). Определение удельной площади поверхности и пористости образцов было выполнено на волюметрическом анализаторе ASAP 2020 Micromeritics по методу низкотемпературной адсорбции азота. Расчёт параметров пористости и поверхности осуществлялся методом БЭТ по N₂ в диапазоне равновесных значений P/P₀ = 0,05–0,33.

Биочар вносили в компост, полученный из органических отходов мусороперерабатывающего завода, в количестве 10 г на 1 кг компоста.

В опыте в качестве субстрата использовали компост, с внесением биочаром (вариант 6) и в смеси с почвой в соотношении 1:5 (вариант 7 и 8) и 1:10 (вариант 9 и 10). Полив вариантов 7 и 9 проводили отстоянной водопроводной водой, а вариантов 8 и 10–0,1% микробным консорциумом молочнокислых бактерий и дрожжей. Полив растений проводили до увлажнения почвенного комка.

Эффективность внесения биочара и микробного консорциума изучали с помощью фитотестирования в лабораторных условиях. В качестве тест объектов использовали семена однодольных и двудольных растений – рожь сорта Марусенька и горох сорта Мадонна. Ростовые процессы растений изучали на ранних этапах развития (до 1 мес.) в вегетационных опытах. Всхожесть семян учитывали на 14-е сутки. Длину надземной части измеряли

линейкой с шагом 0,05 см с 14 по 28 сутки с периодичностью 7 дней. Ростовые показатели растений выражали в процентах к контролю (Грицаенко, 2003).

Все опыты проводили в трехкратной повторности. Статистическую обработку данных проводили по стандартным методикам (Trukhacheva, 2012), а также с использованием программы Microsoft Excel® 2016. Полученные результаты представлены на рисунках и в таблице в виде средней арифметической величины со стандартной ошибкой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Компост, полученный из органических отходов мусороперерабатывающего завода, представляет собой комплекс различных химических элементов, которые могут служить как источник питания для растений, так и быть токсичными для растений. Было проведено сравнение содержания металлов в компосте с данными нормативных документов (табл. 2).

Таблица 2

Токсикологический показатель в компосте, полученном на мусороперерабатывающем заводе и нормативных документах

Наименование показателя	Массовая доля примесей токсичных элементов (валовое содержание), мг/кг сухого вещества, не более *	Величина ОДК (мг/кг) почвы с учетом фона (кларк), валовая форма **		Массовая доля примесей токсичных элементов в компосте, полученном на МПЗ, мг/кг	
		pH<5.5	pH>5.5	Валовая форма	Подвижная форма
Кадмий	5,0	1,0	2,0	5,0	-
Медь	300,0	66,0	132,0	300,0	50,0
Никель	100,0	40,0	80,0	80,0	4,0
Свинец	200,0	65,0	130,0	130,0	50,0
Цинк	500,0	110,0	220,0	1300,0	500,0
Ртуть	10,0	-	-	2,1	-
Мышьяк	10,0	5,0	10,0	2,0	-
Марганец	-	-	-	1500,0	100,0–500,0
Хром	300,0	-	-	50,0	6,0
Кобальт	-	-	-	-	5,0

Примечание к таблице. * – нормы по токсикологическому показателю (ГОСТ Р 55571-2013); ** – ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов в почве, утвержденные ГК, СЕН, РФ, 27.12.1994 пр. № 12.

Валовое содержание в компосте кадмия и меди выражается верхним значением ПДК токсических элементов в удобрениях органических на основе твердых бытовых отходов (ГОСТ Р 55571-2013), а цинка – превышает его в 2,6 раза. Содержащиеся в компосте валовые формы кадмия, меди и цинка превышают ориентировочно-допустимые концентрации тяжелых металлов в почве. Внесение в почву компоста, загрязнённого тяжелыми металлами, может привести к дестабилизации аборигенной микрофлоры и растений.

Изучение фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органических отходов на МПЗ, показало ингибирование процесса прорастания семян культурных растений. Так, в результате посева семян растений в компост, наблюдалось полное отсутствие прорастания

семян гороха сорта Мадонна и 48 % всхожести семян ржи с запозданием на 2 недели по сравнению с контролем (почва), а в варианте смеси компоста и почвы отмечено снижение морфометрических показателей проростков (табл. 3). Можно предположить, что отсутствие и снижение всхожести семян тест-растений, и ингибирование морфометрического показателя по сравнению с контролем, вызвано наличием тяжелых металлов.

Таблица 3

Оценка фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органических отходов на мусороперерабатывающем заводе

Субстрат	Всхожесть семян, %		Длина надземной части тест – растений, %	
	Рожь, сорт Марусенька	Горох, сорт Мадонна	Рожь, сорт Марусенька	Горох, сорт Мадонна
Компост	48	-	-	-
Контроль (почва)	85	73	100,00	100,00
Компост : почва (1:1)	54	46	95,67	60,71

Изучение влияния микробного консорциума на всхожесть семян ржи сорта Марусенька показало, что при использовании компоста, обработанного микробным консорциумом (компост МК) в качестве субстрата всхожесть увеличилась на 20 % по сравнению с контролем 1, а смесь компоста МК и почвы в соотношениях 1:5 и 1:10 – на 45–47 % соответственно (рис. 1). У растений гороха сорта Мадонна, использование смеси компоста МК и почвы в соотношениях 1:5 и 1:10, увеличило всхожесть семян на 38–50 % по сравнению с контролем 1. При использовании биочара отмечена аналогичная тенденция – смесь компоста с внесением биочара (компост Б) и почвы, независимо от соотношения, увеличило всхожесть семян ржи сорта Марусенька на 57–59 % по сравнению с контролем 1, а гороха сорта Мадонна – на 33–38 %. Данные показатели свидетельствуют о том, что такие технологические приемы, как микробная ремедиация консорциумом молочнокислых бактерий, дрожжей, мицелиальным грибом и адсорбирование тяжелых металлов биочаром, позволяют компосту, полученному из органических остатков МПЗ, иметь показатели всхожести семян, не имеющие достоверных отличий по сравнению с почвой (контролем 2).

Ингибирующее действие компоста, полученного из органических отходов, более ярко проявлялось на ранних этапах развития растений, но по мере их роста - становилось менее выраженным. Так, на 14 сутки компост (контроль 1) ингибировал рост надземной части на 53,08 % по сравнению с контролем 2 (почва), на 21 сутки – на 29,17 %, а на 28 – 13,5% (табл. 4). На 14 сутки, в результате внесения в компост микробного консорциума и биочара, не отмечено достоверных отличий по сравнению с контролем 1. На 28 сутки, наблюдалось увеличение длины надземной части ржи сорта Марусенька, в варианте внесения микробного консорциума на 14,9 % по сравнению с контролем 1, а в варианте с биочаром (6 вариант) – на 22,0 % (рис. 2). В результате внесения в компост как биочара, так и микробного консорциума, достоверных отличий по сравнению с почвой (контроль 2) не отмечено. Отсутствие достоверных отличий контроля 2 (почвы) и компоста, подвергнутого микробной ремедиации или внесению адсорбента, говорит об эффективности применённых технологических приемов для улучшения фитостимулирующих свойств компоста, получаемого на МПЗ и возможности его использования для культивирования растений.

При использовании в качестве субстрата смеси, обработанного микробным консорциумом компоста с почвой в соотношениях 1:5 и 1:10 (варианты 4 и 5), длина надземной части ржи сорта Марусенька на 28 сутки, не имела достоверных отличий с контролем 2 (рис. 2). В вариантах 6, 7, 9, с применением биочара для снижения токсичности

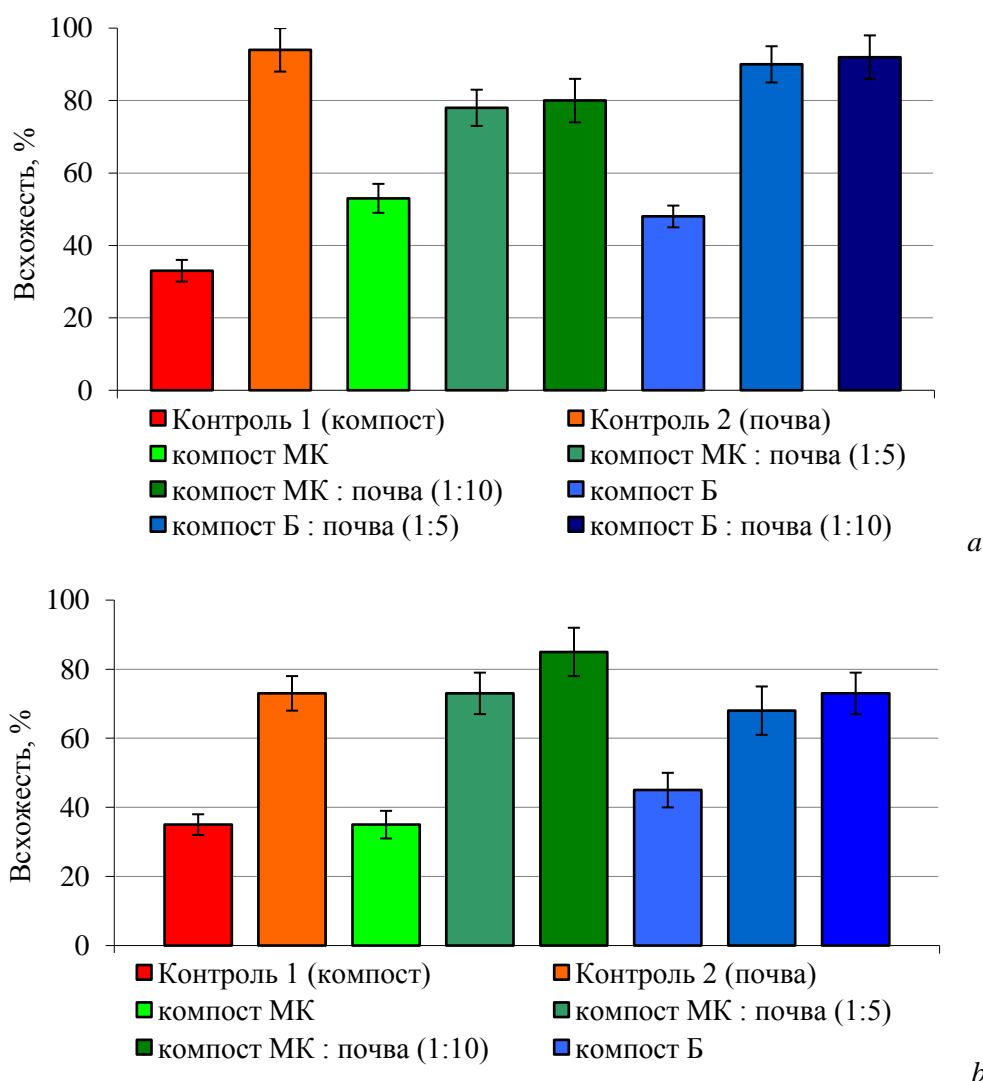


Рис. 1. Всхожесть семян ржи сорта Марусенька (а) и гороха посевного сорта Мадонна (б) в компосте, с различными вариантами внесения микробного консорциума и биочара

компоста при поливе растений ржи сорта Марусенька водой, также получены не достоверные отличия с контролем 2. В вариантах опыта 8 и 10, при поливе растений ржи сорта Марусенька микробным консорциумом, отмечена стимуляция роста надземной части на 6,8–30,7 % по сравнению с контролем 2 и на 23,4–51,1 % по сравнению с контролем 1. Таким образом, компост, подвергнутый микробной ремедиации или внесению адсорбента, можно использовать как в чистом виде, так и в смеси с почвой. Использование этих двух подходов совместно дает наибольший эффект, нежели каждого в отдельности.

Токсическое действие компоста (вариант 1) на длину надземной части гороха сорта Мадонна более выражено, чем в случае ржи. Чем меньше срок развития растения, тем больше проявляется токсическое действие компоста: на 14 сутки компост ингибировал рост надземной части на 83,05 % по сравнению с контролем 2, на 21 сутки – на 45,4 %, а на 28–43,7 % (табл. 5).

Компост МК (вариант 3), в качестве субстрата для посева семян, стимулировал длину рост надземной части растений гороха сорта Мадонна на 28 сутки на 50,0 %, а компост б – на 52,9 % по сравнению с контролем 1 (рис. 3). При использовании в качестве субстрата смеси

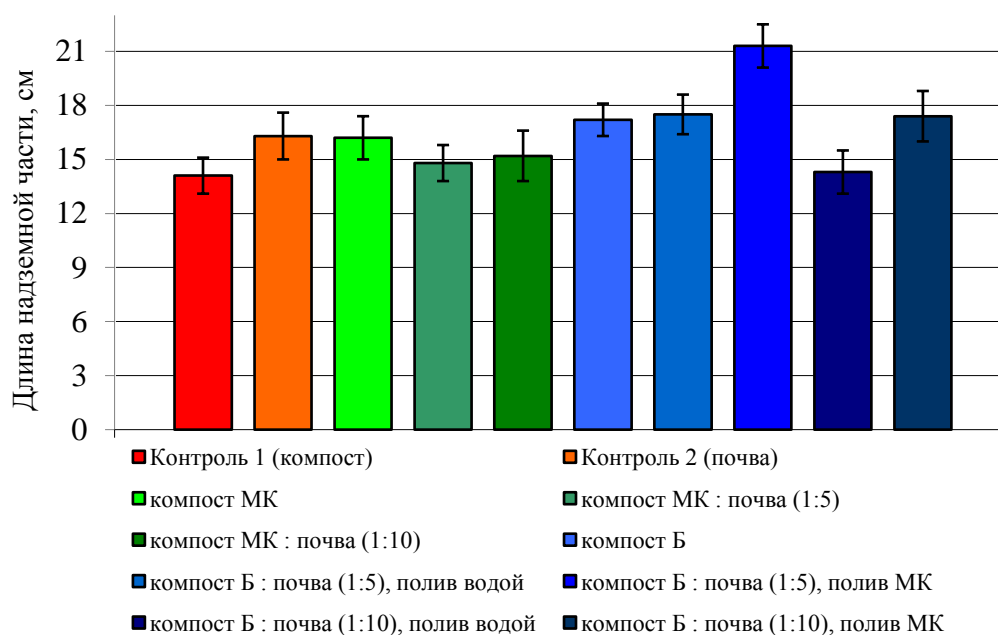


Рис. 2. Длина надземной части ржи сорта Марусенька на 28 сутки в компосте, с различными вариантами внесения микробного консорциума и биочара

Таблица 4

Влияние внесения микробного консорциума и биочара в компост, полученный из органических отходов, на длину надземной части ржи сорта Марусенька

Варианты опыта			Длина надземной части растений, см			
Варианты субстрата		Полив	№ варианта опыта	14 сутки	21 сутки	28 сутки
Контроль 1 (компост)		Вода	1	6,1±0,2	10,2±0,6	14,1±1,1
Контроль 2 (почва)		Вода	2	13,0±0,5	14,4±0,9	16,3±1,3
Внесение микробного консорциума в компост	Вода	Вода	3	7±0,4	13±0,9	16,2±1,2
	Вода	Вода	4	12±0,5	13,5±1,0	14,8±1,0
	Вода	Вода	5	11±0,5	14,7±0,8	15,2±1,4
Внесение биочара в компост	Компост Б	Вода	6	7±0,3	12±0,9	17,2±0,9
	Компост Б : почва (1:5)	Вода	7	14±0,6	16±1,0	17,5±1,1
		МК	8	14,5±0,5	17±1,1	21,3±1,2
	Компост Б : почва (1:10)	Вода	9	12±0,4	13±0,8	14,3±1,2
МК		10	12±0,3	15±0,7	17,4±1,4	

Таблица 5

Влияние внесения микробного консорциума и биочара в компост, полученный из органических отходов, на длину надземной части гороха посевного сорта Мадонна

Субстрат		Полив	№ варианта опыта	Длина надземной части растений, см		
				14 сутки	21 сутки	28 сутки
Контроль 1 (компост)		Вода	1	1,0±0,2	8,3±0,6	10,2±1,2
Контроль 2 (почва)		Вода	2	5,9±0,5	15,2±0,8	18,1±1,4
Внесение микробного консорциума в компост	Вода	Вода	3	2,1±0,7	13,4±0,6	15,3±1,5
	Вода	Вода	4	5,0±0,7	14,1±0,5	20,2±1,4
	Вода	Вода	5	4,5±1,0	17,2±0,7	20,4±1,2
Внесение биочара в компост	Вода	Вода	6	1,5±0,6	13,4±0,6	15,6±1,4
	Вода	Вода	7	2,2±0,6	14,3±0,5	16,3±1,5
		МК	8	6,3±0,9	17,2±0,8	19,6±1,2
	Компост Б : почва (1:10)	Вода	9	4,0±1,1	17,5±0,7	20,2±0,9
МК		10	5,1±0,5	17,9±0,6	21,3±1,3	

почвы и компоста МК в соотношении 1:5 и 1:10 (вариант 4 и 5), отмечена стимуляция длины роста надземной части растений гороха сорта Мадонна в 2 раза, по сравнению с контролем 1. В вариантах обработки микробным консорциумом компоста и использования его в качестве субстрата в чистом виде или смеси с почвой в отношениях 1:5 и 1:10, по сравнению с контролем 2 – не выявлено достоверных отличий. Аналогичная тенденция отмечена и при использовании внесении в компост биочара.

В результате проведенных исследований показано, что у растений гороха сорта Мадонна и биочара, и микробный консорциум снижают токсическое действие компоста, полученного на МПЗ в равной мере. Причем, использование компоста Б и компоста МК в качестве субстрата, снизило ингибирование длины надземной части гороха сорта Мадонна в 1,5 раза, а при смешивании их с почвой – в 2 раза. Таким образом, такие технологические приемы, как микробная ремедиация и внесение адсорбента поллютантов в компост, полученный на МПЗ, снижают его токсическое воздействие на ростовые процессы растений и позволяют использовать его в смеси с почвой в качестве субстрата для растений.

В результате проведенных нами исследований показано, что использование адсорбента поллютантов – биочара и микробного консорциума молочнокислых бактерий, дрожжей и грибов рода Триходерма, приводит к улучшению свойств компоста, полученного из органических отходов МПЗ. Данный компост по физико-химическим и санитарно-микробиологическим показателям, соответствует нормативным документам и только валовое содержание некоторых тяжелых металлов находилось на максимальном значении ПДК или превышало его. Стимуляция ростовых процессов растений при внесении биочара в компост, вероятно обусловлена именно снижением токсичности тяжелых металлов (Соколик, 2020) в компосте. Благодаря большой площади поверхности и высокой пористости, биочар эффективно адсорбирует различные типы органических и неорганических веществ, а также токсические элементы (Herath et al., 2016).

Известно, что металлы необходимы для жизнедеятельности микроорганизмов в качестве микроэлементов (Евдокимова и др., 1991; Колесников, 2012; Переломов и др., 2013). Многие микроорганизмы (бактерии, грибы, дрожжи), могут эффективно противостоять

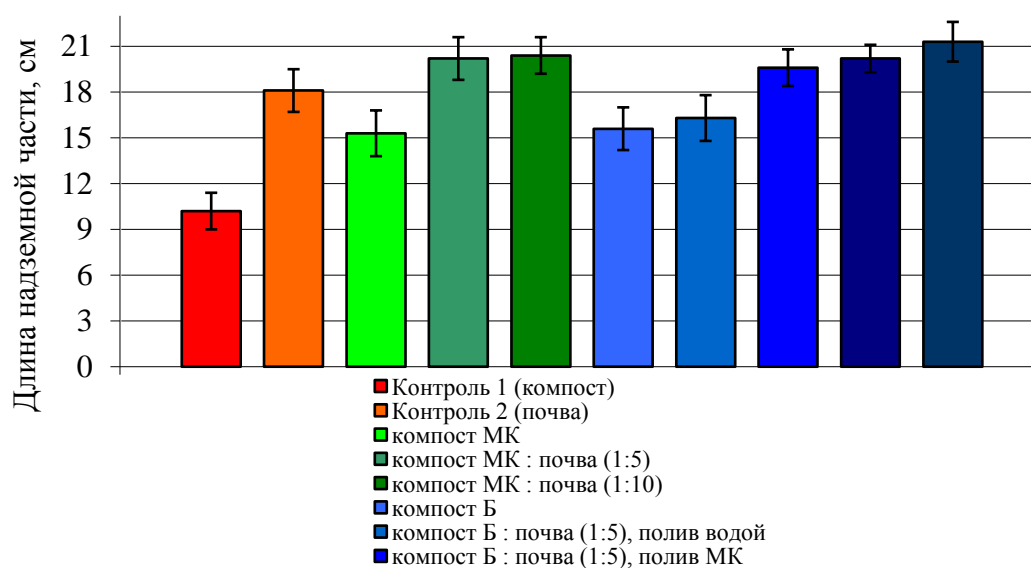


Рис. 3. Длина надземной части гороха посевного сорта Мадонна на 28 сутки в компосте, с различными вариантами внесения микробного консорциума и биочара

токсическому действию и удалять тяжёлые металлы из окружающей среды за счет включения поллютантов в процесс своего метаболизма или перевода их в инертную форму (Фокина и др., 2008).

При сравнении влияния компоста, обработанного микробным консорциумом и биочаром, показано, что используемые нами тест-растения – рожь сорта Марусенька, относящаяся к классу Однодольных и горох сорта Мадонна, относящийся к классу Двудольных, по-разному реагировали на два используемых технологических приема. Так, токсическое действие компоста, полученного на МПЗ, на 28 сутки эксперимента у растений ржи сорта Марусенька, вызвало ингибирование длины надземной части на 14,2 %, а у гороха сорта Мадонна – на 77,5 % по сравнению с контролем 2 (почвой). Снижение токсического действия используемыми технологическими приемами было аналогичное – у растений ржи сорта Марусенька отмечено увеличение длины надземной части при внесении в компост микробного консорциума и биочара на 14,9 % и 22,0 % по сравнению с компостом, полученном на заводе, а у гороха сорта Мадонна на 50,0 и 52,9 % соответственно.

Для растений ржи сорта Марусенька в качестве субстрата можно использовать компосты, полученные обоими технологическими приемами как в чистом виде, так и в смеси с почвой (при поливе водой), в то время как у растений гороха сорта Мадонна наибольший стимулирующий эффект достигнут при использовании компостов не в чистом виде, а именно в смеси с почвой.

В результате наших исследований показано, что токсическое действие компоста, полученного на МПЗ, у ржи сорта Марусенька эффективнее снижал биочар, чем микробный консорциум, а на растениях гороха сорта Мадонна эффективность обоих приемов была одинакова. При этом, для растений ржи сорта Марусенька максимальный стимулирующий эффект отмечен при использовании двух приемов одновременно, нежели каждого в отдельности, а у растений гороха сорта Мадонна эта закономерность отмечена только при использовании в качестве субстрата смеси компоста с биочаром и почвы в отношении 1:10.

Комплексное использование биочара и микробного консорциума, более эффективно в силу взаимного усиления положительных качеств каждого. Аналогичные данные получены также при изучении активности нитрификации почв (Зинченко, 2020). Решение о совместном использовании биочара с микробным консорциумом для детоксикации отходов мусороперерабатывающих заводов, требует дополнительных данных и исследований, включающих в себя определение объема материальных затрат, направленных на

необходимость внесения ряда изменений в технологию компостирования на МПЗ и выявления экономической результативности описанных способов применяемых при вторичном использовании переработанных отходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что компост, полученный из органических отходов на мусороперерабатывающем заводе, ингибирует прорастание семян и морфометрические показатели проростков. Токсичное действие компоста более ярко проявлялось на ранних этапах развития растений.

Показано, что внесение в компост биочара и микробного консорциума повышают всхожесть семян гороха сорта Мадонна и ржи сорта Марусенька. Максимальный эффект влияния биочара и микробного консорциума на увеличение всхожести семян –50 % отмечен при смешивании компоста с почвой в соотношениях 1:5 и 1:10.

Отмечено увеличение длины надземной части ржи сорта Марусенька при внесении в компост микробного консорциума и биочара на 14,9 % и 22,0 % по сравнению с компостом, полученном на заводе, а при совместном использовании адсорбента и микроорганизмов – на 23,4–51,1 %. На растениях ржи сорта Марусенька максимальное снижение токсического действия компоста и стимуляция ростовых процессов растений отмечена при совместном использовании биочара и микробного консорциума, что свидетельствует о проявлении синергического эффекта двух технологических приемов.

Выявлено, что у растений гороха сорта Мадонна биочар и микробный консорциум снижают токсическое действие компоста, полученного на МПЗ эффективно в равной мере. Наибольший эффект стимуляции надземной части растений гороха сорта Мадонна в 2 раза достигнут при использовании в качестве субстрата компостов, обработанных микробным консорциумом и биочаром именно в смеси с почвой в отношении 1:10, а не в чистом виде.

Таким образом, совместное использование биочара и микробного консорциума снижает токсическое действие компоста, полученного из органических отходов мусороперерабатывающего завода, и может быть рекомендовано для использования их в технологических процессах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по поддержке молодежной лаборатории «Агробиотехнологии для повышения плодородия почв и качества сельскохозяйственной продукции» в рамках программы развития межрегионального научно-образовательного центра Юга России (№ ЛабНОЦ-21-01АБ).

Список литературы

- Васильев А. В. Комплексный экологический мониторинг как фактор обеспечения экологической безопасности // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10, № 2. – С. 23.
- Водолеев А. С., Черданцева Е. С., Куренский И. А. Обезвреживание промышленных отходов с использованием почвенных микроорганизмов и высших растений // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – № 2 (8). – С. 51–54.
- Гомоницкая А. О., Заболотских В. В., Нагайцева М. П. Внедрение дуальной системы сбора ТБО в г. Тольятти: проблемы и перспективы // материалы IX Международной научно-практической конференции «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». – 2015. – С. 5–8.
- ГОСТ Р 55571 – 2013. Удобрения органические на основе твердых бытовых отходов. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2014. – С. 14.
- 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 Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19, №. 11. – С. 185–189.
- Грицаенко З. М., Грицаенко А. О., Карпенко А. О. Методы биологических и агрохимических исследований растений и почв. – К.: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. – 320 с.

- Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П. Аккумуляция меди и никеля почвенными грибами // *Микробиология*. – 1991. – Т. 60, № 5. – С. 801–807.
- Заболотских В. В., Гомоницкая А. С., Кутмина С. В. Технологические приемы улучшения качества компоста, получаемого из органических отходов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2016. – Т. 18, № 5 (3). – С. 437–445.
- Зерщикова М. А. Последствия загрязнения окружающей среды и их влияние на экономические показатели (методы сохранения и улучшения состояния окружающей среды) // *Инженерный Вестник Дона*. – 2011. – № 1. – С. 65–77.
- Зинченко В. В., Погоньшев П. Д., Антоненко С. А., Федоренко Е. С., Лобзенко И. П., Горовцов А. В., Минкина Т. М., Сушкова С. Н. Биологическая активность лугово-черноземной почвы на фоне внесения биочара // *Материалы международного научного семинара «Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почву, растения и окружающую среду» ФГБНУ АФИ (Санкт-Петербург, Россия, 08 декабря 2020 г.)*. – 2020. – С. 35–38.
- Колесников О. В. Влияние ксенобиотиков и тяжелых металлов на систему микроорганизм-растение: автореф. дис... канд. биол. наук. – Москва, 2012. – 23 с.
- Переломов Л. В., Чулин А. Н. Молекулярные механизмы взаимодействия микроорганизмов и микроэлементов в окружающей среде. Прямая биологическая трансформация соединений микроэлементов // *Успехи современной биологии*. – 2013. – Т. 133. – № 5. – С. 452–470.
- Попова А. Д., Семаль В. А., Брикманс А. В., Нестерова О. В., Колесникова Ю. А., Бовсун М. А. Применение биоугля как мелиоранта и его влияние на изменение физических свойств агропочв юга Приморского края // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2019. – № 6. – С. 57–63.
- Разумов Е. Ю. Биоуголь: современное представление // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 220–222.
- Соколик Г. А., Овсянникова С. В., Попеня М. В. Влияние биоугля на определяющие подвижность в почвах формы нахождения кадмия, свинца и урана // *Материалы международного научного семинара «Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почву, растения и окружающую среду» ФГБНУ АФИ (Санкт-Петербург, Россия 08 декабря 2020 г.)*. – С. 86–90.
- Фокина А. И., Домрачева Л. И., Широких И. Г., Кондакова Л. В., Огородникова С. Ю. Микробная детоксикация тяжелых металлов (литературный обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2008. – № 1. – С. 4–10.
- Черданцева Е. С., Гаврилова О. В. Использование микроорганизмов при утилизации промышленных и бытовых отходов // *Научно-исследовательские публикации*. – 2016. – № 1 (33). – С. 66–69.
- Ahmad M., Rajapaksha A. U., Lim J. E., Zhang M., Bolan N., Mohan D., Vithanage M., Lee S. S., Ok Y.S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review // *Chemosphere*. – 2014. – Vol. 99. – P. 19–23. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071
- Biederman L. A., Stanley Harpole W. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis // *GCB Bioenergy*. – 2013. – Vol. 5. – P. 202–214. doi:10.1111/gcbb.12037
- Cayuela M. L., Zwieter L., Singh B. P., Jeffery S., Roig A., Sanchez-Monedero M.A. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2014. – Vol. 191. – P. 5–16. doi: 10.1016/j.agee.2013.10.009
- Fischer D., Glaser B. Synergisms between Compost and Biochar for Sustainable Soil Amelioration // *Management of Organic Waste*. – 2012. – P. 167–198. DOI:10.5772/31200
- Gorovtsov A. V., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Perelomov L. V., Soja G., Zamulina I. V., Yao J. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2019. – P. 1–24.
- Kookana R. S. The role of biochar in modifying the environmental fate, bioavailability, and efficacy of pesticides in soils: A review // *Australian Journal of Soil Research*. – 2010. – Vol. 48. – P. 627–637. doi:10.1071/SR10007
- LeCroya C., Masiello C. A., Rudgers J. A., Hockaday W. C., Silberg J. J. Nitrogen, biochar, and mycorrhizae: Alteration of the symbiosis and oxidation of the char surface // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2013. – Vol. 58. – P. 248–254.
- Sohi S., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R. A review of biochar and its use and function in soil // *Advances in Agronomy*. – 2010. – Vol. 105. P. 47–82.
- Sushkova S., Minkina T., Dudnikova T., Barbashev A., Popov Yu., Rajput V., Bauer T., Nazarenko O., Kızılkaya R. Reduced plant uptake of PAHs from soil amended with sunflower husk biochar // *Eurasian Journal of Soil Science*. – 2021. – P. 10. <https://doi.org/10.18393/ejss.935397>
- Trukhacheva N. Mathematical statistics in biomedical research using the Statistica package. – М.: GEOTAR-Media, 2012. – 379 p.
- Xu G., Wei L. L., Sun J. N., Chang S. X. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism? // *Ecological Engineering*. – 2013. – Vol. 52. – 119–124.

Rzhevskaya V. S., Minkina T. M., Kryzhko A. V., Burlutskaya E. I., Lisovenko R. V. Technological methods to improve the quality of compost at a waste processing plant // Ekosistemy. 2022. Iss. 32. P. 60–72.

A comparative study of technological methods and treatments (pollutant adsorption, microbial bioremediation) of compost produced at the waste processing plant was conducted. Compost was produced from organic waste by separating the organic waste from the rest of the rubbish and drying it in a drum-like drier without the addition of microorganisms. The compost obtained by this method contained heavy metals exceeding the maximum permissible concentration. For microbial remediation, a consortium of lactic acid bacteria, yeasts and mycelial fungus of the genus *Trichoderma* was used, while biochar was used as an adsorbent for heavy metals. The microbial consortium was produced by co-culturing lactic acid bacteria and yeast in liquid MRS nutrient medium in a laboratory bioreactor. Biochar was produced by pyrolysis from sunflower husks by varying the final temperature from 500 °C to 700 °C. The compost obtained from organic waste at the waste processing plant completely inhibited the germination of pea seeds of Madonna variety and rye seeds of Marusenka variety by 52 %, and also delayed their germination by 2 weeks and reduced the morphometric indices of the plants. The use of such technological methods as the introduction of pollutant adsorbent and microbial consortium into the compost produced at the waste processing plant reduces its toxic effects on the growth processes. Complex use of the microbial consortium and biochar reduces its toxic effects on plant growth processes more than each technological method separately. The study of phytostimulating properties of biochar enriched with microbial consortium showed a 14.9 % and 22.0 % increase in length of aboveground parts of Marusenka rye variety compared to compost. In pea plants of the Madonna variety, inhibition of the length of the aboveground part decreased by 1.5 times. The use of compost treated with microbial consortium or biochar allows the product to be used as a substrate for growing plants.

Key words: municipal waste, organic waste recycling, bioremediation, pollutant adsorption, biochar, microbial consortium, heavy metals, organic fertilizer.

Поступила в редакцию 17.11.22

Принята к печати 19.12.22

УДК 594.1:574.625(262.5)

***Cerastoderma glaucum* (Bruguiere, 1789) (Cardiidae) – малоизученный вид двустворчатых моллюсков Черного моря: распространение и некоторые аспекты биологии и физиологии. Обзор**

Щербань С. А., Макаров М. В., Мельник А. В.

Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН

Севастополь, Россия

Shcherbansa@yandex.ru, mihaliksevast@inbox.ru, melnikalexsand@gmail.com

Представлен обзор литературных данных за последние 30–40 лет по встречаемости, численности, биомассе и некоторым вопросам биологии и физиологии малоизученного двустворчатого моллюска *Cerastoderma glaucum* (Bruguiere, 1789), обитающего в прибрежных биоценозах и в различных частях акватории Черного моря. Вид обитает на различных глубинах – от 0,1 до 40 м, преимущественно на рыхлых грунтах и больше характерен для бухтовых акваторий с пониженным водообменом. Собственный локальный биоценоз *C. glaucum* образует редко, чаще являясь субдоминантом в сообществах с двустворчатыми моллюсками рода *Abra* – *A. segmentum*, а также с *Spisula subtruncata*, *Mytilus galloprovincialis* и *Chamelea gallina*. Относительный вклад *C. glaucum* в биоценотическое сходство внутри районов исследований может составлять от 8 до 21 %. По имеющимся в литературе данным по величинам биомасс и численности моллюска, можно констатировать, что диапазоны этих величин довольно широки и составляют от нескольких десятков до сотен и даже тысячи единиц (экз./м² и г/м²). В Северо-Западной части моря (Приднепровско-Бугский район) на глубинах 1–17 м, в период с 1988 по 2000 годы, средняя численность моллюска достигала максимума в 2025 экз./м², биомасса – 86,7 г/м²; у побережья Западного Крыма на таких же глубинах, в 1993–1995 годы, эти показатели были еще выше (3092 экз./м² и 115 г/м²). В акваториях бухт Севастополя максимальная численность отмечена в бухте Казачья – от 353 до 500 экз./м² при биомассе до 128 г/м² (вид доминировал здесь и по биомассе среди всех моллюсков – 54 %). В отдельные периоды с 2011 по 2020 годы церастодерма неоднократно преобладала по биомассе (в среднем 73,5 г/м²), с максимумом в 3475 г/м² среди двустворчатых моллюсков в эстуарии реки Черная. Несмотря на довольно большое число работ, в которых упоминается вид, он, по-прежнему, остается слабоизученным как в отношении популяционных характеристик, так и по показателям жизнедеятельности, причем, как в условиях естественного обитания, так и при создании заданных условий в экспериментальных средах.

Ключевые слова: бухты, биоценозы, встречаемость, численность, биомасса, размерный состав, морфология, размножение.

ВВЕДЕНИЕ

Cerastoderma glaucum (Bruguiere, 1789) (церастодерма, сердцевидка) – двустворчатый моллюск средиземноморского происхождения. Обнаружен в Черном море и описан еще в 40-х годах прошлого столетия (Арнольди, 1949). Входит в уже устоявшиеся донные фаунистические комплексы. Основной массив данных по виду в Черноморском регионе (в глубоководных участках и акваториях Крымского побережья) получен с 1980-х по 2005 годы, по бухтам Севастополя – с 1970-х годов и до настоящего времени. Хорошо изученным районом распространения вида можно назвать Северо-Западную часть моря и Западную часть побережья Крыма. Эпизодически описан в районах Южного и Юго-Восточного Крыма и у берегов Кавказа. В исследованиях этих лет приводятся данные по численности и биомассе церастодермы (в отдельных случаях величины индексов плотности) и оценивается относительная роль вида в биоценотическое сходство внутри районов исследований (Петров, Алемов, 1993; Ревков и др., 2002; Стадниченко, Золотарев, 2009; Алемов, 2021 и др.).

Несмотря на довольно значительный список работ, в которых упоминается вид, он, по-прежнему, остается относительно слабоизученным как в отношении популяционных характеристик, так и по показателям функциональности его жизнедеятельности (причем как в условиях естественного обитания, так и при создании заданных условий в экспериментальных средах). Отсутствие за последние несколько десятилетий информации о

запасах и годовых приростах, популяционных характеристиках, репродуктивных возможностях и особенностях роста на рыхлых грунтах черноморской бентали не позволяет говорить о его достаточной изученности. В последние несколько лет, однако, интерес к виду возрос и стали появляться работы по особенностям морфологии жаберного аппарата, тканевого соматического роста, химического состава и адаптации к некоторым стрессовым факторам (Тимофеев, 2016; Бородина, Задорожный, 2020а, 2020б; Гостюхина, Андреевко, 2020; Gostuykhina, 2020).

Цель работы – обзор литературных данных по распространению, некоторым аспектам биологии и физиологии, а также методам исследований моллюска *Cerastoderma glaucum* в Черном море за последние 30–40 лет.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования церастодермы (рис. 1), проанализированные в данном обзоре, проводились в разные годы в различных районах Черного моря и бухтах Севастополя в ходе прибрежных экспедиций и отчасти в рейсах. Значительное количество бентосных проб было взято в северо-западной части Черного моря на глубинах от 10 до 40 м и глубже; в районе побережья Крыма, а также Кавказа – от глубины 0,1 м и глубже.

Нами проанализированы литературные данные по таким районам: Дельта Дуная; Северо-Западная часть Черного моря – остров Змеиный, Днестрово-Дунайское междуречье; Каркинитский залив (глубоководная часть), п-ов Тарханкут; акватория залива Донузлав (рыхлые грунты); район Севастополя (траверз Учкюевки; бухты: Севастопольская – центральная часть; Карантинная; Круглая; Камышовая); бухта Балаклавская; бухта Ласпи; Ялтинский залив; акватория у Карадага.

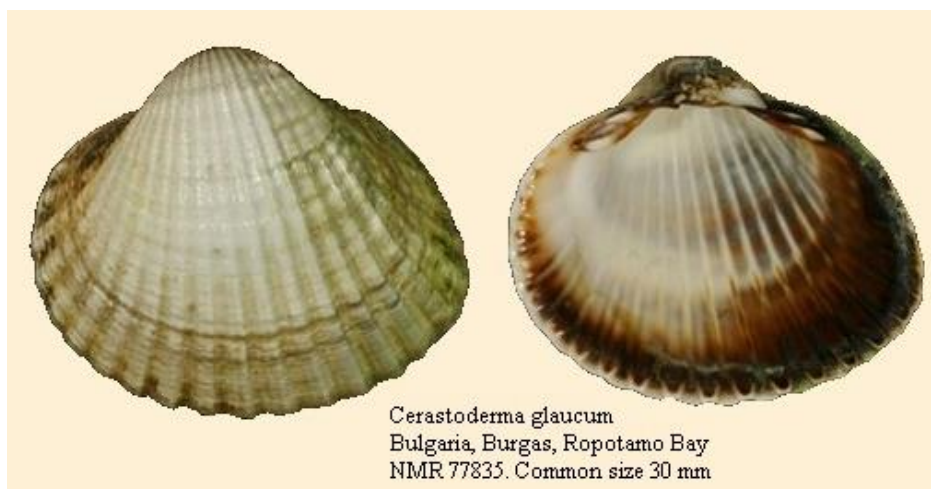


Рис. 1. Внешний вид раковины *Cerastoderma glaucum* (фото с сайта <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=image&tid=138999&pic=82464>)

В обзор также включены работы, в которых представлены методы изучения морфологии створок и жаберного аппарата, определения каротиноидного состава и антиоксидантного комплекса в тканях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методы исследований. Методы изучения морфологии створок и жаберного аппарата, определения каротиноидного состава и антиоксидантного комплекса в тканях церастодермы представлены в нескольких известных нам публикациях (Тимофеев, 2016; Бородина, Задорожный, 2020а, 2020б; Гостюхина, Андреевко, 2020; Gostuykhina, 2020 и др.). На этапе

изучения морфологии створок и жаберного аппарата у церастодермы измерялась длина (L), ширина (D), высота (H) раковины, рассчитывались показатели её формы – вытянутость (H/L), сагиттальная (D/L) и фронтальная (D/H) кривизна (Тимофеев, 2016). Для выявления изменчивости полифункциональной структуры жабр при разных условиях среды был использован показатель приведенной удельной поверхности жаберного аппарата (S_0), учитывающий показатель S – площадь поверхности жабр и W – их объем. Подробно в методике (Тимофеев, 2016).

Содержание суммарных каротиноидов определялись авторами (Бородина, Задорожный, 2020a, 2020b) в ацетоновых экстрактах. Суть метода подробно изложена в работах (Карнаухов, Федоров, 1982; Карнаухов, 1988). Мягкие ткани гомогенизировали в фарфоровой ступке с пестиком, затем проводили экстракцию 100% ацетоном. Определение содержания каротиноидов в различных тканях церастодермы проводили спектрофотометрическим методом указанных выше авторов. В работе применяли однолучевой спектрофотометр СФ-2000. Расчеты проводили последующему уравнению:

$$C_{кар} = \frac{0,4 \cdot E_p \cdot V}{m},$$

где: $E_p = E_{450} - 2,25$; E_{450} – величина экстинкций при 450 нм; V – объем ацетонового экстракта; m – масса ткани в граммах; $C_{кар}$ – концентрация каротиноидов в мг·100 г⁻¹ сырого веса ткани.

У данного вида проводился анализ активности ферментов антиоксидантного комплекса (АО) тканей, как одного из важнейших элементов формирования адаптаций гидробионтов на самые разные экологические и антропогенные факторы. В тканях сердцевидки (гепатопанкреас, жабры и мышечная ткань) определяли ферменты АО и показатель перекисного окисления липидов (ПОЛ) (Гостюхина, Андреев, 2020; Gostuykhina, 2020). Исследуемые ткани гомогенизировали с использованием ледяной бани. Гомогенаты центрифугировали при 3200g в течение 15 мин. с помощью рефрижераторной центрифуги К-23D. В супернатантах определяли активность ферментов – супероксиддисмутазы (СОД) по реакции ингибирования восстановления нитросинего тетразолия в присутствии НАДН и феназинметасульфата, длина волны 540 нм. Активность каталазы измеряли по интенсивности желтой окраски в результате реакции остаточных количеств пероксида водорода с молибдатом аммония при длине волны 410 нм. Интенсивность перекисного окисления липидов (ПОЛ) оценивали по накоплению продуктов, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой (ТБК-активных продуктов), при длине волны 535 нм. Содержание белка определяли по методу Лоури с реактивом Фолина. Выявленные особенности соотношения активности СОД и каталазы с уровнем продуктов ПОЛ в тканях моллюска отражали адаптации его организма к окислительному стрессу, периодически возникающему в донных биотопах на мелководье.

Наиболее часто применяемые методы сбора и обработки бентосных проб следующие. Макрозообентос на рыхлых грунтах отбираются с помощью ручного дночерпателя, площадью 0,04 м², с твердых субстратов – рамкой, обшитой мельничным газом, площадью 0,04 м² в 2-х повторностях, с макрофитов – мешком из мельничного газа. Бентос промывается через сито, размером ячеек 0,5 мм (Ковалева и др., 2019; Макаров, 2020a, 2020b; Макаров и др., 2021). В работах других авторов иногда использовались дночерпатели другой площади – 0,05; 0,08; 0,09 и 0,1 м². Далее бентосный материал фиксировали 4 % раствором нейтрализованного формалина. В лабораторных условиях отбирали моллюсков, в частности, церастодерму. Рассчитывали численность (экз.) и биомассу (г) на единицу площади поверхности (м²), в некоторых случаях – встречаемость вида (%).

Особенности биологии. Некоторые исследователи относят церастодерму к эврибионтным видам. Однако вопрос об адаптации вида, прежде всего, к содержанию кислорода, остается открытым. По одним данным (Самышев, Золотарев, 2018), вид относили

к пелофильным, не переносящим дефицит кислорода, по другим – к более толерантным, способным переживать локальные заморные явления (Савикин, Набоженко, 2010). Являясь эвригалинным видом, выдерживает соленость до 30 ‰ (Анистратенко и др., 2011), но не обитает ниже 8 ‰, может переносить слабое и кратковременное сероводородное заражение и отсутствует в зоне недостатка кислорода (Савикин, Набоженко, 2010; Анистратенко и др., 2011). Достаточно устойчив к органическому загрязнению, в частности, нефтяному (Алемов, 1999, 2021; Миронов и др., 2003).

По трофической принадлежности и способу питания *C. glaucum* преимущественно сестонофаг (фильтратор) (Давиташвили, Мерклин, 1968; Копий, Бондаренко, 2020). В своих размерных параметрах моллюск скорее близок к видам рода *Abra* и *Chamelea* (Михайлова, 1987; Анистратенко и др., 2011). Длина *C. glaucum* не превышает 35 мм (Михайлова, 1987). В черноморских пробах обычно встречаются экземпляры, не достигающих таких длин (Ivell, 1979; Тимофеев, 2016; Бородина, Задорожный, 2020a; Макаров, 2020b). Особи, размером до 12 мм, относили к сеголеткам и годовикам (Михайлова, 1986). Скорее всего, продолжительность жизни близка к другим видам двустворок, таким как анадара и грешок, и, составляет до 7 лет и более.

Распространение, встречаемость и некоторые популяционные характеристики.

В донных биоценозах Черного моря, по данным подавляющего большинства бентосных исследований, встречается на илистых грунтах и ракушечниках с такими видами как мидия, абра, мия, спизула и полититапес, крайне редко образуя собственные локальные ценозы. На твердых естественных и искусственных субстратах у берегов Крыма данный вид не отмечен, однако, найден в единичных экземплярах на валунах в районе Утриша (Кавказское побережье) (Макаров и др., 2021). Отмечено, что *C. glaucum* также характерна для открытых частей моря на глубинах 10–40 м на илистом грунте (Скарлатто, Старобогатов, 1972; Михайлова, 1992a; Самышев, Золотарев, 2018).

Северо-западная часть Черного моря. Изучение структуры донных макросообществ и ее трансформации в наиболее обширных биоценозах мидии, фазеолины и абры на глубинах от 10 до 100 м в конце 1970-х – начале 1990-х годов показал наличие поселений сердцевидки в северной и западной частях Черного моря на глубинах до 30 м (Самышев, Золотарев, 2018). Вид отмечался на глубинах от 9 до 40 м в 1983–1985 годы в экспедициях на Днестрово-Дунайском междуречье, площадь биоценоза сердцевидки составляла 0,14–0,28 тыс. км², средняя численность 128 экз./м², средняя биомасса 38,3 г/м². Доминантами второго порядка в эти годы были мидии, полититапес и мия (Самышев, Золотарев, 2018). Авторами были выделены так называемые биономические центры (всего 35) и на их основе биономические зоны (7), позволяющие выделить уровень сходства между этими центрами. Из 7-ми зон церастодерма присутствовала в 3-х в качестве субдоминантов 2-го и 3-го порядков. Биомасса моллюска в этих зонах была низкой и составляла от 4,0 г/м² до 33,3 г/м², что меньше численности руководящего вида *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) в 50–125 раз. В начале 2000 годов (2007–2008) результаты исследований бентосных проб на глубинах от 8 до 24 м в районе дельты Дуная показали, что субдоминантным видом двустворок был *C. glaucum* наряду со *Spisula subtruncata* (da Costa, 1778) (Стадниченко, Золотарев, 2009). Отмечалось, что из 19 станций отбора он найден на 9, то есть встречаемость достигала почти 50 %. Плотность поселений сильно отличалась, составляя от 20 до 440 экз./м².

В Каркинитском заливе церастодерма отмечалась еще в 30-х годах прошлого столетия (Арнольди, 1949). В 1980-е годы, а также значительно позже, в начале XXI века (2007–2009 годы) моллюск являлся одним из объектов исследований сотрудников отдела бентоса ИнБЮМ им. А. О. Ковалевского (Повчун 1990; Болтачева и др., 2016). Летом 2018 года на рыхлых грунтах мелководья южной части Каркинитского залива *C. glaucum* была одним из доминирующих видов по биомассе (в среднем 10,5 г/м²) вместе с другими двустворками *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791) и *Chamelea gallina* (Linnaeus, 1758) (Подзорова и др., 2021).

В Донузлаве церастодерма была отмечена в 1990 году и летом 1997 года (Михайлова, 1992b; Болтачева и др., 2002). В сентябре 2015 года отмечена на морской траве рода *Zostera*

(Ковалева и др., 2019). В 2019 году снова встречена в южной части Донузлава на рыхлых грунтах с примесью хары, среди 28 видов моллюсков (Ревков и др., 2021).

В Северо-Западной части Черного моря в 1988–2000 годы и в Западной части побережья Крыма в 1993–2004 годы вид образовывал одноименный биоценоз с четкими границами (Revkov et al., 2008). В Северо-Западной части (Приднепровско-Бугском районе) на глубинах 1–17 м в эти же годы (1988–2000) средняя численность *C. glaucum* была высокой – 2025 экз./м², средняя биомасса – 86,7 г/м². В Западном Крыму, в 1993–1994 годы, на глубинах до 17 м, эти показатели были еще выше – 3092 экз./м² и 115 г/м² соответственно (Revkov et al., 2008; Тихонова, Соловьева, 2015). Это, возможно, связано с наличием большого количества органической пищи в слоях глубинного грунта.

Севастопольская бухта с эстуарием реки Черная. Значительный объем материала известен для биотопов Севастопольской бухты. Исходными точками, чаще всего, являлись станции у самой вершины бухты, в ее срединной (или внутренней части) и у выхода из бухты. Работы проводились в разные периоды времени. Основной массив данных получен с конца 1980-х по 2005 годы (Петров, Алемов, 1993; Алемов, 1999, 2021; Миронов и др., 2003 и др.).

Наиболее длительные мониторинговые исследования бентосного населения, в состав которого входила и церастодерма, проводились в вершине Севастопольской бухты, а именно в ее контактной зоне с рекой Черная, в период с сентября 2010 по август 2014 года, и с марта 2018 по сентябрь 2020 года на глубине 0,1 м. Пробы отбирались на трех станциях, начиная с низовья реки Черной и далее до ее впадения в бухту. Для участков с пониженной соленостью (станция 1, расположенная в низовье реки – в среднем 9,5 ‰), станция 2 в устье реки – около 13 ‰), численность вида составляла в период исследований 2010–2014 годов от 1 до 159 экз./м²; в 2018–2020 годах – от 13 до 1950 экз./м². По биомассе *C. glaucum* доминировала с максимумом 2347 г/м² в августе 2019 года (Макаров, 2020а). В вершине бухты моллюск отмечался в большом количестве в разные годы и ранее. В целом, в Севастопольской бухте, численность вида с 1988 до 1997 года увеличилась от 50 до 131 экз./м², биомасса от 3,12 до 44,28 г/м², встречаемость от 50 до 100 %. В вершине и центральной части бухты церастодерма образовывала биоценоз с другими моллюсками – аброй, тритией и гидробией (Миронов и др., 2003).

Работы на 19 станциях Севастопольской бухты в 1997 году с разным уровнем органических загрязнителей показали, что донные осадки вершинной и средней частях бухты, в основном, заселены сообществом церастодермы, абры и тритии, причем на большинстве станций доминировала именно *C. glaucum* (Алемов, 1999). Эти участки отмечены как наиболее загрязненные нефтепродуктами (хотя степень загрязнения и не критическая) и наличие поселений церастодермы позволило отнести вид к устойчивым к загрязнениям. Автором приведены средние значения биомассы и численности церастодермы в разных участках бухт: величины биомасс варьировали в пределах от 24,7 до 59,3 г/м²; численности – от 127 до 218 экз./м².

На сильно загрязненных углеводородами станциях относительный вклад моллюсков, особенно сестонофагов снижается. В изучении состояния макрозообентоса в условиях загрязнения бухты применялся индекс смертности, который рассчитывался для некоторых видов двустворок сезонно и изучались биотические отличия в размерной структуре популяции некоторых двустворок. Результаты расчетов индекса смертности для церастодермы показали, что на всех участках, кроме одной станции наблюдались сходные тенденции в сезонных изменениях индекса: весной его значения максимальны – в пределах 95–100 %, летом незначительно снижены – от 60 до 99 % (Петров, Алемов, 1993). Подмечено, что в районах бухты, в наибольшей степени подверженных загрязнению (2 точки), значения индекса всегда сохраняются высокими. Данные кривых размерного состава створок в разных биотопах бухты свидетельствовали о том, что во внутренней, более загрязненной части, почти полной элиминации подвергались моллюски, крупнее 18–20 мм (2–2,5 летнего возраста). В связи с этим, популяция состояла, в основном, из сеголеток и годовиков. Во внешней части бухты в размерном составе танатоценоза высока доля (до 60 %) раковин моллюсков более крупных размеров – 25 мм и более. (Петров, Алемов, 1993). Авторы делают заключения о том,

что в районе выхода из бухты для церастодермы сохранены более-менее условия для обитания устойчивой популяции, в которой смертность моллюсков вызвана естественной элиминацией крупных особей.

Диаграммы размерного состава поселений церастодермы в биотопах Севастопольской бухты свидетельствовали, что в биотопах внутренней части бухты значительно увеличена доля элиминированных особей из старших размерно-возрастных групп (более 18 мм) (Петров, Алемов, 1993; Алемов 1999). В популяции на тот момент исследований отсутствовали особи длиной более 21 мм, тогда как среди створок встречались экземпляры более 30 мм. Данные этих исследований частот встречаемости отдельных размерных групп в популяции церастодермы подтверждались и другими авторами, ссылающимися на распространение вида в других акваториях Черного моря с 1995 по 2002 годы. Церастодерма отмечалась также массово в июле 2001 года в Севастопольской бухте на рыхлых грунтах (Revkov et al., 2008), а также в 2006 году в портовых акваториях была одним из немногих доминирующих видов (Тихонова, Соловьева, 2015).

В одной из работ последних лет по сравнительному анализу межгодовой изменчивости макрозообентоса в различных участках бухты отмечается роль сердцевидки в разнообразии донной фауны (Алемов, 2021). По показателям видового состава биоценозов в акватории бухты автор выделял 3 района: 1 – устье бухты, 2 – вершина и 3 – центральная ее часть. В первом районе, 4 вида определяли 60% видового состава, из них 2 вида двустворок – *Pitar rudis* (Poli, 1795) и *C. glaucum*. Установлено, что в районах 2 и 3 характерным видом первого порядка являлся *C. glaucum* наряду с гастроподой *Hydrobia acuta* (Draparnaud, 1805) (Алемов, 2021). Отмечается, что несмотря на значительные различия характеристик донных осадков в этих регионах, они населены единым биоценозом с руководящим видом – брюхоногим моллюском *Tritia reticulata* (Linnaeus, 1758). Приведены табличные данные вклада наиболее значимых видов в биоценотическое сходство внутри 3-х районов. Согласно им, относительный вклад *C. glaucum* составлял от 8 до 21 % (Алемов, 2021).

Карантинная бухта. В бухте моллюск отмечался разными исследователями в 1973, 1979, 1988 и 1994 годы. В 1994 году – доминировал по биомассе среди бентосных двустворчатых моллюсков – 45,3 г/м² (Миронов и др., 2003).

Стрелецкая бухта. Бентосные исследования в этой бухте одни из многочисленных. Церастодерма здесь отмечена в 1973, 1979, 1985, 1991, 1994 и 1997 годах, в вершине и средней части бухты, где она часто доминировала (Миронов и др., 2003). В вершине Стрелецкой бухты на рыхлых грунтах отмечена в ноябре 2003 года. Встречаемость составила 30 % от количества всех видов макрозообентоса (Колесникова и др., 2005).

Бухта Круглая. Моллюск отмечен на рыхлых грунтах в данной бухте в разные годы (Ревков и др., 2006). В 1997 году доминировал по биомассе среди моллюсков – 164,38 г/м² (Миронов и др., 2003).

Камышовая бухта. Церастодерма в акватории данной бухты на рыхлых грунтах отмечалась в 1973, 1979, 1982, 1985, 1988, 1991, 1994 и 1997 годах многими авторами. Максимальная численность была зафиксирована в 1988 году – 59 экз./м² (для вида это низкие значения), а наибольшая биомасса в 1979 году – 91 г/м². В 1997 году вершине и средней части бухты доминировал комплекс видов моллюсков *C. glaucum* – *A. segmentum* – *T. reticulata* (Миронов и др., 2003).

Бухта Казачья. В небольшом количестве был отмечен на вольерах в 1977 и 1986 годах (Миронов и др., 2003). В 1994–2000 годах входил в число доминирующих видов. Несколько годами позже (2003–2006 гг.) особи вида встречались лишь в небольшом количестве и только в 2009 году данный моллюск вновь стал доминировать на одной из станций в восточном рукаве бухты (Тихонова, Алемов, 2012). Также в бухте Казачья в зоне псевдолиторали, летом 2007 года, *C. glaucum* доминировал по биомассе – 21,2 г/м² (Копий и др., 2017). На протяжении последних 10 лет обнаруживался в мелководных пробах грунта наряду с другими моллюсками. Так, в 2011–2012 и 2018–2019 годы на глубине 0,1 м в западной части бухты, на 2-х мелководных станциях изучены, в частности, таксономический состав, численность и биомасса моллюсков, в том числе двустворчатых. С мая 2018 года по июнь 2019 года в

ежесезонных пробах, среди обнаруженных 11 видов, присутствовала и церастодерма. Средняя численность достигала 353 экз./м² (в 2011–2012 годы), 64 экз./м² (в 2018–2019 годы), средняя биомасса была 13 г/м² (в 2018–2019 годы). Отмечено, что данный вид доминировал по биомассе среди всех моллюсков – 54 % (Макаров, 2020b).

Балаклавская бухта. В Балаклавской бухте церастодерма впервые отмечена лишь в июле 1992 года (Миронов и др., 1999). Затем она встречена в июле 2005 года на рыхлых грунтах (Ревков, 2006). По данным автора, численность вида достигала в центральной части бухты 245 экз./м² вместе с другими типичными представителями фауны рыхлых субстратов – двустворками *Abra nitida* (O. F. Müller, 1776) (240 экз./м²) и *S. subtruncata* (235 экз./м²). В кутовой части бухты также наблюдалось массовое развитие *C. glaucum* (численность 107 экз./м² и биомасса 38,9 г/м²). В целом, в биотопе рыхлых грунтов Балаклавской бухты церастодерма входила в группу из 4-х видов, имеющих относительно высокие параметры развития по численности, биомассе и частоте встречаемости. Помимо *C. glaucum*, это также моллюски *Bittium reticulatum* (da Costa, 1778), *Parvicardium exiguum* (Gmelin, 1791) и *P. rudis*. Если рассматривать полигон в целом, то в ранжированном по индексу плотности видов на первом месте стоит именно *C. glaucum*. Популяция представлена разноразмерными особями: от недавно осевших (1–1,4 мм) до, предположительно, двухлеток, длиной 24,3 мм. Основная же масса моллюсков (до 40 % особей популяции) – это годовики с модальной длиной раковины 8–12 м (Ревков, 2006 и др.).

Также церастодерма отмечена в других бухтах и прилегающих к берегу акваториях около Севастополя, например на разрезе (трансекте) в районе Учкучевки (Миронов и др., 2003).

Анализируя данные, полученные по плотности распределения вида на участках грунта в Севастопольских бухтах, отметим, что в четырех из них (Севастопольская, Казачья, Стрелецкая и Балаклавская), численность была значительно выше и достигала величин в Севастопольской бухте – 218 экз./м² и 261 экз./м²; Казачьей – 353 экз./м²; Стрелецкой – свыше 200 экз./м²; Балаклавской от 107 до 245 экз./м².

Районы Южного, Юго-Восточного Крыма и Кавказа. В 1986 году церастодерма встречена на больших глубинах (диапазон 70–93 м) в акватории Ялтинского залива с индексом плотности 0,006 (Ревков и др., 2014).

Весной 1999 года отмечалась на рыхлых грунтах в районе Карадага на глубине 23 м с низкой численностью (всего 5 экз./м²) и биомассой (1,6 г/м²) (Ревков и др., 2002). В сентябре 2017 года найдена на валунах (2 экз.) на глубине 2 м в районе заповедника Утриш (Макаров и др., 2021).

Наконец, в качестве сравнения мест и условий обитания вида в бассейнах Черного и Азовского морей в последние два десятилетия, можно отметить, что церастодерма отмечалась в Азовском море преимущественно в западной части Таганрогского залива (экспедиция Южного научного центра РАН в 2003–2004 годы). Однако, уже при ежегодном исследовании бентосной фауны залива с 2005 по 2009 годы, этот вид вовсе отмечен не был (Савикин, Набоженко, 2010). В мае 2010 года в этом же районе, мелкие особи церастодермы были вновь найдены на илистом грунте с достаточно высокими показателями плотности и биомассы – 100 экз./м² и 168 г/м² соответственно теми же исследователями (Савикин, Набоженко, 2010). Как отмечают авторы, современные флюктуации ареала указывают на зависимость от прямых биотических составляющих (биогенного стока, количества кислорода в придонном слое и сероводорода в грунте).

Элементы морфологии, физиологии и химического состава. Морфология створок и жаберного аппарата. Морфология створок и морфологические особенности структуры жаберного аппарата данного вида, обитающего в черноморском бассейне, изучена слабо. Нами найдено всего несколько работ, в которых данный аспект исследований церастодермы изучался наряду с морфологией других морских двустворок – *M. galloprovincialis* и *Ch. gallina* (Тимофеев, Оскольская, 2005; Тимофеев, 2016). Особи вида собирались исследователями из большого количества биотопов в бухтах с различной степенью загрязненности: Камышовая, Севастопольская, Южная, Круглая, Казачья, Ласпи, район Карадага. Авторами измерялись

параметры длин, ширины и высоты раковин; рассчитывались показатели её формы – вытянутость, сагиттальная и фронтальная кривизна (Тимофеев, Оскольская, 2005; Тимофеев, 2016). В работах представлены результаты исследования морфологической структуры жаберного аппарата моллюска из этих районов в связи с разным уровнем загрязнения донных осадков в периоды с 1992 по 1995 и 2002–2005 годы. Одним из основных параметров был показатель степени расчлененности жабр – S_0 , который использовали как маркер ответных реакций особей на уровень загрязнения донных осадков. Анализ изменений S_0 жаберного аппарата *C. glaucum* (а также у мидии и хамелии) показал зависимость его значений от содержания органики и пигментов в донных осадках. Согласно данным, за период с 2002 по 2005 годы, по мере увеличения степени загрязнения акваторий показатель возрастал (Тимофеев, Оскольская, 2005). В бухте Южная, у особей с длиной раковины 20 мм, S_0 имело величину 11,7 (содержание органического углерода в осадках достигало 3,52 %, а углеводов – 15,8 мг·г⁻¹), а в бухте Казачья при той же длине – 9,92 ($S_{орг.}$ – 2,84 %, углеводов – 3,5 мг·г⁻¹).

При практически не изменяющейся длине жаберного аппарата (Лж) у моллюсков отмечены изменения числа жаберных филламентов (N), в связи с чем значение индекса N/Lж увеличивалось с уровнем загрязнения района. (Тимофеев, 2016). Так, в частности, для исследуемых особей из бухты Казачья (условно чистая) это отношение равно 31, а для моллюсков из бухты Южная – 45. Отмечалось, что изменения показателя удельной поверхности жабр у одноразмерных особей церастодермы (а также мидии и хамелии) коррелируют с содержанием тяжёлых металлов (Cd, Hg, Cu, Pb и др.) в осадках. Так, минимальная степень расчлененности жабр зафиксирована у моллюсков из б. Казачья, максимальная – у особей из бухты Южная (условно загрязненная) и кутовой части бухты Круглая (Тимофеев, 2016).

Из всех основных аспектов физиологии, таких как рост, питание, размножение, основной и энергетический обмен, для *C. glaucum*, обитающей в Черном море, изучено только размножение.

Размножение. Размножение и процесс постадийного созревания половых клеток у черноморской церастодермы было изучено еще в середине 80-годов прошлого столетия и наиболее полно представлено в работах Т.В. Михайловой (Михайлова, 1986, 1987). Автором отмечается, что на тот момент этот аспект был практически не изучен, имелись лишь единичные работы с описанием морфологии личинок и время появления их в планктоне. Однако, средиземноморский аналог вида уже был изучен, установлен возраст наступления половозрелости и годовые циклы гонад (Ivell, 1979; Zaouali, 1980). В Черном море моллюски достигали половозрелости при длине раковины более 6 мм, но лишь моллюски-годовики (9–12 мм) имели зрелые гонады и, по наблюдениям автора, размножаются с мая по декабрь (Михайлова, 1986). В течение этого периода отмечается два пика нереста – в мае-июне при температуре воды 13–14 °С и августе-сентябре при температуре 21–23 °С (Михайлова, 1987). В работе описан годовой цикл и стадии гаметогенеза у годовиков, двухлеток и старше, особенности оогенеза с подробным описанием морфологии женских половых клеток и вителлогенеза. Отмечалось, что формирование зрелых гонад у молодых моллюсков происходит замедленно, по сравнению с моллюсками второго года жизни и старше.

В последующие годы данное направление не развивалось, подобные работы проводились (и достаточно активно в 90-е и 2000-е годы) на другом представителе черноморских двустворок, наиболее массовом и перспективном объекте *M. galloprovincialis*.

Вопросы изученности роста вида в природе, садках и в условиях эксперимента для черноморской сердцевидки не освещены в литературе.

Химический состав и антиоксидантный комплекс тканей. В 2017 году был впервые изучен качественный состав каротиноидов и его сезонная динамика у *C. glaucum* в районе Севастопольского побережья (бухта Казачья) (Бородина, 2017). Установлено, что видоспецифичным каротиноидом является мактраксантин. Предполагалось, что накопление каротиноидов и их качественный состав зависит от спектра питания вида в разные сезоны годового цикла (Бородина, 2017; Бородина, Задорожный, 2020а, и 2020б). Тканевые

особенности накопления каротиноидов авторы связывали также с масс-размерными характеристиками внутренних органов моллюска, отмечая, что в жабрах содержится относительно небольшая их доля, в гепатопанкреасе – максимальная. Анализ сезонной динамики показателей показал, что высокое накопление происходило весной и августе-сентябре. Также установлено, что увеличение суммарных каротиноидов в мягких тканях моллюска совпадало с периодом созревания гонад и нерестом (Бородина, 2017). В материалах исследований обсуждаются отличия в составе каротиноидов у другого моллюска-фильтратора *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906). Отмечено, что несмотря на схожесть в образе жизни и спектре питания, качественный состав и его изменения на протяжении годового цикла у этих видов существенно разнятся.

Совсем недавно появились результаты эксперимента по влиянию питания культурой одноклеточной зеленой микроводорослью *Tetraselmis viridis* (Norris, Hori & Chihara, 1980) на состав каротиноидов тканей сердцеvidки (Бородина, Задорожный, 2020b). Моллюсков (60 экз. и длиной 25 мм) отбирали из поселений б. Казачья осенью 2016 и 2017 годов. В контрольной группе определено 8 видов пигментов и 4 вида эфиров каротиноидов. Показано, что шестидневная диета на монокультуре *T. viridis* приводила к увеличению общей концентрации соединений в тканях за счет каротиноидов микроводоросли и концентрации других растительных пигментов.

Сердцеvidка является одним из видов двустворок, наряду с анадарой и мидией, у которой в последнее годы активно изучается ферментный комплекс системы антиоксидантной защиты (Гостюхина, Андреевко, 2020; Gostuykhina, 2020). Автором исследовались тканевые особенности активности супероксиддисмутазы (СОД), каталазы и ТБК-активных продуктов в гепатопанкреасе, жабрах и ноге. Особи (26–29 мм) были собраны весной 2018 году на мелководье бухты Казачья. Мидия и анадара – из более глубоководных участков дна. Установлено, что наибольшая активность всех ферментов зарегистрирована в жабрах сердцеvidки. В гепатопанкреасе активность СОД превышала значения в 3 с лишним раза, чем у анадары. *C. glaucum*, отличалась также наиболее высокой активностью СОД и в структурах ноги. Такая активность СОД и каталазы в тканях, отчасти, могла быть связана с малоподвижностью и энергетикой моллюска (Gostuykhina, 2020). Сравнительный анализ показал, что самая высокая активность каталазы во всех тканях зафиксирована в жабрах моллюсков каждого из видов и снижалась в ряду сердцеvidка – анадара – мидия. Ткани сердцеvidки, при этом, отличались наименьшим содержанием ТБК-активных продуктов: во всех исследованных тканях эта величина была в 4,5–16 раз ниже, чем у анадары и мидии. В целом, тканевая специфика активности антиоксидантного комплекса у церастодермы и анадары близка, что, как отмечает автор, свидетельствует об активном участии ферментов в защите жабр от окислительного стресса и наибольшей устойчивостью по сравнению с мидией. В работе сделан акцент на роль природных факторов, в частности, низкой концентрации кислорода, существующей на мелководных участках дна, где собирались моллюски, и их влияние на видоспецифическую адаптацию вида. Более высокая активность СОД в тканях сердцеvidки, чем у анадары и мидии, указывает на особое состояние ее антиоксидантного комплекса (Гостюхина, Андреевко, 2020; Gostuykhina, 2020).

Содержание в тканях других значимых органических соединений, таких как аминокислоты, белок, липиды и углеводы у вида не изучалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распространение моллюска *C. glaucum* в акватории Крымского побережья Черного моря изучено относительно хорошо. По результатам анализа литературных источников *C. glaucum* на разных участках черноморского шельфа Крымского побережья, его северо-западной части и некоторых глубоководных участках моря за последние несколько десятилетий встречался, в основном, на песчано-илистых грунтах, редко образуя собственный локальный биоценоз, чаще – в сообществе с двустворчатыми моллюсками – *A. segmentum*, *S. subtruncata*, *M. galloprovincialis*, *Ch. gallina*.

Результаты первых исследований частот встречаемости отдельных размерных групп в популяции церастодермы, свидетельствующие о преобладании в биотопах особей более мелких размеров, позднее подтверждались многими исследователями, ссылающимися на распространение вида в разных акваториях Черного моря. Причины такого состояния не вполне ясны, но современные флюктуации ареала могут указывать на зависимость вида не только от низких значений солености, но и от биотических составляющих (биогенного стока, количества кислорода в придонном слое и сероводорода в грунте, нефтяных фракций). Степень нагрузки данных факторов также изучена слабо.

По имеющимся литературным данным о величии численности можно констатировать, что диапазон значений очень широк – от нескольких десятков до сотен, и даже тысячи единиц на м².

Как считают большинство исследователей, встречаемость в указанных районах в определенные годы, не означает отсутствие вида в другие временные промежутки, когда съемки просто не проводились. Отмечается факт дискретности поселений, отсутствие встречаемости вида, ранее отмеченного в данном биотопе.

Отмечено незначительное количество работ за последние десятилетия по основным направлениям физиологии, биохимии, химического состава тканей и особенностям роста черноморской сердцевидки. Фрагментарно изучены вопросы размножения, морфологии створок, морфо-физиологии жаберного аппарата, тканевой специфики содержания каротиноидов и биохимических показателей стрессоустойчивости вида. В связи с этим, перспектива таких исследований представляется нам очевидной.

Работа подготовлена по темам госзадания ФГБУН ИнБЮМ № госрегистрации 121041400077-1 «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом», № госрегистрации 121030100028-0 «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана», № госрегистрации 121040600178-6 «Структурно-функциональная организация, продуктивность и устойчивость морских пелагических экосистем».

Список литературы

- Алемов С. В. Современное состояние макрозообентоса Севастопольской бухты по данным бентосной съемки 1997 г. // Экология моря. – 1999. – Вып. 48. – С. 73–75.
- Алемов С. В. Межгодовая и сезонная динамика сообществ макрозообентоса Севастопольской бухты (Черное море) в начале XXI века на участках с различным уровнем загрязнения // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН. – 2021. – № 1 (17). – С. 3–16.
- Анистратенко В. В., Халиман И. А., Анистратенко О. Ю. Моллюски Азовского моря. – Киев: Наукова думка, 2011. – 172 с.
- Арнольди Л. В. Материалы по количественному изучению зообентоса Черного моря. II. Каркинитский залив // Труды Севастопольской биологической станции. – 1949. – Т. 7. – С. 127–192.
- Болтачева Н. А., Колесникова Е. А., Ревков Н. К. Фауна макрозообентоса лимана Донузлав (Чёрное море) // Экология моря. – 2002. – Вып. 62. – С. 10–15.
- Болтачева Н. А., Ревков Н. К., Бондаренко Л. В., Колесникова Е. А. Таксономический состав макрозообентоса Каркинитского залива (Чёрное море) в начале XXI века // Морские биологические исследования: достижения и перспективы: Труды всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием. – Севастополь, 2016. – Т. 2. – С. 36–39.
- Бородина А. В. Особенности накопления каротиноидов некоторыми черноморскими моллюсками-фильтраторами *in vitro* // Материалы научных мероприятий, приуроченных к 15-летию Южного научного центра Российской академии наук. – Ростов на Дону, 2017. – С. 351–353.
- Бородина А. В., Задорожный П. А. Динамика каротиноидов в тканях моллюска-фильтратора *Cerastoderma glaucum* (Bruguère, 1789) в годовом цикле // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2020а. – Т. 56, № 1. – С. 3–12.
- Бородина А. В., Задорожный П. А. Трансформация каротиноидов морского двустворчатого моллюска *Cerastoderma glaucum* (Bruguère, 1789) при питании культурой зеленой микроводоросли // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2020б. – Т. 56, № 6. – С. 430–439.
- Гостюхина О. Л., Андреев Т. И. Активность супероксиддисмутазы и каталазы в тканях трех видов черноморских двустворчатых моллюсков: *Cerastoderma glaucum* (Bruguère, 1789), *Anadara kagoshimensis*

- (Tokunaga, 1906) и *Mytilus galloprovincialis* Lam. в связи с адаптацией к условиям их обитания // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 108–118.
- Давиташвили Л. Ш., Мерклин Р. Л. Справочник по экологии морских двустворок. – М.: Наука, 1968. – 178 с.
- Карнаухов В. Н., Федоров Г. Г. Методы определения содержания каротиноидов и витамина А в клетках животных. – Москва: Пушино, 1982. – 28 с.
- Карнаухов В. Н. Биологические функции каротиноидов. – М.: Наука, 1988. – 215 с.
- Ковалева М. А., Надольный А. А., Макаров М. В., Копий В. Г. Эпифитон морской травы рода *Zostera* в лимане Донузлав (Крым, Черное море) // Понт Эвксинский – 2019: Тр. XI Всерос. науч.-практич. конф. – Севастополь, 2019. – С. 36–37.
- Колесникова Е. А., Болтачева Н. А., Макаров М. В. Макробентос кутовой части бухты Стрелецкой // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка Сер. Біологія. Спец. Випуск. Гидроэкология. – 2005. – № 4 (27). – С. 287–289.
- Копий В. Г., Бондаренко Л. В. Атлас обитателей псевдолиторали Азово-Черноморского побережья Крыма. – Севастополь: ФИЦ ИнБЮМ, 2020. – 120 с.
- Копий В. Г., Бондаренко Л. В., Аннинская И. Н. Макрозообентос биотопов зоны псевдолиторали бухты Казачья (Черное море, Крым) // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. – 2017. – Т. 122, № 2. – С. 34–41.
- Макаров М. В. Сезонная изменчивость таксоценов Mollusca рыхлых грунтов контактной зоны реки Черной и Севастопольской бухты (Юго-Западный Крым) // Экосистемы. – 2020а. – Вып. 21. – С. 109–118. DOI 10.37279/2414-4738-2020-21
- Макаров М. В. Современное состояние малакофауны рыхлых грунтов в вершинной части бухты Казачьей (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2020b – № 1. – С. 119–130.
- Макаров М. В., Бондаренко Л. В., Копий В. Г., Ковалева М. А. Макрозообентос в обрастаниях твердых естественных субстратов (валунов) в акватории, прилегающей к заповеднику «Утриш» (Черное море) // Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана. Государственный природный заповедник «Утриш». Анапа, 2021. – Т. 5. – С. 230–236.
- Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В. Комплексные экологические исследования Балаклавской бухты // Экология моря. – 1999. – Вып. 49. – С. 16–20.
- Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В. Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – 185 с.
- Михайлова Т. В. Особенности размножения *Cerastoderma glaucum* (Mollusca, Bivalvia) в Черном море // Экология моря. – 1986. – Вып. 23. – С. 64–68.
- Михайлова Т. В. Структура популяции *Cerastoderma glaucum* в некоторых районах северо-западной части Черного моря // Экология моря. – 1987. – № 25. – С. 50–53.
- Михайлова Т. В. Распределение макрозообентоса на нижних горизонтах черноморского шельфа // Экология моря. – 1992а. – Вып. 41. – С. 33–36.
- Михайлова Т. В. Макрозообентос озера Донузлав // Экология моря. – 1992b. – Вып. 42. – С. 15–20.
- Петров А. Н., Алемов С. В. Распределение, количественные характеристики и показатели состояния зообентоса в бухтах, различающихся по степени загрязнения // Ихтиофауна черноморских бухт в условиях антропогенного воздействия. – Киев: Наукова думка. 1993. – С. 25–45.
- Подзорова Д. В., Макаров М. В., Надольный А. А., Ковалёва М. А. Современное состояние макрозообентоса в прибрежной части Каркинитского залива (Черное море) // Комплексные исследования Мирового океана: Тр. VI всерос. науч. конф. молодых ученых. – М., 2021. – С. 296–297.
- Повчун А. С. Изменения бентоса Каркинитского залива за 50 лет // Гидробиологический журнал. 1990. Т. 26. № 5. С. 20–27.
- Ревков Н. К. Таксоценов моллюсков биотопа рыхлых грунтов Балаклавской бухты (Крым, Черное море) // Экология моря. – 2006. – Вып. 72. – С. 38–46.
- Ревков Н. К., Болтачева Н. А., Бондаренко Л. В. Многолетние изменения зообентоса в акватории Ялтинского залива (Южный берег Крыма, Черное море) // Морской экологический журнал. – 2014. – Т. XIII, № 2. – С. 49–62.
- Ревков Н. К., Болтачева Н. А., Николаенко Т. В., Колесникова Е. А. Биоразнообразие зообентоса рыхлых грунтов Крымского побережья Черного моря // Океанология. – 2002. – Т. 42, № 4. – С. 561–571.
- Ревков Н. К., Болтачева Н. А., Ревкова Т. Н., Щуров С. В., Лукьянова Л. Ф. Донная фауна озера Донузлав (Черное море) в условиях промышленной добычи песка // Экосистемы. – 2021. – Вып. 27. – С. 5–22.
- Ревков Н. К., Макаров М. В., Копий В. Г. Таксоценов моллюсков бухты Круглая (Крым, Черное море) // Еколого-функціональні та фауністичні аспекти дослідження моллюсків, їх роль у біоіндикації навколишнього середовища: Збірник наукових праць. – 2006. – Вип. 2. – С. 239–243.
- Савикин А. И., Набоженко М. В. Распространение двустворчатого моллюска *Cerastoderma glaucum* (Piret, 1789) (Bivalvia: Cardiidae) в Таганрогском заливе Азовского моря // Вестник Южного научного Центра РАН. – 2010. – Т. 6 (4). – С. 105–107.
- Самышев Э. З., Золотарев П. Н. Механизмы антропогенного воздействия на бенталь и структуру донных биоценозов северо-западной части Черного моря // Под ред. А.П. Золотницкого, О.Г. Миронова. Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН. – Севастополь: 000 Колорит. – 2018. – 208 с. Скарлато О. А., Старобогатов Я. И. Класс двустворчатые моллюски // Определитель фауны Черного и Азовского морей – Киев. Наук. думка. 1972. – Т. 3. – С. 178–249.

Стадниченко С. В., Золотарев В. Н. Популяционная структура морских двустворчатых моллюсков в районе дельты Дуная в 2007-2008 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2009. – Вып. 20. – С. 268–261.

Тимофеев В. А. Морфологические изменения жаберного аппарата двустворчатых моллюсков в связи с условиями обитания // Системы контроля окружающей среды. – 2016. – № 4 (24). – С. 118–126.

Тимофеев В. А., Оскольская О. И. Морфофизиологическая характеристика двустворчатого моллюска *Cerastoderma glaucum* L. из разных по экологическому состоянию акваторий Севастополя // Системы контроля окружающей среды: Средства и мониторинг. – 2005. – С. 305–309.

Тихонова Е. А., Алёмов С. В. Характеристика донных осадков и макрозообентоса б. Казачья в первой декаде XXI века // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2012. – С. 88–94.

Тихонова Е. А., Соловьева О. В. Использование макрозообентоса для экологических исследований портовых акваторий (на примере Севастопольской бухты, Чёрное море) // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. Серия Биология. Химия. – 2015. – Том 1 (67), № 1. – С. 135–144.

Gostuykhina O. L. Specific Features of Antioxidant Glutathione System in Tissues of the Black Sea Bivalvia Mollusk *Cerastoderma glaucum* (Cardiidae) // Inland Water Biology. – 2020. – Vol. 13, N 2. – P. 313–319.

Ivell R. The biology and ecology of a brackish lagoon bivalvia *Cerastoderma glaucum* bruguière, in an english lagoon, the widewater, Sussex // Journal of Molluscan Studies. – 1979. – Vol. 45 (3). – P. 363–382.

Revkov N. K., Petrov A. N., Kolesnikova E. A., Dobrotina G. A. Comparative analysis of long-term alterations in structural organization of zoobenthos under permanent anthropogenic impact (Case study: Sevastopol Bay, Crimea) // Marine Ecological Journal. – 2008. – Vol. 3 (7). – P. 37–49.

Zaouali J. Etude du cycle sexuel de *Cerastoderma glaucum* (Poiret, 1789) (Bivalve, Cardiidae) dans le lac de Tunic et de la neer de Bon Grara (Tunisie) // Archive Institute Pasteur. Tunis. – 1980. – Vol. 57, N. 3. – P. 281–295.

Shcherban S. A., Makarov M. V., Melnic A. V. The understudied bivalve species of the Black Sea *Cerastoderma glaucum* (Bruguiere, 1789) (Cardiidae): distribution and some aspects of biology and physiology. A review // Ekosistemy. 2022. Iss. 32. P. 73–84.

The article gives a review of literature for the last 30-40 years on the occurrence, abundance, biomass and some aspects of biology and physiology of the understudied bivalve mollusk *Cerastoderma glaucum* (Bruguiere, 1789) inhabiting coastal biocenoses and various parts of the Black Sea. The species was recorded at depths varying from 0.1 to 40 m, predominantly on loose soil and is more typical in water areas in the bays with reduced water exchange. However, *C. glaucum* rarely forms its local biocenosis, more often being subdominant in communities with bivalve molluscs of *Abra* genus – *A. segmentum*, as well as with *Spisula subtruncata*, *Mytilus galloprovincialis* and *Chamelea gallina*. The relative contribution of *C. glaucum* to the biocenotic similarity within the study areas can range from 8 to 21 %. According to the available literature data on biomass magnitude and abundance of the mollusk, it can be stated that the ranges of these values are relatively wide and vary from several tens to hundreds and even to thousands of individuals per m². In the northwestern part of the Black sea (Pridneprovsko-Bugsky district), the average number of molluscs reached a maximum of 2025 ind./m² with biomass of 86.7 g/m² at the depths of 1–17 m in the period between 1988 and 2000; near the western coast of Crimea, at the same depths, these indices were higher (3092 ind./m² and 115 g/m² respectively) in 1993–1995. In the water areas of the bays of Sevastopol, the maximum population was recorded in the Kazachya Bay - from 353 up to 500 ind./m² with biomass of up to 128 g/m² (the species dominated here in in terms of biomass among all mollusks accounting for 54 %). In some periods between 2011 and 2020, *Cerastoderma glaucum* repeatedly prevailed in biomass (73.5 g/m² on average) with a maximum of 3475 g/m² among bivalves in the Chernaya River estuary. Despite a rather significant number of studies mentioning this species, it remains relatively understudied in terms of both population characteristics and vital activity indicators in natural habitat conditions as well as in experimental environments with specifically created conditions.

Key words: bays, biocenoses, occurrence, abundance, biomass, size composition, morphology, reproduction.

Поступила в редакцию 22.11.22

Принята к печати 30.12.22

УДК 57.021:57.052:577.29

Первый опыт применения олигонуклеотидных инсектицидов для контроля численности калинового мучнистого червеца *Pseudococcus viburni*

Новиков И. А.¹, Яцкова Е. В.², Пузанова Е. В.¹, Билык А. И.¹, Шармагий А. К.²,
Оберемок В. В.^{1,2}

¹Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского
Симферополь, Республика Крым, Россия

i.nowikow2012@mail.ru, 17obruchka@mail.ru, bilyk.ai97@mail.ru, voloberemok@gmail.com

²Орден Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН
Ялта, Республика Крым, Россия

vercful@mail.ru, alexander_sharma@mail.ru

Pseudococcus viburni Signoret – космополитичный полифаг родом из Южной Америки, активно распространяющийся на Восток с конца XIX века и поражающий сельскохозяйственные и декоративные культуры. Калиновый мучнистый червец характеризуется теми же особенностями, что и остальные представители подотряда Грудохоботные: ослабляет растение, заражает вирусами, провоцирует развитие сажистых грибов. Для борьбы с ним до сих пор вынуждены применять химические инсектициды, так как достойных по эффективности и стоимости биологических препаратов на рынке нет. В данной статье мы предлагаем новый способ борьбы с калиновым мучнистым червецом, основанный на блокировании работы 28S, 18S и 5,8S рибосомальной РНК. Этот метод характеризуется безопасностью для нецелевых объектов, высокой эффективностью и биоразлагаемостью действующего вещества – немодифицированного антисмыслового ДНК-олигонуклеотида (олигонуклеотидного инсектицида, или ДНК-инсектицида, или олинцида). Нами были изучены три ДНК-фрагмента, комплементарные трём рибосомальным генам 28S, 18S и 5,8S рРНК: Альфа-11, Бета-11 и Гамма-11 соответственно. Наилучший результат показал ДНК-инсектицид Бета-11, с помощью которого удалось добиться смертности 78,31 % вредителей на третьи сутки, а олигонуклеотидные инсектициды Альфа-11 и Гамма-11 на третий день показали невысокий уровень смертности: 38,87 % и 36,52 % соответственно. Однако на 14 день из-за отрождения новых особей смертность от олигонуклеотидного инсектицида Бета-11 снизилась до 51,24 %, тогда как олинцид Альфа-11 вызвал смертность 63,42 %, а олинцид Гамма-11 – 66,69 %. По-видимому, для более эффективной работы необходимо проводить совместную обработку олигонуклеотидными инсектицидами. Полученные результаты показывают перспективность разработки олинцидов для контроля численности калинового мучнистого червеца.

Ключевые слова: антисмысловые технологии, ДНК-инсектициды, олигонуклеотидные инсектициды, олинциды, калиновый мучнистый червец, калина вечнозелёная, *Pseudococcus viburni*, *Viburnum tinus*, защита растений.

ВВЕДЕНИЕ

Мучнистые червцы Pseudococcidae – группа насекомых-вредителей, которая наносит значительный экономический ущерб мировому сельскому хозяйству и декоративным насаждениям. Примерно 22 % мучнистых червцов являются полифагами, 20 % обитают на травах (например, сахарном тростнике), 16 % встречаются на растениях цитрусовых и тропических фруктов, а, к примеру, кофе поражает 6 % мучнистых червцов (Franco et al., 2009).

Калиновый мучнистый червец паразитирует на 258 родах растений-хозяев, относящихся к 91 семействам (García et al., 2016), и может давать от трех до четырех поколений в год (da Silva et al., 2017). Повреждения растению наносят имаго и личинки, питаются на побегах, листьях, соцветиях и плодах (Gura et al., 2019). Вредители предпочитают располагаться в пазухах листьев, на нижней стороне листовой пластинки и верхушках молодых растений. Данное насекомое считается основным вредителем винограда, поражает также сливу, грушу, вишню, яблоню, айву, малину, ежевику, авокадо, апельсин, люцерну, картофель, томаты, огурец, нут, чечевицу и другие виды растений в зависимости от региона (Dapoto et al., 2011).

Потеря урожая происходит, когда мучнистые червецы поражают плоды или выделяют падь, покрывающую плоды, которая служит средой для роста и развития сажистых плесневых грибов (*Ciadosporium* spp.) (Daane et al., 2008). Также мучнистые червецы являются распространителями вирусов, таких как вирус, ассоциированный со скручиванием листьев виноградной лозы (Cooper et al., 2018).

В качестве инсектицидов для борьбы с калиновым мучнистым червецом применяют метидатион, профенофос, диазинон или бупрофезин, а также их смеси с минеральным маслом или силиконовыми адьювантами (Sazo, 1995; Sazo et al., 2008). Однако эти методы не оправдывают себя, так как вызывают резистентность у насекомого-вредителя, а также наносят значительный ущерб окружающей среде. Биологические методы борьбы используют значительно реже, что связано с их низкой эффективностью и трудоемкостью процесса (Gunawardana, Hemachandra, 2020).

Недавние исследования по использованию ДНК-инсектицидов против насекомых из подотряда Sternorrhyncha показали их высокую эффективность (Oberemok et al., 2019; Gal'chinsky et al., 2020; Useinov et al., 2020).

Цель работы – разработать и апробировать эффективный олигонуклеотидный инсектицид для контроля численности калинового мучнистого червца.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основе имеющихся в GenBank последовательностей были разработаны три целевых олинцида: Альфа-11 (5'-GGTCGCGACGT-3'), Бета-11 (5'-GGAATCGAACC-3') и Гамма-11 (5'-CCTCAGACAGG-3'), блокирующие работу 28S, 18S и 5,8S рРНК *P. viburni* соответственно.

Олигонуклеотиды синтезировали на автоматическом ДНК-синтезаторе АСМ-800 (БИОССЕТ, Россия) стандартным фосфорамидитным методом на универсальном твердом носителе UniLinker 500Å (ChemGenes, США). Удаление олигонуклеотидов с твердофазного носителя и снятие защитных групп проводили при температуре 55 °С в течение ночи с использованием концентрированного раствора аммиака. После раствор фильтровали и упаривали в вакууме на ротационном испарителе (Heidolph, Германия). Полученное твердое вещество растворяли в деионизированной воде до нужной концентрации, измеряя её на спектрофотометре NanoDrop Lite (Thermo Fisher Scientific, США).

Соответствие синтезированных фрагментов ДНК определяли с помощью анализатора VastoSCREEN на базе масс-спектрометра MALDI-ToF (Литех, Россия). Соотношение массы (m) к заряду (z) олигонуклеотидов измеряли в виде положительных ионов с 3-гидроксипиколиновой кислотой в качестве матрицы в соотношении 2:1. Теоретическое отношение m/z рассчитывали в программе ChemDraw 18.0.

Обработки олигонуклеотидными инсектицидами против калинового мучнистого червца проводились на Южном берегу Крыма в Никитском ботаническом саду с июня по ноябрь 2022 года на растениях калины *Viburnum tinus* L. Обработку проводили с помощью ручного пульверизатора раствором олигонуклеотидов в деионизированной воде с концентрацией 100 мг/л в трехкратной повторности. Эффект от применения отмечали с третьего по четырнадцатый день после обработки целевыми олигонуклеотидными инсектицидами. Смертность насекомых рассчитывали с учетом отношения погибших особей к общему количеству насекомых, приходящихся на 10 листьев растения при помощи бинокулярного микроскопа Nikon SMZ 745T (Nikon Instruments Inc., США). В среднем для каждой группы было использовано 108 насекомых.

Для оценки достоверности различий между средними показателями опытных групп и контролем использовали непараметрический критерий хи-квадрат Пирсона (χ^2) с поправкой Йейтса (GraphPad Software, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Измерение соответствия синтезированных олигонуклеотидов, определенное с помощью метода MALDI-TOF, показало, что все олигонуклеотиды соответствуют своей структуре, и полученное соотношение m/z отличается от теоретически рассчитанного не более чем на 10 единиц (табл. 1).

Таблица 1
Результаты анализа синтезированных олигонуклеотидов методом MALDI-TOF

Олигонуклеотиды	Полученное соотношение m/z	Теоретическое соотношение m/z
Альфа-11	3372,56	3372,60
Бета-11	3348,36	3349,62
Гамма-11	3325,41	3325,61

Смертность насекомых от олинцидов наблюдали уже на третий день эксперимента. Использование Бета-11, направленного на блокирование 18S рРНК *P. viburni*, показало смертность 78,31 % на третий день ($\chi^2=108,3$, $p<0,001$, $N=223$, $dF=1$), тогда как после использования олинцида Альфа-11, блокирующего 28S рРНК, и олинцида Гамма-11, блокирующего 5,8S рРНК, обнаружили примерно одинаковую смертность на третий день. Для олинцида Альфа-11 смертность составила 38,87 % ($\chi^2=27,1$, $p<0,001$, $N=225$, $dF=1$), а для олинцида Гамма-11 – 36,52 % ($\chi^2=27,1$, $p<0,001$, $N=225$, $dF=1$).

На четырнадцатый день эксперимента олинциды Альфа-11 и Гамма-11 также показывали близкие результаты и смертность насекомых составила 63,42 % ($\chi^2=84,6$, $p<0,001$, $N=233$, $dF=1$) и 66,69 % ($\chi^2=90,4$, $p<0,001$, $N=224$, $dF=1$) соответственно. В то же время, олинцид Бета-11 показал отрицательную динамику – 51,24 % мертвых особей на четырнадцатый день ($\chi^2=58,2$, $p<0,001$, $N=231$, $dF=1$). Нами обнаружено, что отрицательная динамика объясняется отрождением новых особей первого возраста, которые и повлияли на расчет смертности.

Если сравнивать эффективность олинцидов между собой, то очевидно, что блокирование 18S рРНК с помощью олинцида Бета-11 вызывает большую смертность и быстрее позволяет добиться снижения численности вредителей, чем блокирование 5,8S и 28S рРНК. Однако, исходя из того, что олинциды являются контактными инсектицидами, можно рекомендовать проводить повторную обработку на третьи или четвёртые сутки, чтобы добиться максимальной эффективности, уничтожая отродившихся из яиц нимф. Также перспективным является возможность совместного применения нескольких олинцидов в одной формуле препарата.

Важно отметить, что ДНК-инсектициды могут решить или улучшить проблему устойчивости к инсектицидам. Если использовать короткие одноцепочечные фрагменты очень консервативных частей генома насекомого-вредителя, устойчивость к инсектицидам будет расти медленнее, потому что потенциальные мутации, изменяющие целевые рибосомальные гены, в консервативных частях происходят с очень низкой скоростью. Таким образом, если мы не в состоянии остановить генетические процессы, приводящие к резистентности насекомых-вредителей к химическим инсектицидам, мы могли бы замедлить её появление, используя олинциды на основе очень консервативных участков функционально важных генов, таких как рибосомальные гены (Drouin, Tsang, 2012). Этот подход имеет огромную ценность, а разработки в этой области могут поспособствовать развитию безопасного и дешевого сельского хозяйства, поддерживаемого ДНК-инсектицидами. Даже биологические и ботанические методы борьбы не способны конкурировать с олинцидами в

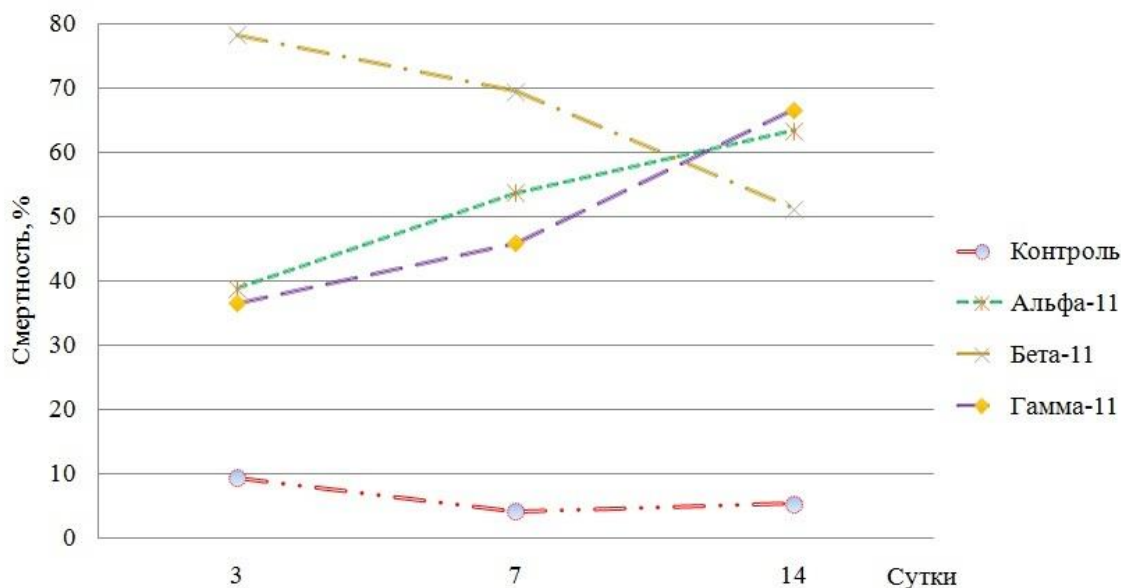


Рис. 1. Смертность личинок *Pseudococcus viburni* при блокировании разных рибосомальных РНК

Для Альфа-11 и Бета-11 различия с контрольной группой достоверны ($p < 0,05$).

вопросах резистентности, так как формирование симбиотических взаимоотношений между растением, насекомым-вредителем, их микробиомами и вирусами, затрагивает, как правило неконсервативные участки генома (Pélissié et al., 2018; Oberemok et al., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успешно разработаны и апробированы три олинцида, блокирующие работу 28S, 18S и 5,8S рРНК калинового мучнистого червеца, показавшие высокую инсектицидную активность на четырнадцатый день после обработки в дозировке 100 мг/л.

Исходя из полученных данных, можно предположить, что воздействие на 18S рибосомальной РНК предпочтительнее, чем на 5,8S или 28S рРНК, а также рекомендовать совместное использование трех олинцидов Альфа-11, Бета-11 и Гамма-11 для достижения более высокого инсектицидного эффекта.

Данная гипотеза требует проведения ряда дополнительных экспериментов, в том числе и на других видах насекомых-вредителей из семейства Pseudococcidae.

Исследование выполнено в рамках государственного задания «Разработка олигонуклеотидных конструкций для получения избирательных и высокоэффективных препаратов для медицины и сельского хозяйства» (регистрационный номер FZEG-2021-0009).

Список литературы

Гура Н. А., Стрюкова Н. М., Шипулин А. В. Диагностика *Pseudococcus viburni* (Signoret) и его отличие от карантинного вида *Pseudococcus comstocki* (Kuwana) // Фитосанитария. Карантин растений. – 2019. – Вып. 1, № 27. – С. 29–36.

Cooper M. L., Daugherty M. P., Jeske D. R., Almeida R. P. P., Daane K. M. Incidence of Grapevine Leafroll Disease: Effects of Grape Mealybug (*Pseudococcus maritimus*) Abundance and Pathogen Supply. Journal of economic entomology. – 2018. – Vol. 111, N 4. – P. 1542–1550.

Da Silva V., Nondillo A., Galzer E., Garcia M., Botton M. Effect of host plants on the development, survivorship, and reproduction of *Pseudococcus viburni* (Hemiptera: Pseudococcidae) // Florida Entomologist. – 2017. – Vol. 100. – N 4. – P. 718–724.

- Daane K. M., Cooper M. L., Triapitsyn S. V., Andrews J. W., Ripa R. Parasitoids of obscure mealybug, *Pseudococcus viburni* (Hem.: Pseudococcidae) in California: establishment of *Pseudaphycus flavidulus* (Hym.: Encyrtidae) and discussion of related parasitoid species // Biocontrol Science and Technology. – 2008. – N 18. – P. 43–57.
- Dapoto G. L., Olave A., Bondoni, M., Giganti, H. Obscure Mealybug (*Pseudococcus viburni*) In Pear Trees in The Alto Valle of Rio Negro and Neuquen, Argentina // Acta Horticulturae. – 2011. – Vol. 2, N 909. – P. 497–504.
- Drouin G., Tsang C. 5S rRNA gene arrangements in protists: a case of nonadaptive evolution // Journal of molecular evolution. – 2012. – Vol. 74, N 5–6. – P. 342–351.
- Franco J. C., Zada A., Mendel Z. Novel Approaches for the Management of Mealybug Pests // Biorational Control of Arthropod Pests. – 2009. – P. 233–278.
- Gal'chinsky N., Useinov R., Laikova K., Novikov I., Gorlov M., Plugatar Y., Oberemok V. A breakthrough in the efficiency of contact DNA insecticides: rapid high mortality rates in the sap-sucking insects *Dynaspidiotus britannicus* Comstock and *Unaspis euonymi* Newstead // Journal of Plant Protection Research. – 2020. – Vol. 60. – P. 220–223.
- García Morales M., Denno B. D., Miller D. R., Miller G. L., Ben-Dov Y., Hardy N. B. ScaleNet: a literature-based model of scale insect biology and systematics / Database: the journal of biological databases and curation. – 2016. – bav118.
- Gunawardana D., Hemachandra Ks. Mass Rearing of Mealybug Predator, *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant (Coleoptera: Coccinellidae) on two Mealybug Species, *Planococcus minor* and *Pseudococcus viburni* // Tropical Agricultural Research. – 2020. – Vol. 31, N 1. – P. 31–41.
- Kosztarab M. P. Scale insects of Northeastern North America. Identification, biology, and distribution // Virginia Museum of Natural History Martinsburg. – 1996. – P. 650.
- Oberemok V. V., Puzanova Y. V., Kubyshkin A. V., Kamenetsky-Goldstein R. Top Three Strategies of ss(+)RNA Plant Viruses: Great Opportunists and Ecosystem Tuners with a Small Genome // Viruses. – 2021. – Vol. 13, N 11. – P. 2304.
- Pélissié B., Crossley M. S., Cohen Z. P., Schoville S. D. Rapid evolution in insect pests: the importance of space and time in population genomics studies // Current opinion in insect science. – 2018. – Vol. 26. – P. 8–16.
- Sazo L. Control de chanchitos blancos en frutales de hojaca duca // Misceláneas Agrícolas. – 1995. – N 41. – P. 60–63.
- Sazo L., Araya J. E., de la Cerda J. Effect of a siliconate coadjuvant and insecticides in the control of mealybug of grapevines, *Pseudococcus viburni* (Hemiptera: Pseudococcidae) // International Journal of Agriculture and Natural Resources. – 2008. – Vol. 35, N 2. – P. 177–184.
- Signoret V. Essais sur les cochenilles ou gall insectes (Homoptères – Coccides) // Annales de la Société Entomologique de France. – 1875. – N 5. – P. 305–352.
- Useinov R., Gal'chinsky N., Yatskova E., Novikov I., Puzanova Y., Trikoz N., Sharmagiy A., Plugatar Y., Laikova K., Oberemok V. To bee or not to bee: creating DNA insecticides to replace non-selective organophosphate insecticides for use against the soft scale insect *Ceroplastes japonicus* Green // Journal of Plant Protection Research. – 2020. – Vol. 60, N 4. – P. 406–409.

Novikov I. A., Yatskova E. V., Puzanova Ye. V., Bilyk A. I., Sharmagiy A. K., Oberemok V. V. The first experience of using oligonucleotide insecticides for the obscure mealybug *Pseudococcus viburni* Signoret control // Ekosistemy. 2022. Iss. 32. P. 85–89.

Pseudococcus viburni Signoret is a cosmopolitan polyphage native to South America, actively spreading to the East since the end of the XIX century and affecting agricultural and ornamental crops. The obscure mealybug is characterized by the same features as the rest of the representatives of the suborder Sternorrhyncha: it weakens the plant, infects it with viruses, provokes the development of sooty mold. Mainly chemical insecticides are used for its control, as there are no effective and low-cost biological preparations on the market today. In this article, we propose a new approach for the obscure mealybug control, based on blocking the work of 28S, 18S, and 5.8S ribosomal RNAs. This method is characterized by safety for non-target organisms, high efficiency and biodegradability of the active substance – unmodified antisense DNA oligonucleotide (oligonucleotide insecticide, or DNA insecticide, or olinscide). We studied three DNA fragments complementary to the three ribosomal genes 28S, 18S and 5.8S rRNA: Alpha-11, Beta-11, and Gamma-11, respectively. DNA insecticide Beta-11 demonstrated the best result and caused high mortality rate: 78.31 % on the 3rd day, meanwhile oligonucleotide insecticides Alpha-11 and Gamma-11 on the 3rd day showed lower mortality rate: 38.87 % and 36.52 %, respectively. However, on 14th day, due to the hatching of new individuals, mortality rate of the oligonucleotide insecticide Beta-11 decreased to 51.24 %, while olinscide Alpha-11 caused 63.42 % mortality and olinscide Gamma-11 66.69 %. Apparently, combined treatment with oligonucleotide insecticides Alpha-11, Beta-11, and Gamma-11 is necessary for more effective performance. The obtained results reveal the perspective of using olinscides for the obscure mealybug control

Key words: antisense technologies, DNA insecticides, oligonucleotide insecticides, olinscides, the obscure mealybug, *Pseudococcus viburni*, *Viburnum tinus*, plant protection.

Поступила в редакцию 12.12.22
Принята к печати 30.12.22

УДК 551.4 (571.5)

Содержание тяжелых металлов и микробиологическая характеристика почв в импактной зоне Красноярского алюминиевого завода

Пономарева Т. В.^{1,2}, Богородская А. В.¹

¹ Институт леса имени В. Н. Сукачева СО РАН
Россия, Красноярск
anbog@ksc.krasn.ru

² Сибирский федеральный университет
Россия, Красноярск
bashkova_r@mail.ru

Исследованы антропогенно-преобразованные почвы (агрочернозёмы (*Anthrosols*), абразёмы и урбанозёмы (*Technosols*) на территории, примыкающей к Красноярскому алюминиевому заводу, в пределах санитарно-защитной зоны. По результатам детального анализа валового содержания элементов с шагом в 1 см по глубине выявлен характер распределения содержания алюминия и тяжелых металлов (ТМ) в верхнем 0–20 см слое почв, который сравнивался с кларками элементов и содержанием их в фоновых почвах. Установлено, что максимальное превышение концентрации тяжелых металлов в почвах по отношению к кларку в ближней зоне воздействия предприятия на расстоянии 0,3 км составляло для меди в 16 раз, для кадмия – в 8 раз, для никеля – в 2,5 раза, для алюминия – в 1,6 раза. Обследованные почвы содержали количество алюминия, меди, никеля и др. элементов в верхних горизонтах превышающее фоновые значения более чем в 3 раза, поэтому данные почвы можно относить к химически-преобразованным почвам. В профиле абразёма на расстоянии 0,3 км от предприятия в верхнем 0–5 см слое отмечалось минимальное содержание углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}=150\text{--}240 \text{ мкг С г}^{-1}$), повышенная интенсивность базального дыхания ($\text{БД}=1,25\text{--}2,92 \text{ мкг С-CO}_2 \times (\text{г} \times \text{ч})^{-1}$), а также значительные структурно-функциональные перестройки в гетеротрофном комплексе микробиоценоза. Высокие значения валового содержания ТМ и алюминия ближайшей зоны воздействия до 1,5 км оказывают достоверное влияние на содержание $C_{\text{мик}}$ и увеличивают интенсивность БД в профиле абразёма и урбанозёма, что свидетельствует о стрессе микробного сообщества.

Ключевые слова: антропогенно-преобразованные почвы, *Anthrosols*, *Technosols*, алюминий, тяжелые металлы, микробиоценоз.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов деградации почв, оценка их экологического состояния и нормирование техногенной нагрузки вблизи промышленных предприятий – актуальная проблема современности (Воробейчик и др., 1994; Богородская и др., 2012; Ильин, 2012; Алексеенко, Алексеенко, 2014). Аэротехногенное загрязнение Красноярска и прилегающих территорий происходит преимущественно от выбросов промышленных предприятий, объектов энергетики и автотранспорта. Одним из основных источников выбросов является предприятие АО «РУСАЛ Красноярский алюминиевый завод» (КрАЗ).

Алюминиевые заводы входят в группу промышленных предприятий, в составе выбросов которых содержатся специфические примеси с токсичными свойствами: фтористые соединения, диоксид серы, полициклические ароматические углеводороды, техногенная пыль, обогащенная алюминием, кремнием и другими элементами, включая тяжелые металлы (ТМ) (Евдокимова, Зенкова, 2003; Давыдова, 2016). В выбросах КрАЗа преобладающими специфическими элементами являются фтор и алюминий, кроме того в составе твердых составляющих выбросов часто упоминается медь, никель, цинк, кадмий, кобальт, свинец (Ташлыкова, 2008). В почвах, находящихся в зоне воздействия алюминиевых заводов, в том числе и КрАЗа содержится повышенное содержание ТМ (Евдокимова, Зенкова, 2003; Евдокимова и др., 2013; Демиденко и др., 2016). ТМ поступают на поверхность почвы как в труднорастворимых, так и в виде аэрозолей в хорошо растворимых формах. Алюминий,

основной компонент твердого вещества выбросов алюминиевого завода, поступает в почвы в основном в малоподвижной форме в виде оксидов (Давыдова, 2016). Уровень содержания алюминия и ТМ в почвах зависит от окислительно-восстановительных и кислотно-основных свойств последних, гидротермического режима, содержания гумуса, гранулометрического состава (Ильин, 2012). Высокие концентрации фтористого водорода в выбросах алюминиевого завода могут косвенно влиять на увеличение подвижных форм металлов в почве за счет изменения рН, в процессе чего увеличивается подвижность алюминия и ТМ (Васильева, Кадацкий, 1998). Вместе с тем, подвижность металлов в почве, поступление их в растения очень изменчивы и зависят от многих факторов: вида растений, почвенных и климатических условий (Соколова и др., 2004; Водяницкий, 2011).

Для характеристики общей загрязненности почвы целесообразно контролировать валовое количество металлов (Ильин, 2012), поскольку при разработке предельно допустимых концентраций (ПДК) ТМ и неметаллов в почвах наибольшее распространение получил уровень содержания их валовых форм (Водяницкий, 2011, 2013; Ильин, 2012). Кроме того, валовое содержание металлов отражает потенциальный уровень загрязнения.

Ранее в зоне воздействия КрАЗа проводились исследования в основном сельскохозяйственных земель (Ташлыкова, 2008; Демиденко и др., 2016). Изучалось содержание ТМ в почвах и растительности (Демиденко, Васильева, 2016; Скрипальщикова и др., 2016). Подробно рассматривались проблемы загрязнения почв фтором, как одним из основных загрязняющих веществ при производстве алюминия (Кремленкова и др., 1991). Актуальность исследований почвенного покрова в ближней зоне воздействия КрАЗа, совпадающей с санитарно-защитной зоной данного предприятия (до 3 км), обусловлена необходимостью мониторинга содержания ТМ в компонентах экосистемы для определения региональных экологических стандартов с учетом природной и техногенной специфики региона, а также объективной оценки состояния нарушенных почв индустриальной зоны, поскольку в литературе разрозненны сведения о классификационной принадлежности техногенных почв, их морфологических и физико-химических особенностях, распределении ТМ, а также структурно-функциональных откликах почвенных микробиоценозов (Воробейчик и др., 1994; Никитина, Голодяев, 2003; Евдокимова и др., 2013, Терехова и др., 2021).

Цель исследований – изучить морфологические и физико-химические особенности техногенных почв в ближней зоне воздействия Красноярского алюминиевого завода распределения тяжелых металлов, а также микробиологического состояния почвенных микробиоценозов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Красноярский алюминиевый завод расположен в черте городской застройки на левом берегу реки Енисей на участке лесостепи, ранее представляющем собой сочетание луговых степей и мелколиственных лесов. Почвенный покров был представлен сочетаниями черноземов, серых и дерново-подзолистых почв (Крупкин, Косицина, 2006). В настоящее время на прилегающих к заводу площадях естественный растительный и почвенный покров не сохранился из-за глубокой трансформации естественных ландшафтов в техногенные в ходе строительной и последующей хозяйственной деятельности. В результате сформировались синантропные растительные комплексы, в которых большую роль играют синантропные древесные и кустарниковые сообщества и травянистая рудеральная растительность.

На данный момент общая площадь санитарно-защитной зоны предприятия составляет более 3,7 тыс. га (<http://www.mpr.krskstate.ru/presscentr/0/news/88037>).

Исследования эколого-функционального состояния почв проводились в 2017–2018 годы в ближней зоне воздействия КрАЗа (до 3 км). Были заложены три пробные площади (ПП), разной удаленности от источника воздействия (табл. 1). В качестве объектов исследований выбраны наиболее представленные на исследуемой территории почвы. Идентификация почв нарушенных территорий осложняется комплексом факторов, воздействующих на почвообразовательный процесс. Вследствие этого, почвы диагностированы по

классификации 2004 года (Шишов и др., 2004) как агрочернозёмы (по WRB *Anthrosols*), абразёмы (по WRB *Technosols*), и по классификации городских почв (Строганова и др., 1997) как урбанозёмы (по WRB *Technosols*). Основная масса элементов загрязнителей сосредотачивается в верхней части профиля (Ильин, 2012), поэтому распределение алюминия и ТМ оценивалось в слое 20 см. Для определения фонового содержания тяжелых металлов были отобраны образцы почв на прилегающей к экспериментальным участкам территории, удаленной от КраЗа на расстояние 25 км, расположенной в зоне Красноярской лесостепи. Почвы фонового участка представлены агросерыми постагрогенными (по WRB *Anthrosols*).

Учитывая сложность структурной организации профилей антропогенно-преобразованных почв и большую вариабельность морфологических характеристик обследуемых почв в импактной зоне КраЗа, отбор почвенных образцов проводился послойно с большой дискретностью по глубине (каждый 1 см) в трехкратной повторности во второй половине августа.

Определение валового содержания элементов проведено в лаборатории минералогии техногенеза и геоэкологии Института минералогии УрО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП–МС) (ФР.1.29.2006.02149) на приборе Agilent 7700 после стандартной пробоподготовки в системе микроволнового вскрытия (SpeedWave) с использованием навесок почв 50 мг и смеси кислот HF+HCl+HNO₃. Для метрологического контроля качества анализа использовались международные стандарты почв NIST SRM 2710a (Soil) и SRM 2711a (Montana soil). Актуальную кислотность определяли потенциометрически из водной суспензии, приготовленной в соотношении почва:раствор 1:2,5 в минеральных и 1:25 в органогенных горизонтах (Соколова и др., 2007), плотность сложения почвы (объёмный вес) – буровым методом (Качинский, 1965).

При изучении таких относительно небольших геохимических систем биосферы, как отдельные (в первую очередь – техногенные) геохимические ландшафты и их определенные компоненты практически всегда возникает необходимость сравнения геохимических особенностей данных систем с соседними и с особенностями характерными для всей биосферы. В связи с этим оценку состояния почв проводили на основании сравнения содержания алюминия и ТМ в почвах с их кларками – средним содержанием отдельных элементов в земной коре (Виноградов, 1962), а также с содержанием элементов в почвах фоновых участков.

Структуру и численность основных функциональных групп микроорганизмов в техногенных почвах и на фоновом участке изучали методом посева почвенной суспензии на диагностические среды (Методы..., 1991). Определяли содержание микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) методом субстрат-индуцированного дыхания и интенсивность базального дыхания (БД) хроматографически (Anderson, Domsh, 1978; Ананьева, 2003). Подробное описание методик и рабочие параметры хроматографа приведены ранее (Богородская и др., 2012). Выявляли корреляционную зависимость между микробиологическими, физическими, физико-химическими показателями почв, а также с содержанием ТМ при доверительной вероятности 95 %. Достоверность различий микробиологических показателей разных категорий участков проверялась по критерию Стьюдента ($P=0,05$). При обработке данных и построении графиков зависимостей использовали статистический пакет программы Microsoft Excel 2007.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология почв импактной зоны КраЗа. Почвенный покров на исследуемой территории представлен антропогенно-преобразованными почвами и техногенными почвенными образованиями; почвы с ненарушенным строением профиля занимали очень незначительную часть территории. На примыкающих с северо-восточной стороны к территории предприятия участках земель (ПП 5) (на удалении ~0,3 км от источника выбросов), где при строительстве проводилось снятие верхнего слоя почвы, на минеральном субстрате формировались абразёмы глинисто-иллювиальные (ВІ – С). Далее по мере

Таблица 1

Характеристика фитоценозов и почв на пробных площадях в импактной зоне Красноярского алюминиевого завода

№ ПП	Расстояние от завода, км	Характеристика пробной площади	Преобладающие виды ЖНП и проективное покрытие	Тип почвы	Морфологическая характеристика почв
5	0,3	Участок относится к зоне тяжелого поражения. Характеризуется рудеральной растительностью с большой пылевой нагрузкой	<i>Artemisia sieversiana</i> , <i>A. vulgaris</i> , <i>Cannabis sativa</i> , <i>Achillea millefolium</i> 80 %	Абразём глинисто-иллювиальный проградированный	0–1 см – сухой опад высокотравья, слаборазложившиеся растительные остатки с углями, очень рыхлый, сухой. АУх (1–6 см) – темно-серо-бурый, сухой, порошистый, суглинистый, пронизан тонкими корнями, много мелких углей. ВІ (6–45 см) – желто-бурый, сухой, плотный, глинистый, слитый, корни редко
6	1,5	Искусственные насаждения тополя с луговыми фитоценозами. На поверхности почвы встречаются многочисленные артефакты в виде строительного и бытового мусора	<i>Artemisia sieversiana</i> , <i>A. vulgaris</i> , <i>Atriplex hortensis</i> , <i>Sisymbrium loeselii</i> , <i>Cannabis sativa</i> , <i>Chamérion</i> 60–70 %.	Урбанозём	0–2 см – сухой опад листьев тополя и трав, формирующий маломощную сплошную подстилку. 2–6 см – темно-серо-бурый, сухой, порошистый, суглинистый, рыхлый, густо пронизан тонкими корнями, содержит антропогенные включения. 6–25 см – серо-бурый, неоднородно окрашен, сухой, рыхлый, глинистый, порошистый, галька, корни редко. 25–33 см – более светлый серо-бурый с желтыми пятнами, сухой, более плотный, глинистый, галька, корни редко.
7	3	Полого-холмистый рельеф, луг злаковый, периодически подвергается воздействию пирогенного фактора	<i>Bromus mollis</i> , <i>Artemisia sieversiana</i> 70 %	Агрочернозём глинисто-иллювиальный	0–7 см – темный, сухой, порошистый, рыхлый, супесчано-суглинистый. 7–25 см – темногумусовый горизонт, сухой, порошистый, суглинистый, плотный, тонкие корни реже. 25–40 см – темно-бурый, более плотный, сухой, глинистый

Примечание к таблице. ЖНП – живой напочвенный покров.

зарастания растительностью на поверхности образовался дерновый горизонт и почвы переходили в подтип реградированных абразёмов, по содержанию ряда элементов данные почвы относились к химически преобразованным (АУх(6 см) – ВІ – С). Верхние 3–4 см дернового горизонта содержали большое количество мелких углей и золы, поэтому почва имела палевый оттенок. Гранулометрический состав легкоглинистый.

На рекультивированных участках, где ранее располагался поселок «Индустриальный» (ПП 6) (на удалении 1,5 км от КрАЗа) почвы в пределах одной пробной площади в значительной степени отличались по морфологическому строению, но все разности почв

можно отнести к урбанозёмам. Почвенный профиль не имел классической системы горизонтов, а представлял хаотически устроенную систему, включающую большое количество антропогенных артефактов. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый.

На территории, используемой в сельско-хозяйственном назначении (ПП 7), почвы относились к агрочернозёмам глинисто-иллювиальным (PU(25 см) – AU – VI – C). По морфологическим признакам данные почвы имели типичное строение для агроценозов, антропогенных включений не обнаружено. Гранулометрический состав легкоглинистый.

Почвы фоновых участков агросерые, имели типичный для постагрогенных экосистем профиль (AУра (25 см) – AEL – BEL – BT – C). Гранулометрический состав тяжелосуглинистый.

Почвы на ПП 5 и ПП 6 имеют более щелочную реакцию почвенной среды относительно фоновой почвы, характеризующейся нейтральной реакцией (рис. 1).

Несмотря на значительные морфологические и некоторые физико-химические различия, почвы можно рассматривать в единой системе объектов эколого-функционального мониторинга для зоны воздействия КРАЗа. Содержание и распределение по профилю углерода, объемный вес рассматриваемых антропогенно-преобразованных почв сопоставимы с фоновыми почвами (рис. 1), минеральные горизонты имеют близкий (легкоглинистый, тяжелосуглинистый) гранулометрический состав, кроме того, почвы формировались в одних климатических условиях.

Содержание элементов металлов в почвах импактной зоны КРАЗа. Содержание определяемых элементов металлов в профиле техногенных почв, а также средние фоновые значения приведены на рисунке 2.

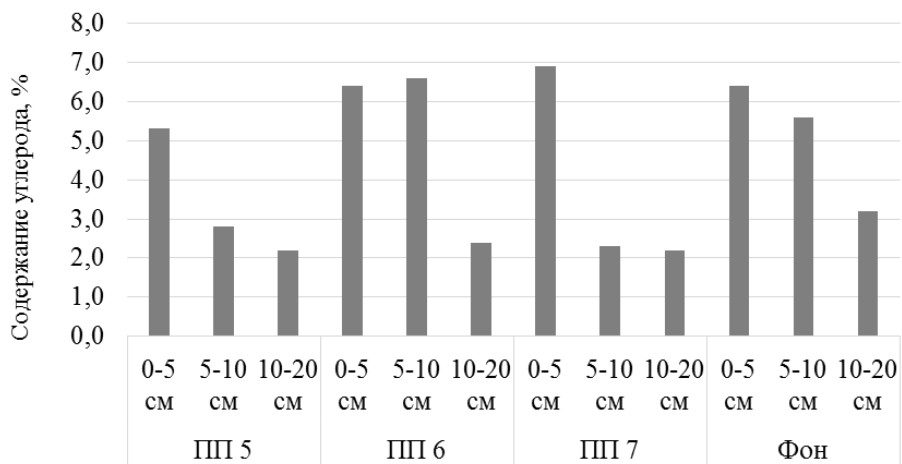
Алюминий по концентрации в земной коре занимает третье место после кислорода и кремния, составляя $80500 \text{ мг} \times \text{г}^{-1}$ (Виноградов, 1962), содержится в составе алюмосиликатов, гидратов и фосфатов, то есть в труднорастворимом состоянии. Содержание алюминия в почве не нормируется, тем не менее, отмечено негативное влияние высоких концентраций алюминия на биоту (Воробейчик и др., 1994; Самофалова, 2009). В литературе приводятся в значительной степени различающиеся значения среднего содержания алюминия в почве: $71300 \text{ мг} \times \text{кг}^{-1}$ (Виноградов, 1962), $38200 \text{ мг} \times \text{кг}^{-1}$ (Алексеевко, Алексеевко, 2014), $150\text{--}600 \text{ мг} \times \text{кг}^{-1}$ (Гашлыкова, 2008).

Валовое содержание алюминия в профиле агросерой почвы фонового участка составляло $8000\text{--}12000 \text{ мг} \times \text{кг}^{-1}$, что до 10 раз ниже кларка, но выше приведенных средних значений концентраций в почвах в 20 раз. Таким образом, целесообразно при оценке эколого-функционального состояния почв в импактной зоне КРАЗа наряду с кларком использовать именно фоновые концентрации элементов.

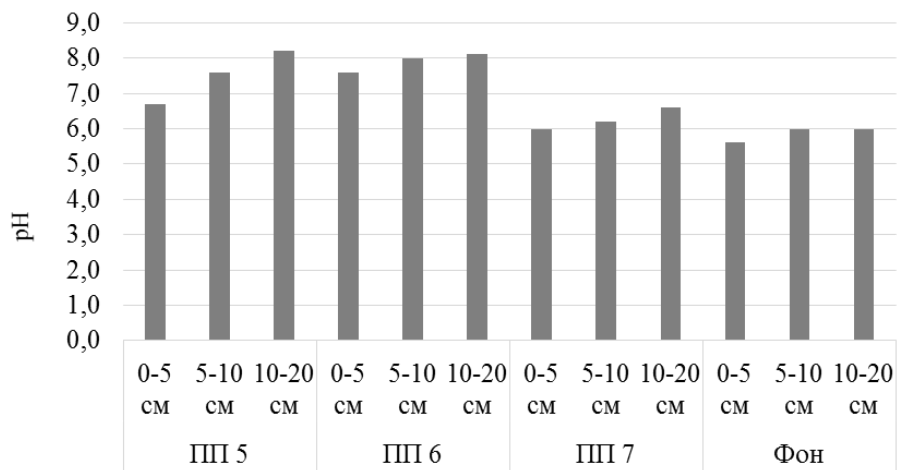
Валовое содержание алюминия в верхнем горизонте (до 5 см) абразёма на расстоянии 0,3 км от предприятия превышало уровень кларка почти в 2 раза, тогда как в верхних горизонтах техногенных почв на более удаленных ПП в пределах санитарно-защитной зоны содержание алюминия не выходило за пределы кларка. Незначительное превышение кларка наблюдалось в слое 0–2 см урбанозёма (ПП 6). В минеральных горизонтах ниже 5–7 см во всех исследованных антропогенно-преобразованных почвах превышения кларка по алюминию не наблюдалось.

Использование нормативно установленных ПДК ТМ для оценки загрязнения почв справедливо подвергалось критике (Водяницкий, 2011; Ильин, 2012) и другими. Средние значения содержания алюминия и ТМ в почвах, приведенные в литературе, значительно варьируют, поэтому в настоящее время при оценке эколого-функционального состояния почв в импактной зоне КРАЗа целесообразно проводить сравнение содержания элементов с кларком и с фоновыми концентрациями.

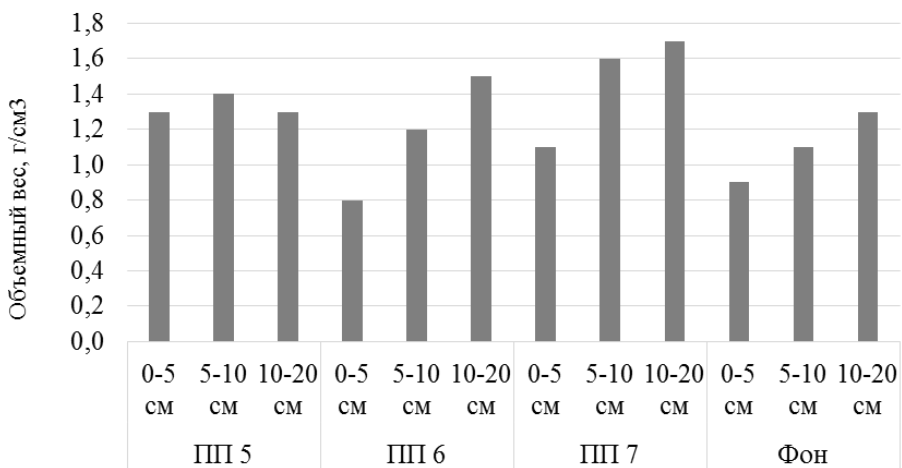
Сравнивая валовое содержание алюминия в профиле фоновой почвы с таковым в верхних слоях антропогенно-преобразованных почв, отмечено превышение его содержания в абразёме более чем в 10 раз, в верхних слоях урбанозёма и агрочернозёма – 8–9 раз. В минеральных горизонтах ниже 5–7 см во всех исследованных антропогенно-преобразованных почвах



a



б



в

Рис. 1. Содержание углерода (*a*), pH (*б*) и объемный вес (*в*) в слое 0–5 см, 5–10 см и 10–20 см техногенных почв в импактной зоне КРАЗа и в фоновой агросерой почве ПП 5 – пробная площадь 5; ПП 6 – пробная площадь 6; ПП 7 – пробная площадь 7.

валовое содержание алюминия превышало фоновое в 3–5 раз. Полученные данные позволяют говорить об обогащении почв импактной зоны алюминием по сравнению с фоновыми участками, особенно на расстоянии до 0,3 км от источника выбросов.

Повышенные концентрации алюминия в исследованных почвах могут оказывать негативное воздействие на растения, которое связано, прежде всего, с увеличением кислотности почвы и, как следствие, повышение мобильности и доступности для растений ТМ (Колесников и др., 2006). Исследованные почвы в импактной зоне КраЗа имели нейтральную (ПП 7) либо слабощелочную среду (ПП 5, ПП 6), которая изменялась по профилю в пределах 0,5 ед., что предопределяет неподвижность форм алюминия (рис. 1). Тем не менее, высокие концентрации валового алюминия обуславливают потенциальную опасность загрязнения почв. Так, в абразёмах на расстоянии 0,3 км от источника выбросов на ПП 5 в верхней органо-аккумулятивной части почвенного профиля до глубины 5–6 см, где отмечено наиболее высокое содержание алюминия, реакции почвенной среды нейтральная – слабокислая (рис. 1), что может уже влиять на подвижность алюминия в почвенном профиле.

Все исследуемые элементы, за исключением кобальта, имели техногенно-аккумулятивный характер распределения по профилю почв, аккумулируясь на глубине от 2 до 6 см (рис. 2), что подтверждает мнение о накоплении ТМ органической частью почвы (Gupta, 1992; Благодатская и др., 2008; Водяницкий, 2013). Металлы по общему содержанию в исследованных почвах образуют убывающий ряд: $Al > Zn > Ni > Cu > Pb > Cd$.

На основании расчета кларка концентрации (отношения концентраций элементов в почвах к их кларку) установлено значительное обогащение почв алюминием и ТМ в верхней части почвенного профиля. Так в верхнем слое почвенного профиля абразёма (до 5–7 см) на ближней к источнику выбросов пробе отмечалось максимальное превышение концентрации ТМ по отношению к кларку: меди в 16 раз, кадмия – в 8 раз, никеля – в 2,5 раза, алюминия – в 1,6 раза. По кларку концентрации элементы образуют убывающий ряд $Cu > Cd > Ni > Al > Pb > Zn$.

Выявлено значительное превышение содержания элементов в исследуемых почвах относительно фоновых участков (рис. 2). В органогенных горизонтах максимальное превышение алюминия в 10,9 раз, никеля – в 10,2 раза, свинца – в 9,7 раза, меди в 9,5 раз, кадмия – в 9,4 раз, цинка – в 5,7 раз. В верхних минеральных горизонтах максимальное превышение составляет для меди в 45 раз, алюминия – в 13 раз, никеля – в 5,3 раза, кадмия – в 4,4 раза, свинца – в 4,1 раза, цинка – в 1,8 раз (на ПП 6 – в 6,5 раз). В нижних минеральных горизонтах максимальное превышение содержания алюминия в 6 раз, цинка – в 5,5 раз, кадмия – в 2,5 раза, меди в 2,3 раза, свинца – в 2,3 раза, никеля – в 1,5 раза.

Все обследованные почвы в 3 км зоне, примыкающей к предприятию, содержали повышенное количество алюминия, меди, никеля и др. элементов в верхних горизонтах. Их количество превышало фоновые значения более, чем в 3 раза, поэтому данные почвы можно относить к химически-преобразованным почвам.

Структурно-функциональные особенности микробоценозов почв в импактной зоне КраЗа. Поступающие в почву алюминий и соединения ТМ, участвуют в почвообразовательном процессе, включаясь в трофические цепи, значительно сокращают активную микробную биомассу и численность разных эколого-трофических групп микроорганизмов, вызывая микробостатический эффект, ингибируют процессы минерализации и синтеза органических веществ (Brooks, 1995; Евдокимова, Зенкова, 2003; Никитина, Голодяев, 2003; Евдокимова и др., 2013).

В абразёме ближней к КраЗу ПП 5 отмечен перевернутый профиль по распределению содержания $S_{\text{мик}}$ – низкое содержание в верхнем слое почвы (150–240 мкг $C \times \Gamma^{-1}$) и увеличение на глубине 7–15 см до 600–1000 мкг $C \times \Gamma^{-1}$ (рис. 3а). Содержание $S_{\text{мик}}$ в верхней 20 см части профиля абразёма имело тесную связь с влажностью ($r = -0,77$) и pH ($r = 0,86$). В профиле урбанозёма на удалении 1,5 км от источника выбросов (ПП 6) наибольшее содержание $S_{\text{мик}}$ отмечено в верхнем слое (1015 мкг $C \times \Gamma^{-1}$), при этом с глубиной снижается незначительно и имеет высокую вариабельность, что связано с неоднородностью сложения и перемешиванием

Содержание тяжелых металлов и микробиологическая характеристика почв
в импактной зоне Красноярского алюминиевого завода

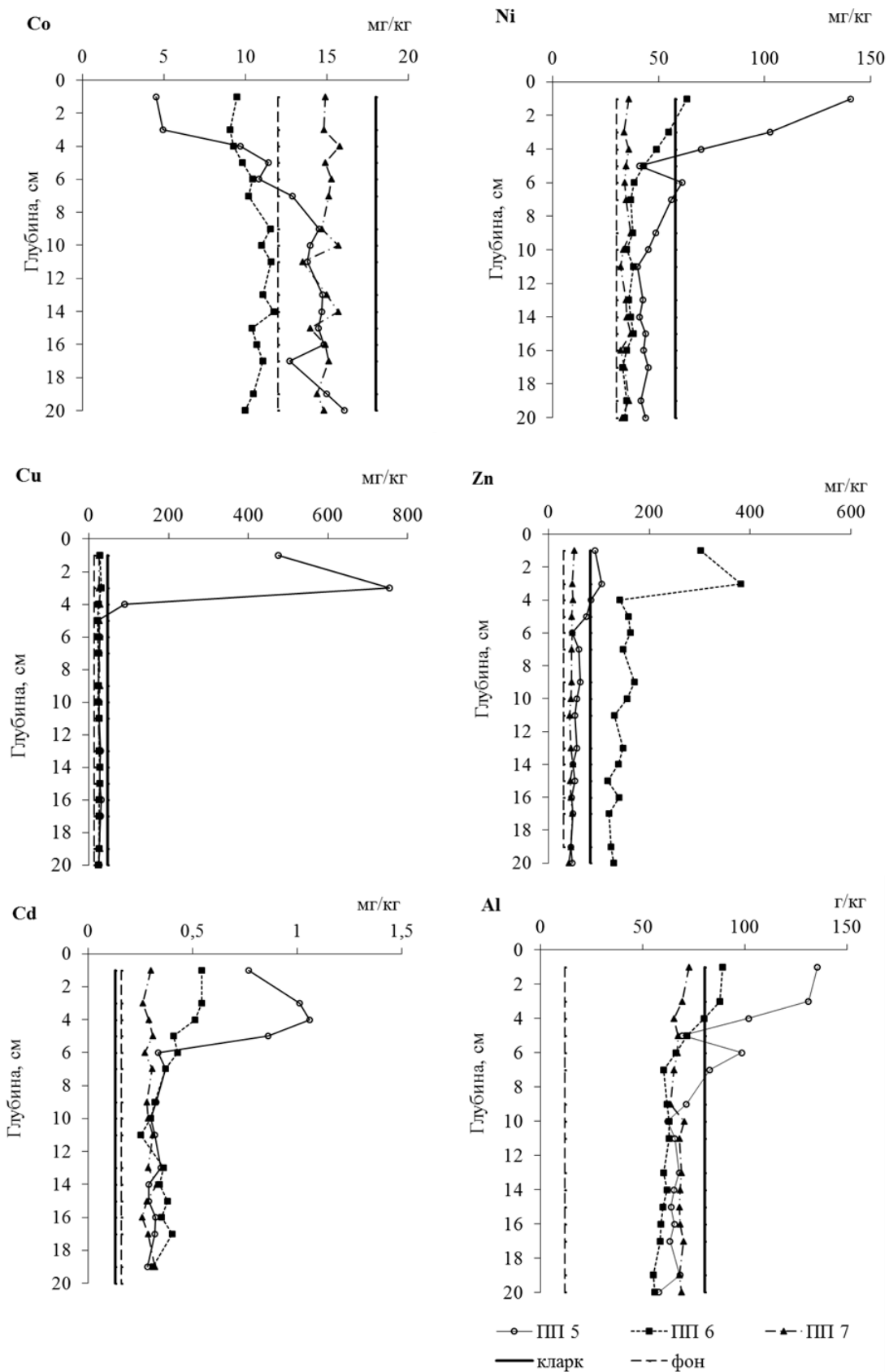


Рис. 2. Валовая концентрация элементов в почвах в импактной зоне КРАЗа

грунта с антропогенными артефактами. Распределение $C_{\text{мик}}$ в верхней 20 см части профиля отрицательно коррелировало с рН ($r=-0,57$) и не имело достоверной связи с другими физическими свойствами почвы. В агрочернозёме луга злакового наиболее удаленной ПП 7 максимальное содержание $C_{\text{мик}}$ в верхнем слое (1560–850 мкг $C \times g^{-1}$) и плавное снижение по профилю, что характерно для почв естественных ценозов (рис. 3а). Значимые связи $C_{\text{мик}}$ с влажностью ($r=0,88$), плотностью сложения ($r=-0,86$) и рН ($r=-0,72$) агрочернозёма отражают устойчивый характер распределения микробного компонента в профиле почвы.

Интенсивность БД не соответствовала профильному распределению $C_{\text{мик}}$ в верхнем слое 0–5 см абразёма ($r=-0,42$) и снижалась с глубиной на всех ПП, наиболее плавно в профиле агрочернозёма ПП 7, что соответствовало распределению содержания $C_{\text{мик}}$ ($r=0,97$) (рис. 3б). В верхнем 0–5 см слое абразёма (ПП 5) низкому содержанию $C_{\text{мик}}$ соответствовала высокая интенсивность БД (1,25–2,92 мкг $C-CO_2 \times (g \times ч)^{-1}$), что характерно для почв, загрязненных ТМ (Brooks, 1995; Ананьева, 2003; Благодатская и др., 2008; Богородская и др., 2012; Терехова и др., 2021). Увеличение дыхания может быть объяснено реакцией микробоценоза на преодоление стресса, когда повышаются энергетические затраты на поддержание пула микробной биомассы (Insam et al., 1996; Ананьева, 2003; Благодатская и др., 2008). Интенсивность БД в профиле абразёма имела достоверную зависимость только от влажности ($r=0,87$), тогда как в урбанозёме и агрочернозёме высокая корреляция обнаружена с влажностью ($r=0,91$, $0,86$ соответственно), плотностью сложения ($r=-0,75$, $-0,80$) и рН ($r=-0,92$, $-0,70$).

Экофизиологические параметры микробоценозов ($C_{\text{мик}}$ и БД) имели высокую взаимосвязь с содержанием ТМ в верхней 20 см части профиля абразёма и урбанозёма. Так, обнаружена тесная отрицательная связь $C_{\text{мик}}$ с валовым содержанием Al, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Co ($r= -0,84$, $-0,63$, $-0,54$, $-0,75$, $-0,74$, $-0,86$, $-0,83$ и $-0,81$) и положительная корреляция интенсивности БД с теми же элементами, кроме Co в верхней части профиля абразёма ($r= 0,79$, $0,92$, $0,66$, $0,65$, $0,77$, $0,62$, $0,51$, $-0,77$). При этом полученные степенные зависимости $C_{\text{мик}}$ от валового содержания алюминия ($R^2= 0,80$), кадмия ($R^2= 0,82$) и свинца ($R^2= 0,83$) показывают влияние техногенной аккумуляции ТМ, максимальное количество которых содержат верхние органо-минеральные слои абразёма, на пул активной микробной биомассы (рис. 4а). Интенсивность БД абразёма имела логарифмический рост от валового содержания алюминия, никеля и цинка ($R^2= 0,64$, $0,75$, $0,61$) (рис. 4б).

Распределение $C_{\text{мик}}$ по верхней 20 см части профиля урбанозёма менее связано с валовым содержанием ТМ: отрицательная корреляция обнаружена только для Co ($r= -0,70$) и положительная для Ni и Cd ($r= 0,61$, $0,66$). Линейная связь $C_{\text{мик}}$ с валовым содержанием Co, Ni и Cd в профиле урбанозёма более слабая ($R^2= 0,54$, $0,54$, $0,47$), чем в абразёме ближней к КРАЗу ПП 5 (рис. 5а). Интенсивность БД в верхней 20 см части профиля урбанозёма положительно коррелировала с валовым содержанием Al, Ni, Zn, Pb, Cd и отрицательно с Co ($r= 0,92$, $0,94$, $0,71$, $0,93$, $0,83$, $-0,64$) и имела достоверный логарифмический рост от валового содержания алюминия, никеля и свинца ($R^2= 0,83$, $0,89$, $0,86$) (рис. 5б). Таким образом, полученные зависимости показывают рост интенсивности БД от высоких значений валового содержания некоторых ТМ и алюминия в профиле абразёма и урбанозёма, что выше отмечено разными авторами для почв, загрязненных ТМ.

В агрочернозёме наиболее удаленной ПП 7 достоверных зависимостей рассматриваемых экофизиологических параметров микробоценоза от валового содержания ТМ в профиле не обнаружено.

Наиболее высокая численность гетеротрофных микроорганизмов, максимальная в верхних слоях с плавным снижением ее по профилю, отмечена в агрочернозёме злакового луга (ПП 7) (рис. 6). В верхних слоях агрочернозёма высока численность микроорганизмов, использующих органический и минеральный азот, с выраженной тенденцией преобладания последних, что отражает как высокую напряженность процесса минерализации органического вещества, так и может свидетельствовать о быстром вовлечении продуктов распада растительных остатков в биологический круговорот, что характерно для почв

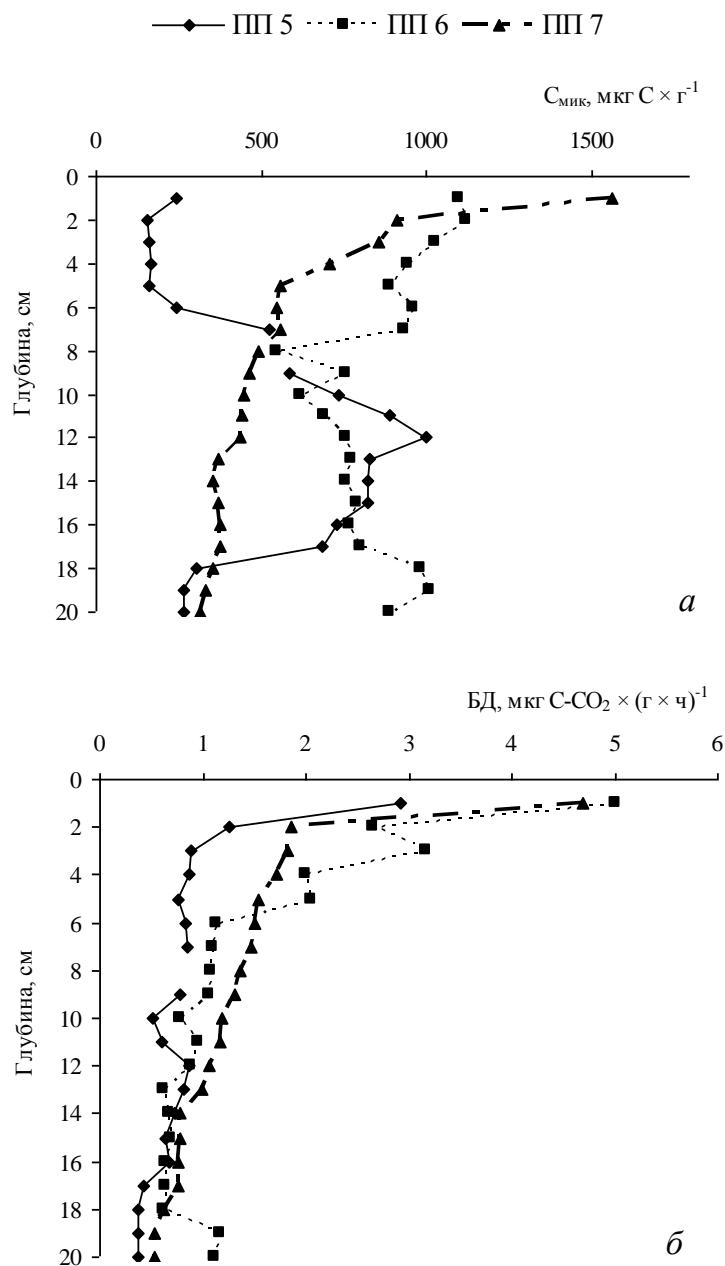


Рис. 3. Распределение содержания углерода микробной биомассы ($C_{мик}$) (а) и интенсивности базального дыхания (БД) (б) по профилю техногенных почв в импактной зоне КРАЗа

агроценозов (Ившина и др., 2014). В верхних слоях агрочернозёма численность олигонитрофилов достигала $4 \text{ млн. КОЕ } г^{-1}$ и превышала количество аммонификаторов на протяжении всего изученного профиля. Олигонитрофилы играют важную роль в поддержании запасов азота в почве, что обусловлено их способностью извлекать низкие концентрации азота, присутствующих в почве в «рассеянном» состоянии. Численность олигонитрофилов находится в прямой зависимости от концентрации в почве органического вещества и приурочена к гумусированным горизонтам (Никитина, Голодяев, 2003). Резкое преобладание олигонитрофилов над аммонификаторами наблюдается при поступлении растительных остатков, развитие которых стабилизируют соотношение C:N почвы. Количество олиготрофов преобладает над численностью аммонификаторов и это

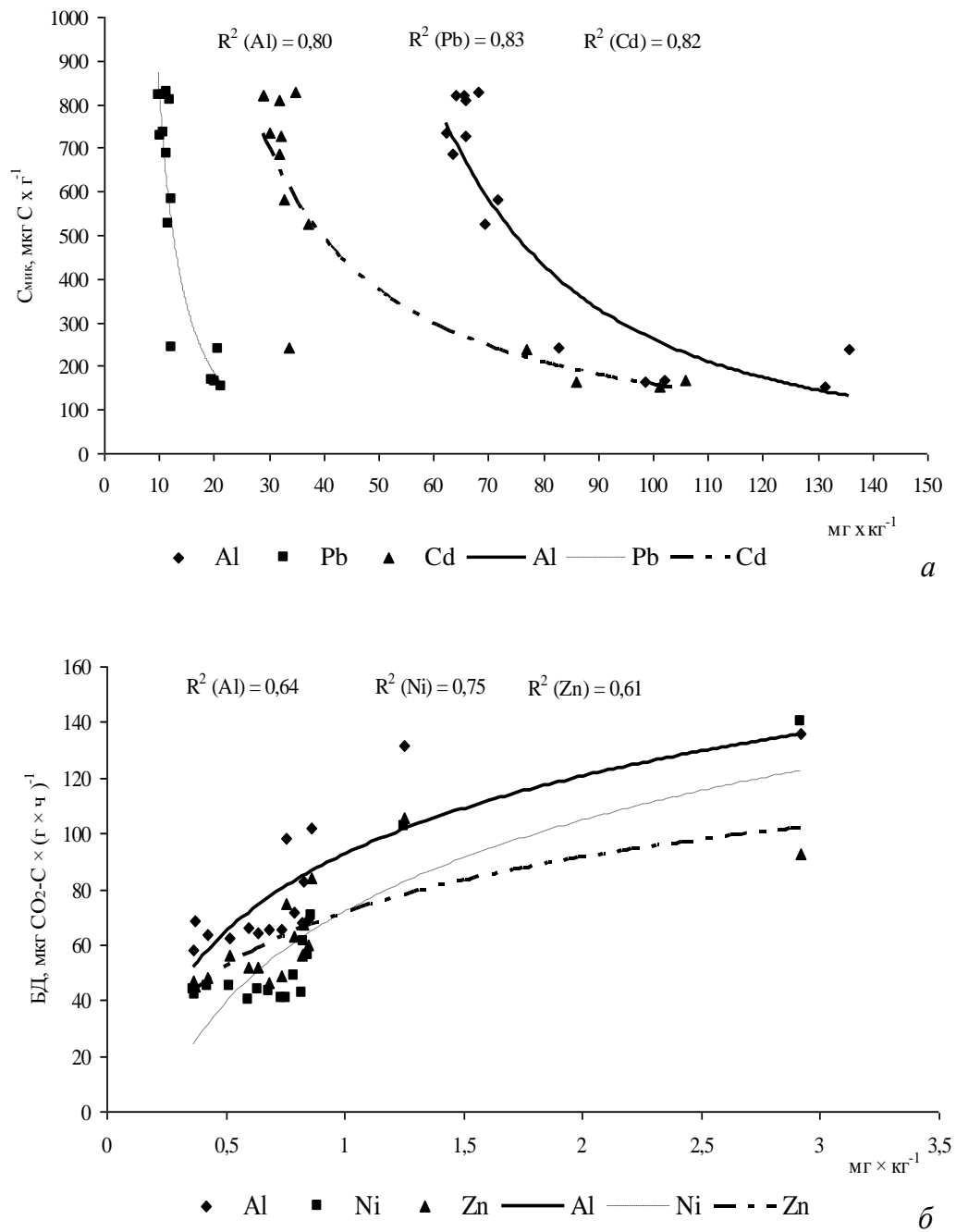


Рис. 4. Зависимость содержания углерода микробной биомассы (а) и интенсивности базального дыхания (б) от валового содержания ТМ в абразёме
 R^2 – величина достоверности аппроксимации. Для алюминия концентрации приведены в $г \times кг^{-1}$.

соотношение увеличивается с глубиной, что связано со снижением трофности почвы. В целом, в почвах импактной зоны КрАЗа количество олигонитрофильных и олиготрофных микроорганизмов в 4–16 раз ниже, чем в агросерой почве постагрогенного луга контрольного участка, удаленного от аэротехногенного воздействия КрАЗа (рис. 6). В агрочернозёме низкое количество микромитозов, что характерно для луговых ценозов.

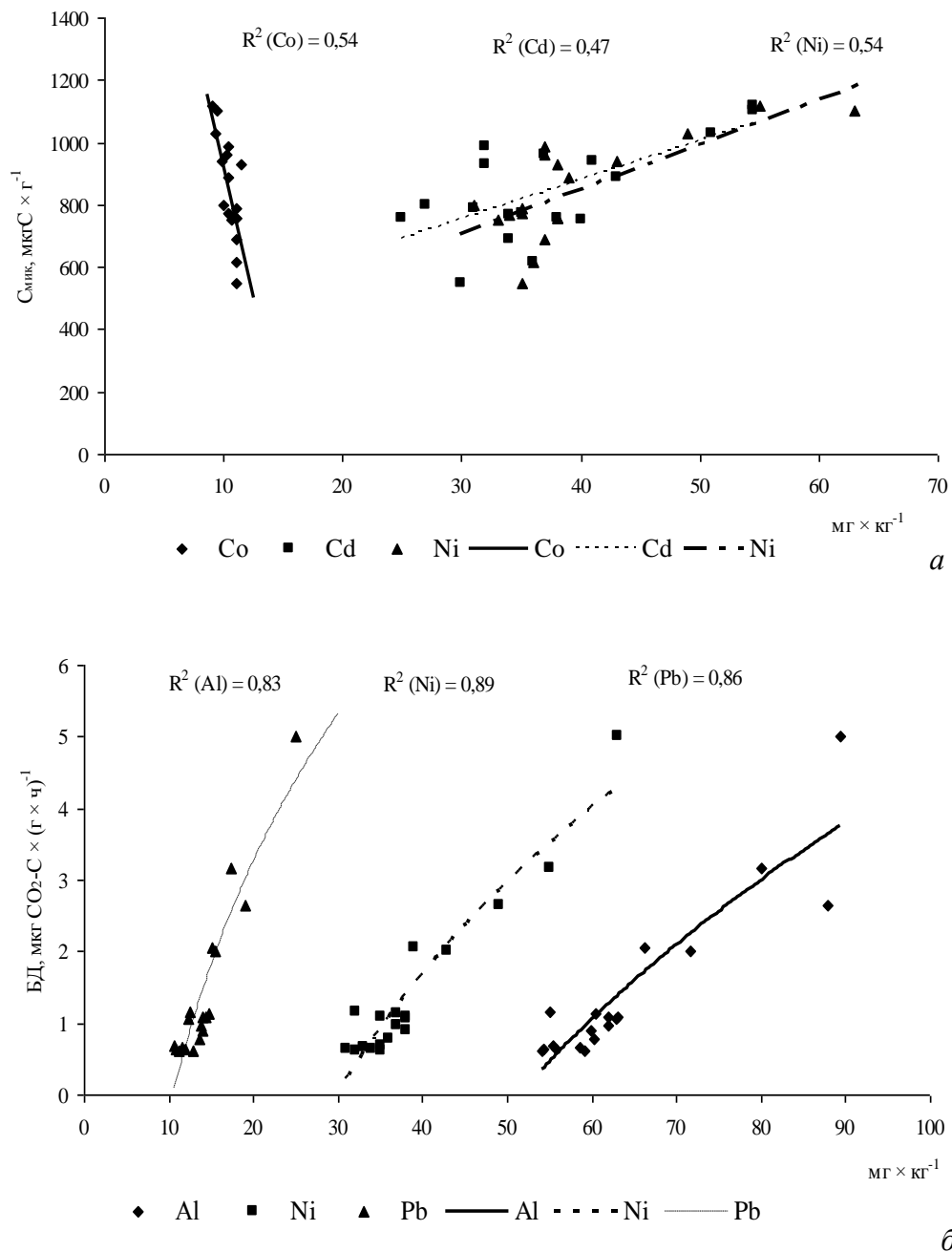


Рис. 5. Зависимость содержания углерода микробной биомассы (а) и интенсивности базального дыхания (б) от валового содержания ТМ в урбанозёме R^2 – величина достоверности аппроксимации. Для алюминия концентрации приведены в $г \times кг^{-1}$.

Абразём ближней к источнику выбросов ПП 5 характеризовался самой низкой суммарной численностью гетеротрофных микроорганизмов в верхнем 0–5 см слое и заметным ее возрастанием в нижележащем (рис. 6). Данное утверждение наиболее наглядно отражает численность аммонификаторов, олиготрофов и олигонитрофилов, зависящих от присутствия доступного органического вещества. Низкая численность олигонитрофилов в

верхнем 0–5 см слое абразёма, не превышающая количество аммонификаторов по всему исследуемому профилю, свидетельствует о повышенной чувствительности этой группы микроорганизмов к ТМ. Отмечено, что наиболее чувствительными к загрязнению почвы ТМ являются аммонифицирующие, олигонитрофильные, некоторые споровые бактерии и актиномицеты (Никитина, Голодяев, 2003; Благодатская и др., 2008; Евдокимова и др., 2013). В большей степени устойчивы к загрязнению целлюлозолитические бактерии (Евдокимова, Зенкова, 2003), и использующие минеральный азот (Никитина, Голодяев, 2003; Благодатская и др., 2008; Евдокимова и др., 2013).

Численность бактерий, использующих минеральный азот, оставалась примерно одинаковой в верхней части профиля абразёма, превышая количество аммонификаторов в 2–6 раз, что свидетельствует о высокой напряженности процесса микробиологической минерализации органических соединений. Численность олиготрофов заметно повышалась с глубиной почвы и превышала количество аммонификаторов, что свидетельствует о снижении трофности почвы. В верхнем 0–5 см слое абразёма высокая численность микромицетов, достигающая 0,6 млн г⁻¹, также снижалась с глубиной. Это может быть следствием как подкисления на 1–1.5 ед. верхних горизонтов абразёма (рис. 1б), так и повышенной устойчивостью микромицетов к воздействию ТМ, что объясняется как их физиологическими особенностями, так и выделением в процессе жизнедеятельности органических кислот, которые нейтрализуют токсическое действие ТМ, образуя с ними комплексы, менее токсичные, чем свободные ионы (Евдокимова и др., 2013). В верхних слоях абразёма соотношение грибы/бактерии увеличивалось по сравнению с агрочернозёмом ПП 7 в 5 раз, что может являться индикатором загрязнения почв ТМ (Евдокимова, Зенкова, 2003).

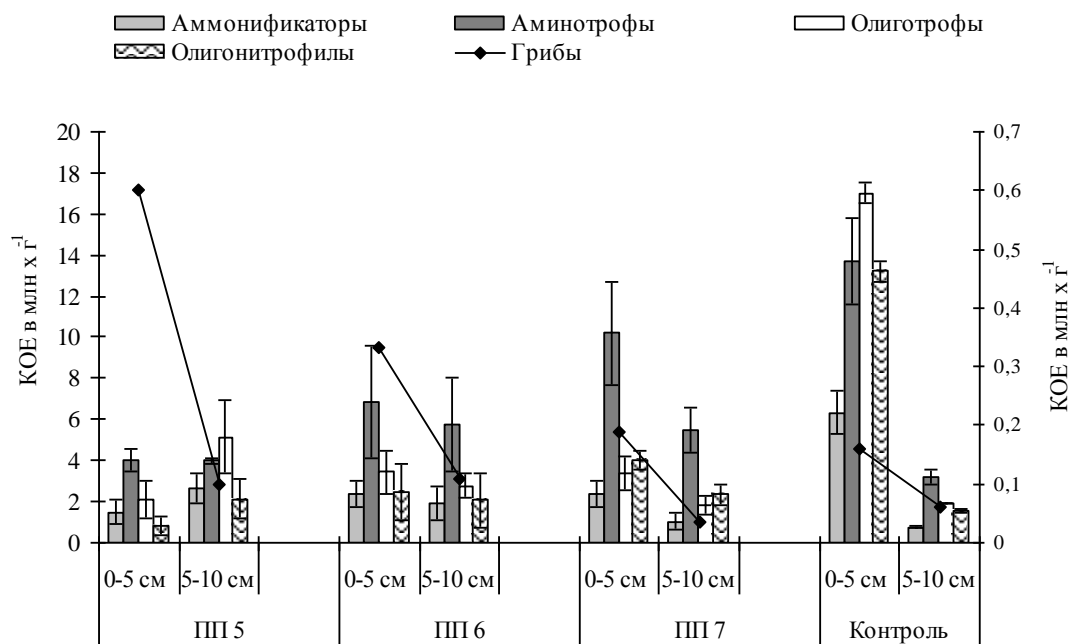


Рис. 6. Численность разных функциональных групп микроорганизмов в техногенных почвах импактной зоны КРАЗа

Численность всех функциональных групп микроорганизмов в верхнем 0–5 см слое урбаноёма (ПП 6) выше, чем в абразёме и сравнима с таковой в агрочернозёме (ПП 7), но ниже контроля в 2–5 раз (рис. 6). При этом с глубиной не отмечено значительного снижения численности микроорганизмов, что связано с отсутствием дифференциации почвенного профиля. Количество КОЕ микроскопических грибов снижается по сравнению с абразёмом, но выше, чем в агрочернозёме и контроле.

Таким образом, численность и соотношение функциональных групп микроорганизмов в техногенных почвах демонстрируют отклик микробоценоза на загрязнение высокими дозами ТМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвенный покров исследованной импактной зоны КраЗа (до 3 км) преимущественно представлен антропогенно-преобразованными почвами и техногенными почвенными образованиями (абразёмами, урбанозёмами, агрочернозёмами), тогда как почвы с ненарушенным строением профиля занимают очень незначительную часть территории. Все почвы импактной зоны КраЗа содержат повышенное количество алюминия, меди, никеля и др. элементов в верхних горизонтах, распределение элементов в почвенном профиле носит техногенно-аккумулятивный характер. Элементы по валовой концентрации образуют убывающий ряд: $Al > Zn > Ni > Cu > Pb > Cd$, тогда как по кларку концентрации – $Cu > Cd > Ni > Al > Pb > Zn$.

Наибольшей сбалансированностью функциональной активности микробоценоза и высокой численностью микроорганизмов разных функциональных групп характеризуется агрочернозём злакового луга удаленной на 3 км от КраЗа пробы. В верхнем 5 см слое абразёма на расстоянии 0,3 км от источника выбросов значительно снижена численность аммонификаторов, олигонитрофилов и олиготрофов, содержание $S_{\text{мик}}$ минимально и не превышает 150–240 мкг $C \times g^{-1}$. Высокая численность микроскопических грибов и преобладание минерализационных процессов над иммобилизационными свидетельствует о стрессовых условиях для микробоценоза при загрязнении почвы ТМ. Высокие значения валового содержания ТМ и алюминия ближайших к КраЗу пробных площадей (0,3–1,5 км) оказывают достоверное влияние на содержание $S_{\text{мик}}$ и увеличивают интенсивность БД в профиле абразёма и урбанозёма, что свидетельствует о стрессе микробного сообщества.

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам Института минералогии УрО РАН Г. Ф. Лонщаковой, Л. Г. Удачиной за пробоподготовку почв и с.н.с., к.г.–м.н. К. А. Филипповой за выполнение анализа почв методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 0287–2021–0010, номер НИОКТР 121030900181–4.

Список литературы

- Алексеев В. А., Алексеев А. В. Химические элементы в городских почвах. – М.: Логос, 2014. – 312 с.
- Ананьева Н. Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. – М.: Наука, 2003. – 222 с.
- Благодатская Е. В., Пампура Т. В., Богомолова И. Н., Копчик Г. Н., Лукина Н. В. Влияние выбросов медно-никелевого комбината на микробные сообщества почв лесных биогеоценозов Кольского полуострова // Известия РАН. Серия биологическая. – 2008. – № 2. – С. 232–242.
- Богородская А. В., Пономарева Т. В., Шапченкова О. А., Шишкин А. С. Оценка состояния микробных комплексов почв лесотундровой зоны в условиях аэротехногенного загрязнения // Почвоведение. – 2012. – № 5. – С. 582–593.
- Васильева Л. И., Кадацкий В. Б. Формы тяжелых металлов в почвах урбанизированных и заповедных территорий // Геохимия. – 1998. – № 4. – С. 426–429.
- Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
- Водяницкий Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. – 2013. – № 7. – С. 872–881.
- Водяницкий Ю. Н. Концепция гибкого подхода к оценке ориентировочно допустимой концентрации тяжелых металлов и металлоидов в почве // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2011. – Вып. 67. – С. 49–66.
- Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. – Екатеринбург: УИФ «Наука», – 1994. – 281 с.

Давыдова Н. Д. Динамика поступления поллютантов от алюминиевого завода и их распределение в почвах южной тайги // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 8 (часть 2). – С. 203–207.

Демиденко Г. А., Васильева Т. В. Экотоксикологическая оценка почв в окрестностях алюминиевого завода города Красноярск методами биотестирования // *Вестник КрасГАУ*. – 2016. – № 9. – С. 44–52.

Демиденко Г. А., Миронов А. Г., Жбанчиков Д. О. Загрязнение фтором сельскохозяйственных земель и растений в зоне влияния производственной деятельности алюминиевого завода // *В мире научных открытий*. – 2016. – № 2 (74). – С. 148–158.

Евдокимова Г. А., Зенкова И. В. Влияние выбросов алюминиевого завода на биоту почв Кольского полуострова // *Почвоведение*. – 2003. – № 8. – С. 973–979.

Евдокимова Г. А., Корнейкова М. В., Мозгова Н. П. Изменения свойств почв и почвенной биоты в зоне воздействия аэротехногенных выбросов Кандалакшского алюминиевого завода // *Почвоведение*. – 2013. – № 10. – С. 1274–1280.

Ившина И. Б., Костина Л. В., Каменских Т. Н., Жуйкова В. А., Жуйкова Т. В., Безель В. С. Почвенный микробиоценоз как показатель стабильности луговых сообществ при химическом загрязнении среды тяжелыми металлами // *Экология*. – 2014. – № 2. – С. 83–90.

Ильин В. Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва-растение. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 220 с.

Качинский Н. А. Физика почв. Т. 1. – М.: «Высшая школа», 1965. – С. 155–161.

Колесников С. И., Казеев К. Ш., Вальков В. Ф. Экологическое состояние и функции почв в условиях химического загрязнения. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростиздат? 2006. – 385 с.

Кремленкова Н. П., Гапонюк Э. И., Кабалина Л. Н. Особенности распределения техногенного фтора в почвах Красноярской лесостепи // *Труды Института экспериментальной метеорологии*. – 1991. – Вып. 20 (153). – С. 110–122.

Крупкин П. И., Косицина А. А. К вопросу о загрязнении фтором почв пригородной зоны г. Красноярск // *Вестник КрасГАУ*. – 2006. – № 10. – С. 162–169.

Методы почвенной микробиологии и биохимии / [Ред. Д. Г. Звягинцев]. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 304 с.

Министерство экологии и рационального природопользования Красноярского края. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mpr.krskstate.ru/presscentr/0/news/88037> (просмотрено 22.04.2022).

Никитина З. И., Голодяев Г. П. Экология микроорганизмов и санация почв техногенных территорий. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 179 с.

Самофалова И. А. Химический состав почв и почвообразующих пород. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2009. – 132 с.

Скрипальщикова Л. Н., Грешилова Н. В., Стасова В. В., Пляшечник М. А. Аккумулирующая способность и стабильность развития березняков разнотравных в зоне промышленных выбросов // *Вестник Крас ГАУ*. – 2016. – № 7. – С. 41–47.

Соколова О. Я., Стряпков А. В., Антимонов С. В., Соловых С. Ю. Влияние техногенного воздействия на содержание валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почвах // *Вестник ОГУ. Т. 2. Естественные науки*. – 2006. – № 2. – С. 35–42.

Соколова Т. А., Толпешта И. И., Трофимов С. Я. Почвенная кислотность. Кислотно-основная буферность почв. Соединения алюминия в твердой фазе почвы и в почвенном растворе: учебное пособие по некоторым главам курса химии почв. – Тула: Гриф и К, – 2007. – 96 с.

Строганова М. Н., Мягкова А. Д., Прокофьева Т. В. Городские почвы: генезис, классификация, функции // *Почва. Город. Экология* / [Под ред. Добровольского Г. В.]. – М.: Фонд «За экономическую грамотность», 1997. – С. 15–85.

Ташлыкова Е. Е. Оценка содержания тяжелых металлов в почвах пригородной зоны г. Красноярск // *Вестник КрасГАУ*. – 2008. – № 3. – С. 184–189.

Терехова В. В., Прудникова Е. В., Кулачкова С. А., Горленко М. В., Учанов П. В., Сушко С. В., Ананьева Н. Д. Микробиологические показатели агродерново-подзолистых почв разной гумусированности при внесении тяжелых металлов и углеродсодержащих препаратов // *Почвоведение*. – 2021. – № 3. – С. 372–384.

ФР.1.29.2006.02149: «Методика выполнения измерений содержания элементов в твердых объектах методами спектрометрии с индуктивно связанной плазмой». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293777/4293777593.htm> (просмотрено 15.09.2018)

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

Anderson T.-H., Domsh K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1978. – Vol. 10. – P. 215–221.

Brooks P. C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals // *Biology and Fertility of Soils*. – 1995. – Vol. 19, N 4. – P. 269–279.

Gupta S. K. Mobilizable metal in anthropogenic contaminated soils and its ecological significance // *In Impact of heavy metals on the environment*. – (Ed.): J. P. Vernet. – 1992. – P. 299–310.

Insam H., Hutchinson T. C., Reber H. H. Effect of heavy metal stress on the metabolic quotient of soil microflora // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1996. – Vol. 28, N 4–5. – P. 691–694.

Ponomareva T. V., Bogorodskaya A. V. Content of heavy metals and microbiological characteristics of soils in the impact zone of Krasnoyarsk aluminum plant // Ekosistemy. 2022. Iss. 32. P. 90–105.

Anthropogenically transformed soils (agrochernozeems (*Anthrosols*), abrazems and urbanozeems (*Technosols*) on the territory adjacent to the Krasnoyarsk Aluminum Plant within the sanitary protection zone were studied. Based on the results of a detailed analysis of the total content of elements with a step of 1 cm in depth, the nature of the distribution of the content of aluminum and heavy metals (HM) in the upper 20 cm soil layer was revealed, which was compared with clarkes of elements and their content in control soils. It was determined that the maximum excess of the concentration of HM in the soil with respect to the clarkes in the near zone of impact of the enterprise at a distance of 0,3 km was 16 times for copper, 8 times for cadmium, 2,5 times for nickel, and 1,6 times for aluminum. The studied soils contained more than 3 times the amount of aluminium, copper, nickel and other elements in the upper horizons, therefore, these soils can be classified as chemically transformed soils. In the abrazem profile at a distance of 0.3 km from the enterprise, in the upper 5 cm layer, the minimum content of carbon of microbial biomass (150–240 $\mu\text{g C g}^{-1}$), high intensity of basal respiration (1,25–2,92 $\mu\text{g C-CO}_2 \times (\text{g} \times \text{h})^{-1}$), as well as significant structural and functional changes in the heterotrophic complex of microbiocenosis were recorded. The high values of the total content of HM and aluminum in the nearest impact zone up to 1.5 km had a significant effect on the content of carbon of microbial biomass and increased of the intensity of basal respiration in the profile of abrazem and urbanozem, which indicates the stress of the microbial community.

Key words: anthropogenically transformed soils, *Anthrosols*, *Technosols*, aluminum, heavy metals, soil microbial complexes.

Поступила в редакцию 10.10.22
Принята к печати 30.12.22

УДК [574.5:581.526.44](262.54.04)

Макрозооэпифитон макрофитов мелководья Керченского пролива и прибрежной зоны Таманского полуострова

Копий В. Г., Бондаренко Л. В., Тимофеев В. А., Подзорова Д. В., Макаров М. В.,
Ковалёва М. А.

Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН
Севастополь, Россия

verakopiy@gmail.com; bondarenko.luda@gmail.com; tamplier74@mail.ru; podzorova@imbr-ras.ru;
mihaliksevast@inbox.ru; kovalmargarita@mail.ru

В основу работы положены материалы, собранные на мелководье Керченского пролива и прибрежной зоны Таманского полуострова в сентябре 2019 года. Фитоценоз представлен макрофитами *Ericaria crinita*, *Ulva* sp., *Zostera* sp., *Stuckenia* sp., *Ceramium* sp., *Ruppia* sp., *Zannichelia* sp., зарослями *Ruppia* sp.+*Zostera* sp. и *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. В акватории Камыш-Бурунской бухты обнаружено 6 видов макрофитов, поселка Сенной – 2 вида, портов Крым и Кавказ – по одному виду. В их зарослях обнаружены 56 видов макрозооэпифитона, включающих Polychaeta (13 видов), Crustacea (23), Mollusca (14) и не идентифицированных до вида представителей таксонов Ascidiidae, Chironomidae, Platyhelminthes, Nemertea и Actiniidae. Максимальное количество видов макрозообентоса отмечено на *E. crinita* (39), далее следуют заросли *Ruppia* sp.+*Zostera* sp. (23), *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. (22), *Ulva* sp. (21), *Stuckenia* sp. и *Zostera* sp. (по 19), *Zannichelia* sp. (17), *Ceramium* sp. (15), *Ruppia* sp. (4). Высокий показатель коэффициента Чекановского-Сёренсена отмечен для зооэпифитона, обнаруженного в зарослях *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. – *Stuckenia* sp. (0,8), *Stuckenia* sp. – *Ruppia* sp.+*Zostera* sp. (0,7) и *Ulva* sp. – *Stuckenia* sp. (0,7). Наименее сходны по видовому составу животные, обитающие в скоплениях макрофитов *Ceramium* sp. – *Ruppia* sp. (0,1), *Ceramium* sp. – *Zostera* sp. (0,2), *Ceramium* sp. – *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. (0,2). Средние значения численности и биомассы всего макрозооэпифитона составили 10762±4080 экз./кг и 107,644±61,089 г/кг соответственно. Максимальная численность гидробионтов отмечена в зарослях макрофитов *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. (29978 экз./кг), биомасса – в *Ceramium* sp. (165,208 г/кг). Макрозооэпифитон фитоценозов представлен фитофагами, детритофагами, полифагами и плотоядными. Наибольшее количество видов относится к фитофагам, самая малочисленная группа – детритофаги.

Ключевые слова: макрофиты, макрозооэпифитон, численность, биомасса, Керченский пролив, Чёрное море.

ВВЕДЕНИЕ

Основными первичными продуцентами органического вещества в прибрежных морских экосистемах являются бурые, красные, зелёные многоклеточные водоросли и травы, обеспечивающие бентосное сообщество органическим веществом. Зарослевые биоценозы имеют наиболее динамичную структуру, поскольку находятся под прессом не только природных, но и антропогенных факторов. Верхние отделы береговой зоны (супралитораль, псевдолитораль и верхняя сублитораль) испытывают максимальное опреснение, воздействие волн и загрязнение, и именно для малых глубин (до 3–5 м) характерно наибольшее разнообразие макрофитов (Никитина, Лисовская, 2013).

Динамика подводной растительности во многом определяет изменения в донных сообществах, их распределение и запасы. Сообщества морских трав и водорослей рассматриваются как индикаторы долговременных климатических и антропогенных изменений в водоёмах (Minicheva, 2018). Макрофиты – особенный компонент биоценозов, выполняющий функцию субстрата и биотического компонента одновременно. На их талломах поселяются эпифитные водоросли, сессильные и эррантные животные – панцирные, двустворчатые и брюхоногие моллюски, мшанки, губки, полихеты, ракообразные (Зернов, 1913; Маккавеева, 1979). В зарослях макрофитов создаются благоприятные условия для обитания большого количества организмов разнообразной трофической принадлежности.

Известно, что животные используют макрофиты не только как убежище, источник питания и среду для размножения, но и их биотическое взаимодействие способствуют процессу оплодотворения водорослей (Маккавеева, 1979; Colin et al., 2022)

Макрозообентос, обитающий в зарослях макрофитов (зооэпифитон) у берегов Крыма и Кавказа исследован неполно. Наиболее изучены гидробионты, обитающие на цистозире, в меньшей мере, на zostере и некоторых других макрофитах (Маккавеева, 1979; Киселева, 2009; Макаров, 2018; Макаров и др., 2020; Макаров и др., 2022). Зооэпифитон исследовали в районах западного, юго-западного, южного берегов Крыма и в акватории Карадага (Маккавеева, 1979, 1992; Киселева, 2009). В Керченском проливе и прилегающей к нему юго-восточной части Азовского моря макрозообентос в эпифитоне макрофитов ранее не изучали, за исключением исследований в районе мыса Такиль летом 2013 года (Макаров, 2020). Гидрологический и гидрохимический режимы Керченского пролива оказывают влияние на формирование качественного и количественного состава флоры и фауны Азовского и Чёрного морей. Изучение аквальных экосистем пролива для выявления их современного состояния и прогнозирования природных и антропогенных изменений весьма актуально. Важнейшим компонентом морских экосистем, влияющим на численность и состав морской и прибрежной биоты, является макрофитобентос (Садогурский, 2006).

Учитывая огромное значение Керченского пролива для функционирования экосистем Азово-Черноморского бассейна, цель нашего исследования заключается в изучении видового состава и количественных параметров макрозообентоса фитоценозов Керченского пролива и прибрежной части Таманского полуострова для проведения дальнейших мониторинговых исследований.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основу работы положены материалы, собранные на мелководье Керченского пролива и прибрежной зоны Таманского полуострова в сентябре 2019 года (рис. 1).

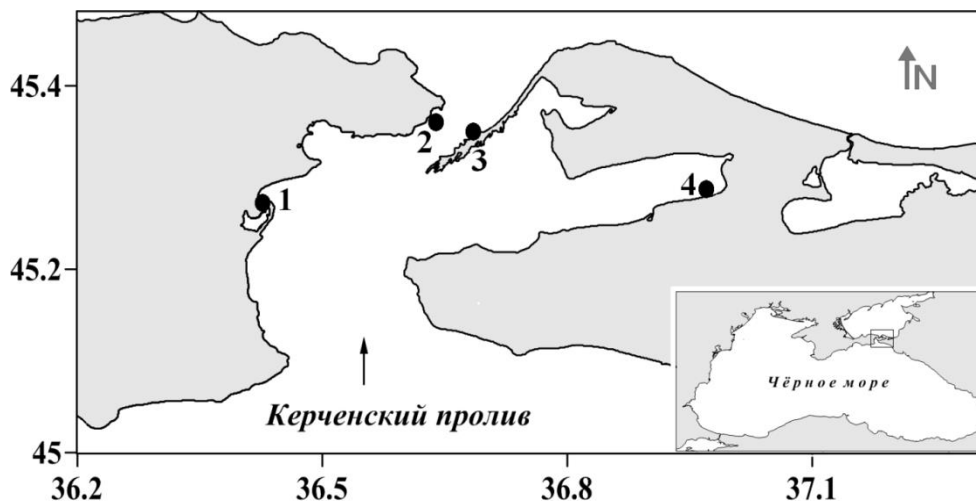


Рис. 1. Карта-схема отбора проб на мелководье Керченского пролива и в прибрежной зоне Таманского полуострова (сентябрь, 2019 г.)

Условные обозначения: 1 – Камыш-Бурунский залив, 2 – Порт Крым, 3 – порт Кавказ, 4 – п. Сенной.

Сбор исследуемого материала осуществляли с помощью мешка из мельничного газа на глубинах 0,5–1 м в двух повторностях, всего отобрана 21 проба. Фиксацию осуществляли 4 % раствором нейтрализованного формалина, в лабораторных условиях промывали через сито с размером ячеек 0,5 мм, разбирали по крупным таксономическим группам. Макрофиты взвешивали на весах «Sartorius PT-600» с точностью до 0,1 г.

При описании количественного развития макрозооэпифитона применены показатели численности (N, экз./кг) и биомассы (B, г/кг). Видовую идентификацию и выделение трофических групп осуществляли с помощью литературных источников (Определитель..., 1972; Киселева, 1981, 2004; Чухчин, 1984; Грезе, 1985; Grintsov, Sezgin, 2011). Для определения видовой принадлежности макрофитов использовали определители А. Д. Зиновой (1967) и Н. И. Рубцова (1972). Виды *Cystoseira crinita* и *Cystoseira barbata* сложно было выделить в ассоциации *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. В современной номенклатуре они относятся к разным родам, поэтому мы использовали прежнее название рода *Cystoseira*. Таксономическую принадлежность приводили в соответствие с базами данных *World Register of Marine Species* (2022).

Для определения фаунистического сходства в сравниваемых списках использовался индекс Чекановского-Сёренсена (Сёмкин, Горшков, 2010):

$$i = 2a / b + c,$$

где: a – число общих видов; b и c – число видов в сравниваемых списках.

Коэффициент Чекановского-Сёренсена может изменяться от 0 (отсутствие сходства) до 1 (полное сходство).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика района объектов исследования. Камыш-Бурунская бухта – акватория Аршинцевской косы, грунт представлен заиленным песком, местами с ракушкой и фрагментами бетонных конструкций. Температура воды на момент сбора макрозооэпифитона составила 22 °С, солёность – 17,7 ‰. В акватории обнаружены фитоценозы *Zostera* sp., *Ulva* sp. (= *Enteromorpha* sp.) и ассоциации *Ruppia* sp.+*Zostera* sp., *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp., *Zannichelia* sp.+*Stuckenia* sp.

***Cladophora* sp.** – род нитчатых зелёных водорослей. Талломы кладофор представляют собой длинные разветвлённые нити. Обитает на скалах, камнях, ракушках и песке. Является эпифитом цистозир (Зинова, 1967; Калугина-Гутник, 1975; Milchakova, 2011).

***Ulva* sp. (= *Enteromorpha* sp.).** В районах Керченского пролива в настоящее время происходит увеличение разнообразия зелёных водорослей. Распространённым родом зелёных водорослей в исследуемом районе является *Ulva* sp. Представители данного рода характеризуются трубчатым талломом, часто ветвящимся, сначала всегда прикреплённым к субстрату узким стебельком, позднее может оторваться и свободно плавать. Обитают на твёрдых грунтах. В распреснённых и загрязнённых участках прибрежной зоны образуют заросли (Зинова, 1967; Калугина-Гутник, 1975; Степаньян, 2020; Milchakova, 2011).

***Cystoseira* sp.** Имеет кустистый, разветвлённый таллом высотой 10–120 см. Обитает на камнях или скалах на глубинах от 0,5 до 10 м, редко до 30 м (Зинова, 1967; Калугина-Гутник, 1975; Milchakova, 2011). Виды рода *Cystoseira* относятся к многолетним медленно растущим олигосапробам, образующим в Чёрном море коренные фитоценозы. Большинство сопутствующих водорослей (*Polysiphonia*, *Ceramium*, *Laurencia*, *Callithamnion*, *Cladophora*, *Ulva* и др.) являются короткоживущими, поселяющимися под пологом видов *Cystoseira* или на их слоевищах (Зинова, 1967; Евстигнеева, 1993; Степаньян, 2020).

***Polysiphonia* sp.** – род нитчатых красных водорослей. Имеют кустистое слоевище высотой до 30 см, разветвлённое в верхней части. Растёт на литорали и сублиторали на каменистых грунтах, скалах, ракушках. Представители данного рода обнаружены нами в ассоциации цистозир, так как являются её эпифитами (Зинова, 1967; Калугина-Гутник, 1975; Milchakova, 2011).

***Ruppia* sp.** – представитель морских трав с нитевидными сильноветвистыми побегами длиной 20–40 см. Обитает на илисто-песчаных грунтах, ракушечнике с примесью гравия на глубинах от 0,1 до 7 м. Устойчива к волновой активности. Переносит солёность от 3 до 19 ‰ (Определитель..., 1972а; Milchakova, 2011).

***Stuckenia* sp.** имеет сильно разветвлённые стебли длиной до 1,5 м. Растение имеет длинные узкие линейные листья до 15 см длиной и менее 2 мм шириной. Устойчиво к эвтрофикации, обитает в пресной и солоноватой воде, является космополитом, встречается на всех континентах (Определитель..., 1972a; Milchakova, 2011).

***Zostera* sp.** – морская трава, имеет крупные побеги с линейными листьями от 1 до 2 м длины. Обитает на илисто-песчаных грунтах. Образует заросли в защищённых бухтах, заливах и лагунах. Устойчивость к эвтрофированию обеспечивает этому виду доминирование в районах с повышенной антропогенной нагрузкой и нестабильным составом донных осадков. Переносит солёность от 3 до 19 ‰. Растения *Zostera* богаты белком (Определитель..., 1972a; Калугина-Гутник, 1975; Савенок, Шишлова, 2008; Milchakova, 2011; Широян, 2022).

***Zannichellia* sp.** имеет нитевидный стебель, 20–50 см длиной, ветвистый, листья линейные. Обитает в пресной, солоноватой и морской воде, защищённой от волновой активности, при солёности от 3 до 19,0 ‰, в основном на илистых, илисто-песчаных грунтах на глубинах от 0,2 до 1 м (Определитель..., 1972a; Milchakova, 2011).

Порт Крым – небольшой порт, который находится у самого узкого места Керченского пролива. Грунт представлен песком, ракушей и валунами. Акватория порта Крым окружена молами, защищающими её от волн и льда. В его акватории обнаружен биоценоз *Ericaria crinita* (Duby) Molinari&Guiry, 2020 (= *Cystoseira crinita* Duby 1830), которая является массовым и доминирующим видом многих естественных биоценозов. Черноморская водоросль *E. crinita* используется как интегральный показатель загрязнения среды тяжёлыми металлами (Бурдин и др., 1980). Обитает на камнях или скалах до глубины 30 м, на открытых берегах с волновой активностью. Слоевища крупные, разветвлённые, высотой 10–120 см (Зинова, 1967; Калугина-Гутник, 1975; Milchakova, 2011).

Побережье у посёлка Сенной представлено плотным мелким песком. Температура воды 24 °С, солёность – 16,7 ‰. На рыхлых грунтах хорошо развита водная растительность, представленная морскими травами *Zostera* sp. и *Ruppia* sp., характерными для данной акватории (Лисовская, Степаньян, 2009).

Порт Кавказ – грунт представлен песком, ракушей и валунами, обросшими водорослями. Температура воды на момент сбора проб составила 19,5 °С, солёность – 15,8 ‰. В данной акватории отмечен *Ceramium* sp. – водоросль небольшого размера, встречается в виде пучков плотно разветвлённых и прикреплённых ризоидами. Обычно заселяет скалы, гальку, водоросли. Обитает на мелководье до глубины 11 м (Зинова, 1967; Широян, 2022). Быстро разрастается на новых поверхностях (Brown et al., 2001).

Фактор, определяющий возможность обитания макрофитобентоса, – доступные для колонизации твёрдые субстраты. Большинство макроводорослей закрепляется на твёрдых субстратах, некоторые виды способны активно занимать рыхлые грунты, но прикрепление всё равно происходит к твёрдым субстратам (частицы песка, раковины, другие водоросли) (Степаньян, 2020). Фитоценоз исследуемого нами мелководья Керченского пролива и прибрежной зоны Таманского полуострова представлен макрофитами *E. crinita*, *Ulva* sp., *Zostera* sp., *Stuckenia* sp., *Ceramium* sp., *Ruppia* sp., *Zannichellia* sp., зарослями *Ruppia* sp.+*Zostera* sp. и *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. Известно (Зинова, 1967), что цистозира является идеальным субстратом для поселения множества гидробионтов, включая водоросли родов *Cladophora* и *Polysiphonia*.

Качественный состав макрозооэпифитона. В исследованной акватории обнаружено 56 видов макрозооэпифитона, включающих Polychaeta (13 видов), Crustacea (23), Mollusca (14) и неидентифицированные до вида представители таксонов Ascidiidae, Chironomidae, Platyhelminthes, Nemertea и Actiniidae (табл. 1а и 1б).

Наибольшее количество видов макрозообентоса (40) обнаружено в акватории Камыш-Бурунской бухты: Polychaeta (9 видов), Crustacea (18), Mollusca (10) и неидентифицированные до вида представители таксонов Ascidiidae, Chironomidae, Nemertea. Высокий показатель коэффициента Чекановского-Сёренсена отмечен для зооэпифитона, обнаруженного в районах Камыш-Бурунской бухты – порта Крым (0,68), которые расположены вдоль крымского

Таблица 1а

Средние значения численности (N, экз./кг) и биомассы (B, г/кг) макрозооэпифитона в сообществах макрофитов мелководья Керченского пролива и прибрежной зоны Таманского полуострова

Виды макрозооэпифитона	Макрофиты				
	<i>Zostera</i> sp.	<i>Ruppia</i> sp.	<i>Stuckenia</i> sp.	<i>Zannichelia</i> sp.	<i>Ulva</i> sp.
1	2	3	4	5	6
POLYCHAETA					
<i>Capitella capitata</i> (Fabricius, 1780)	$\frac{6}{0,011}$	–	–	–	–
<i>Harmothoe imbricata</i> (Linnaeus, 1767)	–	–	–	$\frac{370}{1,481}$	–
<i>Leiochone leiopygos</i> (Grube, 1860)	$\frac{11}{0,033}$	–	–	–	–
Nereididae Blainville, 1818	–	$\frac{47}{0,099}$	–	–	$\frac{61}{0,061}$
<i>Phyllodoce mucosa</i> Örsted, 1843	$\frac{11}{0,027}$	–	–	–	–
<i>Platynereis dumerilii</i> (Audouin & Milne Edwards, 1833)	$\frac{82}{0,202}$	–	$\frac{39}{0,019}$	–	–
<i>Salvatoria clavata</i> (Claparède, 1863)	–	–	–	–	$\frac{61}{0,015}$
Итого	$\frac{110}{0,273}$	$\frac{47}{0,099}$	$\frac{39}{0,019}$	$\frac{370}{1,481}$	$\frac{122}{0,076}$
ARTHROPODA					
<i>Ampithoe ramondi</i> Audouin, 1826	–	–	$\frac{408}{0,398}$	$\frac{3148}{1,685}$	$\frac{672}{0,563}$
<i>Apherusa bispinosa</i> (Spence Bate, 1857)	$\frac{6}{0,002}$	–	$\frac{175}{0,054}$	$\frac{3889}{1,019}$	–
<i>Caprella acanthifera</i> Leach, 1814	$\frac{147}{0,024}$	–	$\frac{1456}{0,334}$	$\frac{3889}{1,019}$	$\frac{1181}{0,195}$
<i>Cumella (Cumella) limicola</i> Sars, 1879	$\frac{6}{0,003}$	–	–	–	–
<i>Dexamine spinosa</i> (Montagu, 1813)	$\frac{89}{0,02}$	–	$\frac{1029}{0,637}$	$\frac{4815}{2,611}$	$\frac{93}{0,042}$
<i>Echinogammarus</i> sp.	$\frac{6}{0,001}$	–	–	–	–
<i>Echinogammarus foxi</i> (Schellenberg, 1928)	–	–	–	$\frac{556}{0,259}$	$\frac{232}{0,144}$
<i>Ericthonius difformis</i> Milne Edwards, 1830	$\frac{2273}{0,508}$	$\frac{988}{0,214}$	–	$\frac{926}{0,167}$	$\frac{61}{0,012}$
<i>Gammarus insensibilis</i> Stock, 1966	–	–	$\frac{175}{0,425}$	–	–
<i>Idotea balthica</i> (Pallas, 1772)	$\frac{3}{0,001}$	–	–	–	$\frac{77}{0,067}$
<i>Iphinoe elisae</i> Băcescu, 1950	$\frac{5}{0,001}$	–	–	–	–
<i>Lekanesphaera hookeri</i> (Leach, 1814)	–	–	–	–	$\frac{1570}{8,583}$

Макрозооэпифитон макрофитов мелководья Керченского пролива
и прибрежной зоны Таманского полуострова

Таблица 1а (продолжение)

1	2	3	4	5	6
<i>Microdeutopus</i> sp.	$\frac{541}{0,084}$	–	–	–	–
<i>Microdeutopus gryllotalpa</i> Costa, 1853	$\frac{59}{0,012}$	–	$\frac{5398}{1,221}$	$\frac{1149}{2,833}$	$\frac{553}{0,47}$
<i>Monocorophium acherusicum</i> (Costa, 1853)	–	–	$\frac{19}{0,008}$	$\frac{186}{0,037}$	$\frac{47}{0,001}$
Mysida sp.	–	–	–	$\frac{186}{0,167}$	–
<i>Plumulojassa ocia</i> (SpenceBate, 1862)	$\frac{270}{0,027}$	–	–	–	–
<i>Stenosoma capito</i> (Rathke, 1836)	$\frac{3}{0,001}$	–	$\frac{19}{0,167}$	–	–
<i>Stenothoe monoculoides</i> (Montagu, 1813)	$\frac{23}{0,002}$	–	$\frac{311}{0,031}$	$\frac{1111}{0,093}$	$\frac{291}{0,037}$
Chironomidae	–	–	–	$\frac{107}{0,014}$	$\frac{370}{0,093}$
Итого	$\frac{3431}{0,686}$	$\frac{988}{0,214}$	$\frac{8990}{3,275}$	$\frac{20225}{9,983}$	$\frac{4884}{10,128}$
MOLLUSCA					
<i>Arcuatula senhousia</i> (Benson, 1842)	–	–	$\frac{97}{0,51}$	$\frac{3}{0,035}$	–
<i>Cerastoderma glaucum</i> (Bruguière, 1789)	–	–	$\frac{194}{29}$	–	$\frac{229}{36,5}$
<i>Modiolula phaseolina</i> (Philippi, 1844)	–	–	$\frac{291}{68}$	–	$\frac{47}{9,25}$
<i>Mytilaster lineatus</i> (Gmelin, 1791)	–	–	$\frac{117}{9,7}$	–	$\frac{61}{0,3}$
Итого	0	$\frac{8}{0,008}$	$\frac{699}{107,21}$	$\frac{3}{0,035}$	$\frac{337}{46,05}$
<i>Bittium reticulatum</i> (daCosta, 1778)	–	$\frac{8}{0,008}$	$\frac{97}{0,51}$	$\frac{3}{0,035}$	–
<i>Rissoa membranacea</i> (J. Adams, 1800)	$\frac{9}{0,27}$	$\frac{112}{2,954}$	$\frac{913}{14,72}$	$\frac{150}{2,36}$	$\frac{1224}{16,405}$
<i>R. parva</i> (da Costa, 1778)	–	–	$\frac{233}{1,417}$	–	$\frac{75}{0,46}$
<i>R. venusta</i> Philippi, 1844	–	–	$\frac{136}{1,417}$	$\frac{1}{0,006}$	$\frac{474}{1,5}$
<i>Setia turriculata</i> Monterosato, 1884	–	–	$\frac{214}{0,21}$	–	$\frac{198}{0,195}$
<i>Tritia</i> sp.	–	–	–	$\frac{1}{0,062}$	–
Итого	$\frac{9}{0,27}$	$\frac{123}{2,964}$	$\frac{1593}{18,274}$	$\frac{155}{2,463}$	$\frac{1971}{18,56}$
Actiniidae Rafinesque, 1815	$\frac{22}{0,367}$	–	–	–	–
<i>Ascidia</i> gen. sp. Linnaeus, 1767	–	–	$\frac{58}{0,232}$	$\frac{926}{444,444}$	–
ВСЕГО	$\frac{3572}{1,596}$	$\frac{1166}{3,285}$	$\frac{11379}{129,01}$	$\frac{21679}{458,406}$	$\frac{7314}{74,814}$

Примечание к таблице. В числителе дроби – численность (экз./кг), в знаменателе – биомасса (г/кг).

побережья Керченского пролива. В порту Крым на каменистом субстрате обильно произрастает *E. crinita*, разветвленный таллом которой является убежищем для многих видов гидробионтов.

В акватории Камыш-Бурунской бухты видовое богатство гидробионтов связано с разнообразием макрофитов, обнаруженных в данной акватории. Наименьшее видовое сходство (0,19) зарегистрировано между акваториями порта Кавказ (Керченский пролив) – пос. Сенной (Таманский залив). По-видимому, это связано с наличием разных макрофитов: в акватории посёлка Сенной обнаружены морские травы, в акватории порта Кавказ – красные водоросли рода *Ceramium*.

Наибольшее видовое разнообразие макрофитов обнаружено в акватории Камыш-Бурунской бухты (6), п. Сенной (2) и по одному виду в акваториях портов Крым и Кавказ. Максимальное количество видов макрозообентоса отмечено на *E. crinita* (39), далее следуют заросли *Ruppia* sp.+*Zostera* sp. (23), *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. (22), *Ulva* sp. (21), *Stuckenia* sp. и *Zostera* sp. (по 19), *Zannichelia* sp. (17), *Ceramium* sp. (15), *Ruppia* sp. (4).

Таблица 16

Средние значения численности (N, экз./кг) и биомассы (B, г/кг) макрозооэпифитона в сообществах макрофитов мелководья Керченского пролива и прибрежной зоны Таманского полуострова

Виды макрозооэпифитона	Макрофиты			
	<i>Ericaria crinita</i>	<i>Ceramium</i> sp.	<i>Ruppia</i> sp.+ <i>Zostera</i> sp.	<i>Cystoseira</i> sp.+ <i>Cladophora</i> sp.+ <i>Polysiphonia</i> sp.
1	2	3	4	5
POLYCHAETA				
<i>Alitta succinea</i> (Leuckart, 1847)	$\frac{72}{0,978}$	$\frac{115}{0,082}$	$\frac{9}{0,044}$	–
<i>Fabricia sabella</i> (Müller, 1774)	$\frac{11}{0,001}$	–	–	$\frac{69}{0,021}$
<i>Ficopomatus enigmaticus</i> (Fauvel, 1923)	$\frac{21}{0,015}$	–	$\frac{42}{0,042}$	–
Nereididae Blainville, 1818	$\frac{18}{0,003}$	$\frac{41}{0,027}$	–	–
<i>Nereiphylla pusilla</i> (Claparède, 1870)	$\frac{46}{0,009}$	–	–	$\frac{35}{0,035}$
<i>Platynereis dumerilii</i> (Audouin & Milne Edwards, 1833)	$\frac{54}{0,224}$	–	$\frac{183}{1,721}$	$\frac{139}{3,056}$
<i>Polydora cornuta</i> Bosc, 1802	$\frac{208}{0,012}$	–	–	–
<i>Salvatoria clavata</i> (Claparède, 1863)	$\frac{207}{0,011}$	–	–	–
<i>Streblospio gynobranchiata</i> Rice & Levin, 1998	–	–	–	$\frac{69}{0,007}$
Итого	$\frac{637}{1,253}$	$\frac{156}{0,109}$	$\frac{234}{1,807}$	$\frac{312}{3,119}$
Nemertea	$\frac{3}{0,001}$	–	–	$\frac{69}{0,069}$
Platyhelminthes	$\frac{52}{0,021}$	–	–	–

Макрозооэпифитон макрофитов мелководья Керченского пролива
и прибрежной зоны Таманского полуострова

Таблица 16 (продолжение)

1	2	3	4	5
ARTHROPODA				
<i>Amphibalanus improvisus</i> (Darwin, 1854)	<u>15</u> 0,099	<u>101</u> 2,605	<u>34</u> 0,184	–
<i>Ampithoe ramondi</i> Audouin, 1826	<u>170</u> 0,312	<u>14</u> 0,003	<u>346</u> 0,418	<u>1319</u> 0,398
<i>Apherusa bispinosa</i> (SpenceBate, 1857)	<u>16</u> 0,008	–	<u>158</u> 0,041	<u>486</u> 0,132
<i>Apohyale perieri</i> (Lucas, 1846)	–	<u>862</u> 0,458	–	–
<i>Caprella acanthifera</i> Leach, 1814	<u>18</u> 0,008	–	<u>776</u> 0,189	<u>4514</u> 0,334
<i>Cumella</i> (<i>Cumella limicola</i> Sars, 1879)	–	–	–	<u>69</u> 0,003
<i>Dexamine spinosa</i> (Montagu, 1813)	<u>39</u> 0,035	–	<u>1042</u> 0,656	<u>4306</u> 0,637
<i>Echinogammarus</i> sp.	<u>3</u> 0,001	–	–	–
<i>Echinogammarus foxi</i> (Schellenberg, 1928)	–	<u>331</u> 0,202	–	–
<i>Ericthonius difformis</i> MilneEdwards, 1830	<u>237</u> 0,046	–	<u>515</u> 0,17	–
<i>Gammarus insensibilis</i> Stock, 1966	–	–	<u>122</u> 0,3975	<u>3056</u> 0,425
<i>Idotea balthica</i> (Pallas, 1772)	<u>176</u> 1,55	<u>180</u> 0,818	<u>12</u> 0,018	–
<i>Iphinoe elisae</i> Băcescu, 1950	–	–	–	–
<i>Lekanesphaera hookeri</i> (Leach, 1814)	<u>7</u> 0,059	<u>2626</u> 20,197	–	–
<i>Melita</i> sp.	<u>2</u> 0,001	–	–	–
<i>Microdeutopus</i> sp.	–	<u>96</u> 0,015	–	–
<i>Microdeutopus gryllotalpa</i> Costa, 1853	<u>496</u> 0,303	<u>148</u> 0,059	<u>6006</u> 1,658	<u>2167</u> 1,221
<i>Monocorophium acherusicum</i> (Costa, 1853)	<u>1</u> 0,001	–	–	–
<i>Pleonexes helleri</i> (Karaman, 1975)	<u>22</u> 0,062	–	–	–
<i>Plumulojassa ocia</i> (SpenceBate, 1862)	<u>42</u> 0,008	–	–	–
<i>Stenosoma capito</i> (Rathke, 1836)	<u>26</u> 0,323	–	<u>132</u> 0,252	–
<i>Stenothoe monoculoides</i> (Montagu, 1813)	<u>526</u> 0,305	<u>270</u> 0,037	<u>481</u> 0,048	<u>1319</u> 0,031
Chironomidae	<u>20</u> 0,006	<u>54</u> 0,005	–	–
Итого	<u>1796</u> 3,127	<u>4682</u> 24,399	<u>9624</u> 4,0315	<u>17236</u> 3,181
MOLLUSCA				
<i>Anadara kagoshimensis</i> (Tokunaga, 1906)	–	<u>17</u> 0,8	–	–

Таблица 16 (продолжение)

1	2	3	4	5
<i>Arcuatula senhousia</i> (Benson, 1842)	<u>3</u> 0,381	–	<u>17</u> 0,289	<u>69</u> 0,486
<i>Cerastoderma glaucum</i> (Bruguère, 1789)	6 0,952	–	<u>181</u> 36,3	<u>1389</u> 20,8
<i>Modiolula phaseolina</i> (Philippi, 1844)	–	–	<u>42</u> 3,65	<u>1042</u> 6,25
<i>Mytilaster lineatus</i> (Gmelin, 1791)	<u>248</u> 1,976	<u>1265</u> 31,9	<u>217</u> 0,67	<u>1389</u> 3,47
<i>Mytilus galloprovincialis</i> Lamarck, 1819	6 0,381	<u>33</u> 108	–	–
Итого	<u>263</u> 3,69	<u>1315</u> 140,7	<u>457</u> 40,909	<u>3889</u> 31,006
<i>Bittium reticulatum</i> (da Costa, 1778)	–	–	<u>17</u> 0,289	<u>69</u> 0,486
<i>Corambe obscura</i> (A. E. Verrill, 1870)	1 0,01	–	–	–
<i>Rissoa membranacea</i> (J. Adams, 1800)	<u>28</u> 0,421	–	<u>1738</u> 15	<u>278</u> 4,0
<i>R. parva</i> (da Costa, 1778)	<u>12</u> 0,044	–	<u>261</u> 1,23	<u>2569</u> 4,03
<i>R. venusta</i> Philippi, 1844	<u>32</u> 0,257	–	<u>85</u> 0,44	<u>278</u> 0,76
<i>Setia turriculata</i> Monterosato, 1884	<u>6</u> 0,006	–	<u>49</u> 0,049	<u>5278</u> 5,28
<i>Tritia neritea</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	<u>25</u> 4,315	–
<i>Tritia</i> sp.	–	–	<u>68</u> 1,975	–
Итого	<u>79</u> 0,738	0	<u>2243</u> 23,298	<u>8472</u> 14,556
Actiniidae Rafinesque, 1815	<u>100</u> 0,212	–	–	–
<i>Ascidia</i> gen. sp. Linnaeus, 1767	<u>7</u> 2,671	–	–	–
ВСЕГО	<u>2957</u> 11,713	<u>6153</u> 165,208	<u>12558</u> 70,0455	<u>29978</u> 51,931

Примечание к таблице. В числителе дроби – численность (экз./кг), в знаменателе – биомасса (г/кг).

Амфиподы *M. grylloalpa* и *S. monoculoides* обнаружены на всех макрофитах, кроме *Ruppia* sp., гастропода *R. membranacea* не обнаружена на *Ceramium* sp.

Высокий показатель коэффициента Чекановского-Сёренсена отмечен для зооэпифитона, обнаруженного в зарослях *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. – *Stuckenia* sp. (0,8), *Stuckenia* sp. – *Ruppia* sp.+*Zostera* sp. (0,7) и *Ulva* sp. – *Stuckenia* sp. (0,7). Наименее сходны по видовому составу животные, обитающие в скоплениях макрофитов *Ceramium* sp. – *Ruppia* sp. (0,1), *Ceramium* sp. – *Zostera* sp. (0,2), *Ceramium* sp. – *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. (0,2).

В фитоценозе морских трав обнаружено 40 видов макрозообентоса, в зарослях водорослей – 48. Для них отмечено высокое фаунистическое сходство видов, коэффициент Чекановского-Сёренсена составил 0,7.

Annelida представлены Polychaeta, Platyhelminthes и Nemertea. В видовом составе полихет зарегистрировано 13 видов, относящихся к 4 отрядам: Capitellida (2 вида), Phyllodocida (7), Sabellida и Spionida – по 2 вида. Наибольшее количество видов (8) отмечено на *E. crinita*, в зарослях цветковых растений – 7, в ассоциации *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+

Polysiphonia sp. – 4, в зелёных и красных водорослях – по 2 вида. Для всех зарегистрированных видов полихет свойственно обитание в обрастаниях прибрежных скал, камней и на макрофитах. Три вида полихет оказались редкими и встречены только один раз: *H. imbricata* на многолетних водных растениях *Zannichelia* sp., *Ph. mucosa* на *Zostera* sp., *S. gynobranchiata* – в ассоциации водорослей *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp.

Crustacea представлены 23 видами, относящимися к 5 отрядам: Amphipoda (17 видов), Isopoda (3), Cumacea (1) и по одному виду Balanomorpha, Mysida. Наибольшее количество видов (20) отмечено в зарослях цветковых растений, в бурых водорослях – 16, зелёных – 10, красных – 9, в зарослях водорослей *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. – 8. Более чем на 50 % видов макрофитов идентифицированы типичные обитатели этих зарослей: *A. ramondi*, *A. bispinosa*, *C. acantifera*, *D. spinosa*, *E. difformis*, *I. balthica*, *M. gryllotalpa*. Редкими оказались *A. perieri*, *C. limicola*, *I. elisae*, *P. helleri*, *P. ocia*, представители родов *Melita* и *Mysida*.

Mollusca представлены 14 видами, относящимися к 7 отрядам: Littorinimorpha и Mytilida (по 4 вида), Arcida, Caenogastropoda, Cardiida, Neogastropoda, Nudibranchia (по 1 виду). Наибольшее количество видов отмечено в эпифитоне цветковых растений *Ruppia* sp.+*Zostera* sp. (10 видов), в бурых водорослях – 9, в зелёных водорослях и в зарослях *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. – по 8 видов, в красных – 3 вида.

Двустворчатые моллюски *A. senhousia*, *C. glaucum*, *M. lineatus* и гастропода *R. venusta* обнаружены более чем на 50 % видов макрофитов. Двустворчатый моллюск *A. kagoshimensis* встречен только в зарослях *Ceramium* sp., а гастропода *C. obscura* – только в зарослях *E. crinita*.

Представители типа Actiniidae и Ascidia встречены в зарослях цветковых растений и среди *E. crinita*, Nemertea – в фитоценозе *E. crinita* и в зарослях *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. Chironomidae обнаружены на всех макрофитах, кроме фитоценоза *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. Platyhelminthes обнаружены только в зарослях *E. crinita*.

Количественное развитие. Средние значения численности и биомассы всего макрозооэпифитона составили 10762±4080 экз./кг (средняя±доверительный интервал) и 107,644±61,089 г/кг соответственно. Наибольшая численность и биомасса макрозооэпифитона зарегистрированы в акватории Камыш-Бурунской бухты (95350 экз./кг и 783,87 г/кг соответственно), наименьшие – в акватории посёлка Сенной (2428 экз./кг и 4,441 г/кг соответственно). На всех участках значительный вклад в общую численность вносили ракообразные (от 61 до 87 % общей численности макрозооэпифитона). Основная роль в формировании биомассы в акватории Камыш-Бурунской бухты принадлежит асцидии (57 % общей биомассы), на остальных участках – моллюскам (от 38 до 85 % общей биомассы).

Максимальная численность гидробионтов отмечена в зарослях макрофитов *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. (29978 экз./кг; 58 % – ракообразные), биомасса – в *Ceramium* sp. (165,208 г/кг; 27 % – моллюски).

Средняя численность полихет в зарослях макрофитов варьировала от 39 экз./кг (*Stuckenia* sp.) до 637 экз./кг (*E. crinita*). Биомасса изменялась от 0,019 г (*Stuckenia* sp.) до 3,119 г/кг в зарослях макрофитов *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. Основной вклад в формирование численности внесли спионида *P. cornuta* и силлида *S. clavata* (по 33 % общей численности полихет), биомассы – nereida *P. dumerilii* (98 % общей биомассы полихет).

Ранжированный ряд по численности возглавляет *P. dumerilii* (55 экз./кг), далее следуют *H. imbricate* (41 экз./кг), *S. clavata* (30 экз./кг) и *P. cornuta* (30 экз./кг). Ранжированный ряд по биомассе также возглавляет *P. dumerilii* (0,58 г/кг), далее следуют *H. imbricata* (0,165 г/кг) и *A. succinea* (0,123 г/кг).

Средняя численность ракообразных в зарослях макрофитов варьировала от 988 экз./кг (*Ruppia* sp.) до 20225 экз./кг (*Zannichelia* sp.). Биомасса изменялась от 0,214 г/кг (*Ruppia* sp.) до 24,399 г/кг (*Ceramium* sp.). Основной вклад в формирование этих показателей вносят Amphipoda: 93 % общей численности и 45 % биомассы Malacostraca.

Ранжированный ряд по численности возглавляет *M. gryllotalpa* (1775 экз./кг), его вклад в общую численность составил 22 %. Далее следуют *C. acanthifera* (1331 экз./кг), *D. spinosa* (1268 экз./кг). Ранжированный ряд по биомассе возглавляет изопода *L. hookeri* (3,204 г/кг), её вклад в общую биомассу составил 49 %. Далее следуют амфиподы *M. gryllotalpa* (0,864 г/кг) и *D. spinosa* (0,515 г/кг).

Средняя численность моллюсков в сообществах макрофитов варьировала от 9 экз./кг (*Zostera* sp.) до 12361 экз./кг (*Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp.). Биомасса изменялась от 0,27 г/кг (*Zostera* sp.) до 140,7 г/кг (*Ceramium* sp.). На *Zostera* sp. идентифицирован только один вид гастроподы *R. membranacea*, брюхоногие моллюски обнаружены в зарослях *Ruppia* sp., двустворчатые моллюски – в *Ceramium*.

Ранжированный ряд по численности возглавляет *S. turriculata* (638 экз./кг), его вклад в общую численность составил 27 %. Далее следуют *R. membranacea* (495 экз./кг), *M. lineatus* (366 экз./кг) и *R. parva* (350 экз./кг). Ранжированный ряд по биомассе возглавляет *C. glaucum* (13,727 г/кг), его вклад в общую биомассу составил 27 %. Далее следуют митилиды *M. galloprovincialis* (12,04 г/кг) и *M. phaseolina* (9,68 г/кг).

Трофическая принадлежность. Талломы макрофитов обладают сбалансированным содержанием углеводов, белков, липидов, биологически активных веществ и микроэлементов, что делает их важным пищевым ресурсом для животных разных систематических групп (Растительные ресурсы..., 1994; Растительные ресурсы..., 2014; Чемериса, Боброва, 2020). Производимая макрофитами фитомасса эффективно включена в круговорот органического вещества.

Население фитоценозов исследуемой акватории обладает широким пищевым спектром: фитофаги, детритофаги, полифаги, плотоядные и сестонофаги (рис. 2).

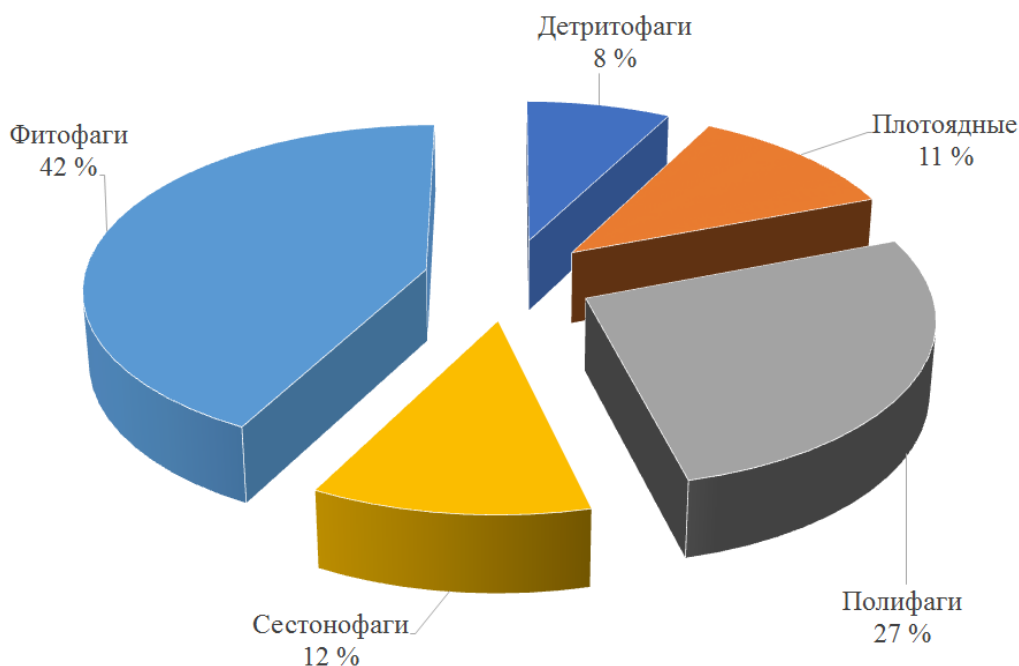


Рис. 2. Трофическая структура зоопланктона биоценозов макрофитов вдоль мелководья Керченского пролива и прибрежной зоны Таманского полуострова

Среди трофических групп сестонофаги выделены отдельно, так как известно, что биологическая фильтрация в прибрежных водах не только является одним из основных способов получения пищи, но и представляет собой глобальную многоступенчатую систему

процесса самоочищения среды. Бентосные организмы, наряду с макрофитами, также принимают активное участие в биологической очистке природных вод (Капков и др., 2016).

Наибольшее количество видов относится к фитофагам (22), среди них 70 % принадлежит ракообразным. Значительную роль в формировании численности играет амфипода *M. gryllotalpa* (36 % общей численности фитофагов), биомассы – изопода *L. hookeri* (56 %). Самая малочисленная группа – детритофаги (4), в которую входят только ракообразные.

В видовом составе зооэпифитона на всех видах макрофитов более 50 % гидробионтов – фитофаги (рис. 3).

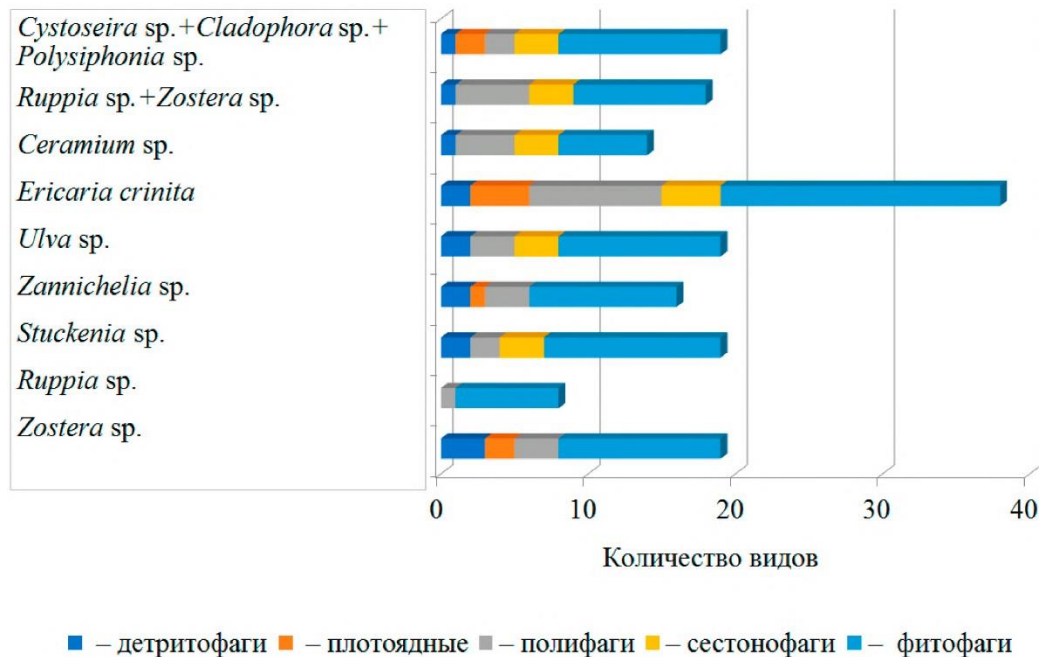


Рис. 3. Представленность трофических группировок в зарослях макрофитов вдоль мелководья Керченского пролива и прибрежной зоны Таманского полуострова

Плотность поселения фитофагов была наивысшей в зарослях всех видов макрофитов и составляла от 44 до 98 % их численности. Сформирован данный показатель в основном ракообразными.

По биомассе доминировали сестонофаги и фитофаги. Основная роль в формировании этого показателя принадлежит моллюскам.

Таким образом, наибольшее количество видов макрозооэпифитона обнаружено в биоценозе *E. crinita*, в ассоциации водорослей *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. количество видов сокращается. По-видимому, основной причиной является избирательная способность гидробионтов, связанная с их чувствительностью к действию выделяемых красными водорослями метаболитов (Капков и др., 2016). Известно (Титлянов и др., 2011), что они накапливают полифенольные и фенольные вещества, многие из этих соединений ядовиты для животных. Поэтому в исследуемой нами акватории в биоценозе *Ceramium* sp. количество видов в 2,6 раза меньше чем в зарослях бурой водоросли *E. crinita*. Снижение видового разнообразия гидробионтов в ассоциации *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. можно объяснить наличием красной водоросли *Polysiphonia* sp. Однако, наибольшие количественные показатели зооэпифитона зарегистрированы именно в этой ассоциации. Можно предположить, что численность и биомасса зооэпифитона формируются за счёт более выносливых и адаптированных к обитанию в биоценозах красных водорослей гидробионтов, но в литературе такие данные не обнаружены.

Ранее было показано, что существенную роль в распределении видов играет разветвлённость слоевища макрофитов, создавая для обитателей большое количество экологических ниш, дополнительную поверхность для прикрепления животных и их пищи (Маккавеева, 1979). При равных условиях в зарослях более разветвлённых макрофитов не только видовое разнообразие больше, но и количественные показатели возрастают с увеличением разветвлённости талломов. Разветвлённость слоевища особое влияние оказывает на ту часть животных зарослей, которые питаются диатомовыми обрастаниями. Показано, что на прибрежной цистозире в Чёрном море среднегодовая биомасса диатомового оброста составляла 300 г/кг, а фитофагов – 50 г/кг. Тогда как на менее разветвлённой филлофоре оброста в 4 раза, а фитофагов в 2,5 раза меньше (Маккавеева, 1979).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фитоценоз мелководья Керченского пролива и прибрежной зоны Таманского полуострова представлен макрофитами *E. crinita*, *Ulva* sp., *Zostera* sp., *Stuckenia* sp., *Ceramium* sp., *Ruppia* sp., *Zannichelia* sp., зарослями *Ruppia* sp.+*Zostera* sp. и *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp.

Обнаружено 56 видов макрозооэпифитона, включающих Polychaeta (13 видов), Crustacea (23), Mollusca (14) и неидентифицированные до вида представители таксонов Ascidiidae, Chironomidae, Platyhelminthes, Nemertea и Actiniidae. Максимальное количество видов гидробионтов отмечено на *E. crinita* (39), далее следуют заросли *Ruppia* sp.+*Zostera* sp. (23), *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. (22), *Ulva* sp. (21), *Stuckenia* sp. и *Zostera* sp. (по 19), *Zannichelia* sp. (17), *Ceramium* sp. (15), *Ruppia* sp. (4). Средние значения численности и биомассы всего макрозооэпифитона составили 10762±4080 экз./кг и 107,644±61,089 г/кг соответственно. Максимальная численность гидробионтов отмечена в зарослях макрофитов *Cystoseira* sp.+*Cladophora* sp.+*Polysiphonia* sp. (29978 экз./кг), биомасса – в *Ceramium* sp. (165,208 г/кг).

Макрозооэпифитон фитоценозов представлен фитофагами, детритофагами, полифагами и плотоядными. Наибольшее количество видов относится к фитофагам (22), самая малочисленная группа – детритофаги (4).

Благодарности. Авторы выражают благодарность канд. биол. наук Е. А. Колесниковой за помощь в определении макрофитов.

Статья подготовлена в рамках Государственного задания ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана», № 121030100028-0.

Список литературы

- Бурдин К. С., Гусев М. В., Крупина М. В., Савельев И. Б. Изучение возможностей использования макроводоросли *Cystoseira crinita* в качестве организма-монитора загрязнения Чёрного моря тяжёлыми металлами // Вестник Московского университета. Серия 16: Биология. – 1980. – № 3. – С. 3–10.
- Грезе И. И. Высшие ракообразные. Бокоплавы. Фауна Украины. – Киев: Наукова думка, 1985. – Т. 26, вып. 5. – 172 с.
- Евстигнеева И. К. Видовой состав и количественная характеристика эпифитов *Cystoseira crinita* Borg // Альгология. – 1993. – Т. 3, № 4. – С. 52–57.
- Зернов С. А. К вопросу об изучении жизни Чёрного моря. Записки Императорской Академии Наук. – СПб: Типография императорской академии наук, 1913. – Т. 32, № 1. – 300 с.
- Зинова А. Д. Определитель зеленых, бурых и красных водорослей южных морей СССР. – М. – Л.: Наука, 1967. – 398 с.
- Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Чёрного моря. – Киев: Наукова думка, 1975. – 248 с.
- Капков В. И., Шошина Е. В., Беленикина О. А. Биоремедиация морских прибрежных экосистем: использование искусственных рифов // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2016. – Т. 19, № 1/2. – С. 286–295.

- Киселева Г. А. Видовой состав и динамика макрозообентоса в ассоциациях водорослей Карадагского природного заповедника // Экосистемы, их оптимизация и охрана. – 2009. – Вып. 20. – С. 57–66.
- Киселева М. И. Бентос рыхлых грунтов Чёрного моря. – Киев: Наукова думка, 1981. – 163 с.
- Киселева М. И. Многощетинковые черви (Polychaeta) Чёрного и Азовского морей. – Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра РАН, 2004. – 409 с.
- Лисовкая О. А., Степаньян О. В. Разнообразии макроводорослей побережья Таманского п-ова (Россия) в летний период // Альгология. – 2009. – Т. 19, № 4. – С. 341–348.
- Макаров М. В. Таксоцен Mollusca в эпифитоне морской травы *Zostera* sp. в акватории бухты Казачья (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2018. – Вып. 3. – С. 92–97. doi: 10.22449/2413-5577-2018-3-92-97.
- Макаров М. В., Бондаренко Л. В., Копий В. Г. Донная фауна бухты Круглой (Чёрное море, Крым). Сообщение 1. Эпифитон макрофитов // Труды Карадагской научной станции имени Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН. – 2022. – Т. 7, № 1 (21). – С. 11–26. <https://doi.org/10.21072/eco.2022.21.02>.
- Макаров М. В., Копий В. Г., Бондаренко Л. В., Витер Т. В., Подзорова Д. В. Макрозообентос зарослей водорослей *Cystoseira crinita* Duby, 1830 у берегов Крыма и Кавказа (Чёрное море) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2020. – Т. 6 (72), № 3. – С. 97–116. DOI: 10.37279/2413-1725-2020-6-3-97-116.
- Маккавеева Е. Б. Беспозвоночные зарослей макрофитов Чёрного моря. – Киев: Наукова думка, 1979. – 229 с.
- Маккавеева Е. Б. Многолетние изменения эпифитона в Севастопольских бухтах // Многолетние изменения зообентоса Черного моря. – К.: Наукова думка, 1992. – С. 184–213.
- Никитина В. Н., Лисовская О. А. Макрофитобентос верхних отделов береговой зоны российского побережья Черного моря. – СПб: СПбГУ, 2013. – 132 с.
- Определитель фауны Чёрного и Азовского морей. Т. 3 / [Под ред. Ф. Д. Мордухай-Болтовского]. – Киев: Наукова думка, 1972. — 340 с.
- Растительные ресурсы России и сопредельных государств: Цветковые растения, их химический состав, использование. Т. 8. Сем. *Butomaceae–Typhaceae* / [Отв. ред. П. Д. Соколов]. – СПб: Наука, 1994. – С. 12–14.
- Растительные ресурсы России: Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Т. 6. Сем. *Butomaceae–Typhaceae* / [Отв. ред. А. Л. Буданцев]. – СПб–М.: КМК, 2014. – С. 19–23.
- Определитель высших растений Крыма / [Под. ред. Н. И. Рубцова]. – Л.: Наука, 1972а. – 550 с.
- Савенок Н. В., Шишлова М. А. *Zostera marina* как биоиндикатор морской среды // Успехи современного естествознания. – 2008. – № 6. – С. 136.
- Садогурский С. Е. Макрофитобентос водоемов острова Тузла и прилегающих морских акваторий (Керченский пролив, Украина) // Альгология. – 2006. – Т. 16, №3. – С. 337–354.
- Сёмкин Б. И., Горшков М. В. Об оценке сходства и различия в серии флористических и фитоценологических описаний // Комаровские чтения. – 2010. – Вып. 57. – С. 203–220.
- Степаньян О. В. Макрофитобентос Чёрного и Азовского морей: флористические и экологические аспекты (обзор) // Наука юга России. – 2020. – Т. 16, № 4. – С. 26–38. DOI: 10.7868/S25000640200404
- Титлянов Э. А., Титлянова Т. В., Белоус О. С. Полезные вещества морских красных водорослей (Rhodophyta): химическая структура и содержание // Известия ТИНРО. – 2011. – Т. 165. – С. 305–317.
- Чемериса Е. В., Боброва А. А. Продуктивность рдестов (*Potamogeton*, *Stuckenia*, *Potamogetonaceae*) в реках севера Европейской России // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 1. – С. 114–120.
- Чухчин В. Д. Экология брюхоногих моллюсков Чёрного моря. – Киев: Наук. думка, 1984. – 176 с.
- Широкая А. Г. Диатомовые водоросли эпифитона макрофитов Крымского побережья Чёрного моря: дис. ... канд. биол. наук: спец. 1.5.16 Гидробиология. – Севастополь: Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, 2022. – 167 с.
- Brown C. J., Eaton R. A., Thorp C. H. Effects of chromated copper arsenate (CCA) wood preservative on early fouling community formation // Marine Pollution Bulletin. – 2001. – 42. – P. 1103–1113.
- Colin A., Faure J. Coudret C., Destombe, Valero M. Pollinators of the sea: A discovery of animal-mediated fertilization in seaweed // Science 28 Jul. – 2022. – Vol 377, iss. 6605. – P. 528–530. DOI: 10.1126/science.abo6661
- Grintsov V., Sezgin M. Manual for identification of Amphipoda from the Black Sea. – Sevastopol: Digit Print, 2011. – 151 p.
- Milchakova N. A. Marine plants of the Black Sea. An illustrated field Guide. – Sevastopol: Digit Print Press, 2011. – 144 p.
- Minicheva G. G., Bolshakov V. N., Kalashnik E. S., Zotov A. B., Marinets A. V. Assessment of the reactions of algal communities to influence of climatic factors in the North-Western Black Sea ecosystem // International Journal on Algae. – 2018. – 20 (2). – P. 121–134. DOI:10.1615/InterJAlgae.v20.i2.20

Kopiy V. G., Bondarenko L. V., Timofeev V. A., Podzorova D. V., Makarov M. V., Kovaleva M. A. Macrozoepiphyton of macrophytes of the shallow waters of the Kerch Strait and the coastal zone of the Taman Peninsula // Ekosistemy. 2022. Iss. 32. P. 106–120.

The research was based on materials collected in the shallow waters of the Kerch Strait and the coastal zone of the Taman Peninsula in September 2019. Phytocenosis was represented by macrophytes of *E. crinita*, *Ulva* sp., *Zostera* sp., *Stuckenia* sp., *Ceramium* sp., *Ruppia* sp., *Zannichelia* sp., thickets of *Ruppia* sp. + *Zostera* sp. and *Cystoseira* sp. + *Cladophora* sp. + *Polysiphonia* sp. Six species of macrophytes were found in the waters of the Kamysh-Burun Bay, two species – near the village of Sennoy, and one species was found in each port: in Port Krym and Port Kavkaz. Fifty six species of macrozoepiphyton were found in the thickets of macrophytes, including Polychaeta (13 species), Crustacea (23), Mollusca (14) and representatives of the taxa Ascidiidae, Chironomidae, Platyhelminthes, Nemertea, and Actiniidae that were not identified to species. The maximum number of macrozoobenthos species was recorded on thickets of *E. crinita* (39), followed by thickets of *Ruppia* sp. + *Zostera* sp. (23), *Cystoseira* sp. + *Cladophora* sp. + *Polysiphonia* sp. (22), *Ulva* sp. (21), *Stuckenia* sp. and *Zostera* sp. (19 each), *Zannichelia* sp. (17), *Ceramium* sp. (15), *Ruppia* sp. (4). A high index of the Czekanowski–Sørensen coefficient was registered for the zoepiphyton found in the thickets of *Cystoseira* sp. + *Cladophora* sp. + *Polysiphonia* sp. – *Stuckenia* sp. (0.8), *Stuckenia* sp. – *Ruppia* sp. + *Zostera* sp. (0.7) and *Ulva* sp. – *Stuckenia* sp. (0.7). Animals were least similar in species composition in the macrophyte communities *Ceramium* sp. – *Ruppia* sp. (0.1), *Ceramium* sp. – *Zostera* sp. (0.2), *Ceramium* sp. – *Cystoseira* sp. + *Cladophora* sp. + *Polysiphonia* sp. (0.2). The mean abundance and biomass values of all macrozoepiphyton were 10762±4080 ind./kg and 107.644±61.089 g/kg, respectively. The maximum abundance of hydrobionts was recorded in the macrophytes *Cystoseira* sp. + *Cladophora* sp. + *Polysiphonia* sp. (29978 ind./kg) and the biomass in *Ceramium* sp. (165.208 g/kg). The macrozoepiphyton of the phytocenoses is represented by phytophages, detritophages, polyphages and carnivores. The largest number of species belongs to phytophages, the smallest group is detritophages.

Key words: macrophytes, macrozoepiphyton, abundance, biomass, Kerch Strait, Black Sea.

Поступила в редакцию 28.10.22
Принята к печати 30.12.22

УДК 595.798/799 (477.75)

Новые сведения о фауне и экологии охраняемых видов пчел (*Andrenidae*, *Colletidae*, *Megachilidae*) и ос (*Vespidae*) Казантипского природного заповедника

Иванов С. П.¹, Пышкин В. Б.², Фатерыга А. В.³, Пузанов Д. В.¹, Литвинюк Н. А.⁴,
Сволынский А. Д.¹, Курамова В. В.¹

¹Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского
Симферополь, Республика Крым, Россия

²Филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в городе Севастополе
Севастополь, Россия

³Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН – филиал Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН
Феодосия, Республика Крым, Россия

⁴Государственный природный заповедник «Казантипский»
Щелкино, Республика Крым, Россия

spi2006@list.ru; vpbiscrim@mail.ru; fater_84@list.ru; crimsphinx@list.ru; nat.litvinyuk@yandex.ru; svolinskiy@gmail.com; viktoriya.bekirova@ya.ru

Приводятся сведения о находках новых для Казантипского природного заповедника видов пчел: *Colletes hederiae* Schmidt & Westrich, 1993, *C. similis* Schenk, 1853, *Andrena marginata* Fabricius, 1776 и одного вида складчатокрылых ос – *Euodynerus posticus* (Herrich-Schäffer, 1841). Пчелы отмечены в конце сентября – начале октября на *Galatella villosa* (L.) Rchb. f. и *G. linoxyris* (L.) Rchb. f. с обножками, заполненными пыльцой этих видов растений. Оса *E. posticus* была обнаружена в результате заселения самками этого вида гнезда-ловушки. Приводятся данные об экологии гнездования охраняемых видов пчел: *Megachile lefebvrei* (Lepelletier, 1841) и *Andrena magna* Warncke, 1965. Пчела *M. lefebvrei* населяет в заповеднике участки петрофитной степи, устраивая гнезда в неглубоких полостях камней, иногда размером с одну ячейку. В качестве основного строительного материала использует замазку из размоченной земли. Общее внешнее покрытие гнезда пчела строит из небольших камешков, скрепленных замазкой из пережеванных листьев *Alcea rugosa* Alef. Пчела *A. magna* в заповеднике гнездится колонially. Колонии располагаются на участках с глинистой почвой и разреженной растительностью, обычно на обочинах полевых дорог, вдоль тропинок или на обнажениях глинистых откосов. Наибольшая колония в Казантипском заповеднике состояла из 156 гнезд, средняя плотность гнезд – 2,2 гнезда на 1 м², максимальная – 28. Проведена раскопка гнезд после вылета пчел первого поколения. Гнездовой ход вертикальный, плавно извилистый, диаметром 10 мм. На глубине 15–25 см в коротких отнорках располагаются вертикально расположенные овальные ячейки (18–19×10 мм, горловина – 8 мм). Сведения о гнездовании *A. magna* приводятся впервые. Пчелы *A. magna* первого поколения в заповеднике отмечены как опылители нескольких охраняемых видов растений: *Tulipa sylvestris* subsp. *australis* (Link) Pamp., *T. suaveolens* Roth, *Paeonia tenuifolia* L., а также *Anacamptis morio* subsp. *caucasica* (K. Koch) H. Kretzschmar, Eccarius & H. Dietr. На границе заповедника в г. Щелкино отмечен инвазивный вид пчелы *Megachile sculpturalis* Smith, 1853.

Ключевые слова: одиночные пчелы, *Colletes hederiae*, *C. similis*, *Andrena magna*, *A. marginata*, *Megachile lefebvrei*, *M. sculpturalis*, *Euodynerus posticus*, гнездование пчел, трофические связи, Казантипский заповедник, Крымский полуостров.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение фауны пчел и ос остается актуальной задачей не только в отношении отдельных до сих пор недостаточно исследованных территорий, но и многих других, казалось бы, хорошо изученных регионов. Об этом свидетельствуют примеры недавнего обнаружения в таких регионах новых видов, часть из которых оказались новыми и для науки (Schmidt, Westrich, 1993; Michez et al., 2012; Kuhlmann, Proshchalykin, 2016; Mauss et al., 2022; Pisanty et al., 2022 и др.). Особый интерес представляют фаунистические находки инвазивных видов пчел и ос (Mangum, Brooks, 1997; Vereecken, Barbier, 2009; Fateryga et al., 2014; Ivanov, Fateryga, 2019; Mokrousov et al., 2019 и др.), свидетельствующие о постоянном изменении состава фауны и указывающие на важность мониторинга этого процесса, в том числе с целью

оценки возможного отрицательного воздействия вселенцев на местные виды (Portman et al., 2019).

Заповедные территории нацелены на сохранение биоразнообразия, фаунистического богатства фаун тех регионов, на территории которых они находятся. Их изучение служит основой для выявления современных тенденций в изменении состава фаун и численности видов, поиска путей их сохранения. Существенные отличия климата, рельефа и растительности отдельных природных зон Крыма определяют и своеобразие их фаун, каждая из которых заслуживает отдельного изучения. Фауна пчел и ос крымских заповедников, расположенных в разных природных зонах Крыма, изучена относительно хорошо (Фатерыга, 2005, 2006, 2007; Фатерыга, Филатов, 2006; Филатов, 2006; Филатов и др., 2006; Иванов, Фатерыга, 2007, 2011; Фатерыга, Иванов, 2009; Иванов и др., 2009). Тем большую ценность представляют собой сведения о новых видах, обнаруженных в тех или иных заповедниках или на территориях, прилегающих к ним.

Видовой состав пчел и складчатокрылых ос Казантипского природного заповедника изучен относительно хорошо. Пчел зарегистрировано 123 вида (Филатов и др., 2006; Fateryga et al., 2018), складчатокрылых ос – 19 видов (Фатерыга, 2006; Fateryga, 2018).

Заповедные территории также важны для проведения исследований по экологии, биологии и этологии гнездования пчел и ос, для выявления трофических связей, изучения строения гнезд, брачного и гнездового поведения. Это особенно важно для видов со сложным гнездовым поведением, для которых только ненарушенные биоценозы могут предоставлять необходимый набор благоприятных условия для гнездования.

Цель данной работы – выявить новые виды пчел и ос в составе населения Казантипского природного заповедника, изучить особенности экологии, биологии и этологии гнездования, а также трофические связи охраняемых «краснокнижных» видов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в Казантипском заповеднике и на прилегающих территориях в сезоны 2021–2022 годов в ходе экспедиционных выездов.

Основным методом сбора материала по изучению фауны, с учетом работы на заповедной территории, была макросъемка насекомых на цветущей растительности. Использовали фотокамеру Canon EOS Rebel T2i и объектив Tamron SP Di AF 90 mm. При необходимости применяли также нетравматичный отлов насекомых с использованием специальной камеры временного фиксирования (устройство проходит процедуру патентования) и фотосъемкой деталей строения, важных для идентификации вида, с последующим выпуском исследованных особей в природу.

Видовую принадлежность пчел и ос определяли по определителям (Осичнюк, 1970, 1977; Определитель насекомых..., 1978). Названия растений даны по А. В. Ене (2012).

Трофические связи пчел изучали путем регистрации особей на цветках с последующим определением видовой принадлежности растений. Использовали также микроскопический анализ пыльцы из обножек пчел в лаборатории с применением камеры Горяева (Иванов, Мензатова, 2016).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение фауны пчел и ос Казантипского природного заповедника

Пчела коллет плющевый – *Colletes hederæ* Schmidt & Westrich, 1993. Недавно описанный европейский вид пчел (Schmidt, Westrich, 1993). Впервые зарегистрирован не только в Казантипском заповеднике, но и в Восточном Крыму в целом (рис. 1 а и б).

Первые находки *C. hederæ* в Крыму были сделаны на крайнем западе (Гарханкутский п-ов) – вид был обнаружен в урочище Джангуль (Proshchalykin et al., 2017). В публикации П. Богуша с соавторами (Bogusch et al., 2021) этот вид назван загадочным. После относительно недавнего описания *C. hederæ* по материалу с территории юго-восточной

Франции, северо-западной Хорватии, северной и центральной Италии, а также юго-западной Германии уже в 2014 году было зафиксировано быстрое распространение *C. hederae* в Европе (Horfenmüller, 2014), которое активно продолжилось в течение последующих лет. В частности, было отмечено проникновение *C. hederae* все глубже на север, северо-запад, восток и юго-восток от мест первоначального обнаружения (Saure et al., 2019 и др.). При этом расширение ареала происходило очагами с последующим заселением пропущенных территорий. Таким образом, появление этого вида в Крыму, сначала на западе полуострова, а теперь и на востоке можно рассматривать как подтверждение отмеченного характера расширения ареала *C. hederae*.

Почти все находки *C. hederae* в Европе сделаны на цветках плюща (*Hedera helix* L.). Лишь в двух публикациях указывается, что *C. hederae* может также использовать другие источники пыльцы, но только в период до начала цветения плюща (Müller, Kuhlmann, 2008; Westrich, 2008). И в Крыму *C. hederae* до сих пор был отмечен только на плюще того же вида (*H. helix*).



Рис. 1. Пчелы, впервые зарегистрированные в Казантипском заповеднике
а и б – коллет плющевый (*Colletes hederae*) на цветках солнечника обыкновенного; в и г – андрена отороченная (*Andrena marginata*) на цветках солнечника мохнатого. Хорошо видны обножки, заполненные пыльцой этих растений.

В Казантипском заповеднике *C. hederae* отмечен на соцветиях двух видов растений: солнечника обыкновенного (*Galatella linosyris* (L.) Rchb. f.) и мохнатого (*G. villosa* (L.) Rchb. f.), массово цветущих здесь с начала сентября по октябрь (рис. 2). Наличие у самок, посещающих солнечники, полноценных обножек и данные микроскопического анализа пыльцы, счищенной с пчел, позволяет заключить, что эти два вида являются основными и, возможно, единственными кормовыми растениями *C. hederae* в заповеднике.

Возможно, что такой выбор кормового растения самками *C. hederae* связан с отсутствием плюща на территории заповедника (Корженевский и др., 2006). Тем не менее, эти данные позволяют заключить, что отсутствие плюща не является препятствием для упомянутой выше экспансии вида – последовательного расширения его ареала. Интересно отметить, что при описании *C. hederae* его приуроченность к плющу была отмечена как один из признаков, отличающих его от близких видов: *C. succinctus* (Linnaeus, 1758) и *C. halophilus* Verhoeff, 1944.



Рис. 2. Аспективное цветение солнечников обыкновенного и мохнатого в Казантипском природном заповеднике

Пчела коллет схожий – *Colletes similis* Schenk, 1853. Вид, широко распространенный в Палеарктике (Осичнюк, 1970). Этот обычный для Крыма позднелетний и осенний вид летает в конце августа, сентябре и начале октября. Отмечен, в основном, на сложноцветных, но посещает цветки растений и других семейств. В Казантипском заповеднике зарегистрирован впервые. Отмечен лёт и сбор провизии на *G. villosa* в первой декаде октября.

Пчела андрена бахромчатая – *Andrena marginata* Fabricius, 1776. Вид, широко распространенный в Палеарктике. Относительно редкий вид, летает с конца июля по сентябрь, трофически связан с растениями семейства жимолостные (*Cephalaria*, *Knautia*, *Scabiosa*) (Осичнюк, 1977).

В Крыму до настоящего времени этот вид отмечен не был. Анализ пыльцы из обножек самок, отловленных в Казантипском заповеднике в начале октября на цветках солнечника (рис. 1 в, з), показал присутствие в них исключительно пыльцы этих растений.

Следует отметить, что определение этого вида пчел носит предварительный характер. Крайне поздние сроки лёта и регистрация его как опылителя солнечников, а также некоторые особенности морфологии позволяют несколько усомниться в определении. Окончательный ответ на этот вопрос будет получен после исследования самцов, пока не обнаруженных в заповеднике.

Гигантская смоляная пчела – *Megachile sculpturalis* Smith, 1853. Восточно-палеарктический вид, изначально обитающий в Китае, на Корейском полуострове и Японии.

В конце XX века был случайно завезен в США (Северная Королина, 1994 г.) где быстро распространился по штатам, а затем и всей Северной Америке. В 2008 году был впервые отмечен в Европе, где также стал быстро распространяться, достигнув Крыма в 2018 году (Ivanov, Fateyga, 2019). По всему ареалу вид демонстрирует тесную трофическую связь с софорой японской (*Styphnolobium japonicum* (L.) Schott), растением, первичный ареал которого также находится в Китае.

На Керченском полуострове данный вид зарегистрирован впервые. Самки, собирающие провизию на софоре, отмечены близ Казантипского заповедника в г. Щелкино, в озеленении которого присутствует софора (рис. 3). В полуденное время в пределах видимости ($5 \times 10 \text{ м}^2$) на одном дереве софоры можно было наблюдать одновременное присутствие на цветках до пяти фуражирующих самок.

Складчатокрылая оса *Euodynerus posticus* (Herrich-Schäffer, 1841). Вид распространен в Северной Африке, в Европе (включая европейскую часть России), на Кавказе, в Малой Азии, Израиле и Иране. В Крыму отмечен в Предгорной зоне, на Южном берегу Крыма, в степных районах (Тарханкут, пгт Советское) (Fateyga, 2018). На Керченском полуострове *E. posticus* регистрируются впервые.



Рис. 3. Дерево цветущей софоры японской на обочине дороги в г. Щелкино (a), и самка *Megachile sculpturalis* на цветке (b)

Две самки *E. posticus* заселили гнездо-ловушку, установленную на стене небольшой деревянной постройки на берегу бухты Шелковица Русская. 26.07.2022 одна самка была занята провиантацией гнезда, вторая – очищала тростниковую трубку от пыльцы, которая осталась в ней после вылета первого поколения пчелы *Osmia signata* Erichson, 1835.

Полученные данные свидетельствуют о том, что использование гнезд-ловушек, рекомендованное ранее как дополнительный метод изучения фауны пчел и ос жильцов (Иванов и др., 2019), показало в очередной раз свою эффективность.

Таким образом, проведенные нами исследования позволяют дополнить список фауны Казантипского заповедника тремя новыми видами пчел: коллетес плющевый (*Colletes hederæ*), коллетес схожий (*Colletes similis*) и андрена отороченная (*Andrena marginata*), а также одним видом складчатокрылых ос – *Euodynerus posticus*.

Изучение экологии гнездования пчел и ос Казантипского природного заповедника

Пчела-лепщица Лефевра – *Megachile lefebvrei* (Lepelletier, 1841) s. l. Ареал: Европа, Северная Африка, Малая Азия, Кавказ, Иран. Обитающую вне Северной Африки форму часто выделяют в отдельный вид *M. albocristata* Smith, 1853 (Fateyga, Proshchalykin, 2020). В Крыму

встречается во всех природных зонах, возможно, за исключением горных лесов и яйл (Fateryga et al., 2018). Типичные места обитания на полуострове – участки петрофитной степи с хорошо сохранившейся естественной мелиттофильной растительностью. Относится к охраняемым в Крыму видам (Иванов, Фатерыга, 2016).

В Казантипском заповеднике *M. lefebvrei* находит благоприятные условия для обитания – обилие цветущих растений и участки степи с выходами скал и камней, на поверхности которых имеются полости, пригодные для строительства гнезд (рис. 4а). В последней декаде периода лёта мы наблюдали *M. lefebvrei* во время сбора ими пыльцы и нектара на васильке салоницком (*Centaurea salonitana* Vis.) (рис. 4 б) и головчатке уральской (*Cephalaria uralensis* (Murray) Schrad.), где они конкурировали с другими видами одиночных пчел, в частности, с *Xylocopa valga* Gerstaecker, 1872 (рис. 4в) и *Megachile pilicrus* Morawitz, 1877 (рис. 4з).

В заповеднике, как и в других известных нам местах гнездования в Крыму, пчела *M. lefebvrei* устраивала гнезда в неглубоких полостях камней (рис. 5а). Основным материалом для строительства ячеек служила замазка из размоченной земли, из которой самка лепит стенки ячеек. После того, как полость в камне заполнится ячейками, происходит смена строительного материала. Самка переходит на изготовление замазки из пережеванных зеленых листьев. Мы наблюдали изготовление растительной замазки из листьев шток-розы морщинистой (*Alcea rugosa* Alef.) (рис. 5 в, з). Самка готовит порцию замазки во время выгрызания листовой пластинки.

Каждую порцию растительной замазки самка укладывает на поверхность гнезда и сразу же прикрепляет к ней небольшой камешек. Постепенно вся поверхность гнезда покрывается слоем камешков, посаженных на растительную замазку. Если гнездо небольшое, то камешки могут образовывать два и более слоя.

Мы наблюдали сбор земли и камешков самками *M. lefebvrei* в колее проселочной дороги в бухте Шелковица Русская, где в одном месте на небольшом участке колеи, протяженностью 1 м, можно было наблюдать до четырех самок, одновременно собирающих строительный материал (рис. 5б). Общий план строения гнезда и поведения самок *M. lefebvrei* при его строительстве не отличался от такового в других частях ареала (Ferton, 1908).

Земляная пчела андрена большая – *Andrena magna* Warncke, 1965. Редкий, вероятно, Понтический вид. Известен из Греции, Румынии, Грузии, Армении, Турции и Крыма (Осичнюк, 1977; Иванов, Сидоров, 2021). В Крыму вид приурочен к разнотравным петрофитным и ксерофитным степям с богатой мелиттофильной растительностью (рис. 6). Дает два поколения за сезон, сроки лёта: апрель – май (первое поколение) и конец июня – июль (второе поколение). Вид внесен в Красные книги Республики Крым (Филатов, Иванов, 2016) и Российской Федерации (Иванов, Сидоров, 2021).

В Казантипском заповеднике в период лёта первого поколения вид отмечен как опылитель ряда охраняемых видов растений, в частности, тюльпанов душистого (*Tulipa suaveolens* Roth) (рис. 6б) и южного (*Tulipa sylvestris* subsp. *australis* (Link) Pamp.) (рис. 6 д), пиона тонколистного (*Paeonia tenuifolia* L.), а также орхидеи анакамптиса кавказского (*Anacamptis morio* subsp. *caucasica* (K. Koch) H. Kretzschmar, Eccarius & H. Dietr.).

В период лёта второго поколения *A. magna* посещает многие виды дикоросов, цветущих в июле – начале августа (Филатов, Иванов, 2016).

Гнездится *A. magna* в земле, предпочитая участки с глинистой почвой и разреженной растительностью или без нее: обочины полевых дорог, тропинки, обнажения глин (рис. 7).

Самки, поселяясь неподалеку друг от друга, образуют колонии (скопления гнезд). Число пчел, гнездящихся в одной колонии, может быть небольшим – 5–10 самок, или достигать 100 и более особей. В Казантипском заповеднике обнаружены две большие колонии *A. magna*. Одна из них – на участке глинистой почвы с разреженной растительностью на берегу бухты Воротня (Глинище) содержала более 100 одновременно гнездящихся самок. Вторая – на обочине дороги между бухтами Шелковица Русская и Широкая – численностью 156



Рис. 4. Стация гнездования и кормовые растения *Megachile lefebvrei* в Казантипском заповеднике
Каменный хаос в бухте Шелковица Русская (а); василек салоникийский (б); *Xylocopa valga* на соцветии головчатки уральской (в); *Megachile pilicrus* на соцветии василька салоникийского (г).



Рис. 5. Гнездование *Megachile lefebvrei* в Казантипском заповеднике

a – гнездо *M. lefebvrei* в углублении камня, хорошо видно наружное покрытие в виде слоя из мелких камешков, скрепленных растительной замазкой; *б* – самка *M. lefebvrei* готова взлететь с камешком в жвалах, который она выбрала для изготовления покрытия гнезда; *в* – изготовление растительной замазки из листовой пластинки шток-розы морщинистой; *г* – лист шток-розы с погрызами, сделанными самками *M. lefebvrei* при изготовлении замазки.

одновременно гнездящихся самок, средняя плотность гнезд – 2,2 гнезда на 1 м², максимальная – 28. В одной из колоний *A. magna* отмечено гнездование самок только первого поколения. Причины разлета самок второго поколения пока непонятны.

Нами была проведена раскопка гнезд *A. magna* после выхода первого поколения пчел (рис. 7). Входное отверстие гнезда небольшого диаметра – 5–5,5 мм. Гнездовой холмик односторонний, пологий. Гнездовой ход вертикальный, плавно извилистый, диаметр хода – 10 мм. Стенки хода плотные, утрамбованные. На глубине 15–25 см вокруг хода в коротких отрезках располагаются ячейки. Ячейки вертикальные или с небольшим отклонением от вертикали, правильной овальной формы. Размеры ячейки: 18–19×10 мм, горловина 8 мм. Стенки ячеек сильно утрамбованные, блестящие, отполированные. Сведения о гнездовании *A. magna* приводятся впервые.



Рис. 6. Стации фуражировки *Andrena magna* и самки
на цветках кормовых растений

Самки *A. magna* за сбором провизии на козелеце мягком (а), тюльпане душистом (б) и чертополохе крючковатом Дэвиса (г). Петрофитные варианты степи – кормовые участки *A. magna*: бухта Шелковица Русская, цветение чертополоха крючковатого Дэвиса (в); мыс Шарабай, цветение тюльпана южного (д).



Рис. 7. Гнездование земляной пчелы *Andrena magna* в Казантипском заповеднике
Места образования колоний: отрыв оползня на склоне бухты Круглая (а) и проселочная дорога на территории заповедника (б); вход в гнездо *A. magna* (в). Две вскрытые ячейки гнезда (г) и срез одной из ячеек (д). Одно деление масштабной линейки – 1 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружение на территории Казантипского заповедника новых видов пчел (*Colletes hederiae*, *C. similis*, *Andrena marginata*) и одного вида ос (*Euodynerus posticus*) свидетельствует о достаточной сохранности его природных комплексов и перспективности продолжения изучения фауны перепончатокрылых заповедника.

На границе заповедника в г. Щелкино отмечен инвазивный вид пчелы *Megachile sculpturalis* Smith, 1853. Его обнаружение на Керченском полуострове свидетельствует о заселении этим видом всего крымского полуострова.

Специфика фаунистических исследований на заповедных территориях состоит в невозможности применения традиционных методов сбора и идентификации насекомых, связанных с их умерщвлением. Применение авторами специального устройства для временной фиксации пчел и ос, их осмотра и фотосъемки позволило успешно преодолеть эти трудности.

Применение гнезд-ловушек показало себя как достаточно эффективный дополнительный метод выявления редких видов на заповедных территориях. Гнездо-ловушка была заселена новым для заповедника видом – складчатокрылой осой *Euodynerus posticus*.

Казантипский заповедник, обладая уникальным разнообразием рельефа, почв и растительности, открывает уникальные возможности для изучения экологии гнездования пчел и ос, особенно гнездящихся на морских побережьях, обычно активно посещаемых отдыхающими и застраиваемых в рекреационных целях. В ходе исследований на территории заповедника впервые изучена экология гнездования охраняемого вида пчел *Andrena magna*, а также получены ценные сведения по экологии гнездования еще одного охраняемого вида пчел – *Megachile lefebvrei*.

Пчелы *A. magna* первого поколения впервые отмечены как опылители нескольких охраняемых видов растений, произрастающих в заповеднике: *Tulipa biebersteiniana*, *T. suaveolens*, *Paeonia tenuifolia*, а также *Anacamptis morio* subsp. *caucasica*.

Благодарности. За содействие в организации экспедиционных выездов в Казантипский заповедник благодарим сотрудника ФГБУ «Заповедный Крым» Александра Чернышова, а также инспекторов охраны заповедника Евгения Артемова, Михаила Письменного и Ивана Гарбуза. Выражаем благодарность к.б.н. М. Ю. Прощалькину (Владивосток) и к.б.н. Д. А. Сидорову (Кемерово) за плодотворное обсуждение результатов исследования и помощь в определении пчел. Работа А. В. Фатерыги проведена в рамках темы государственного задания № 121032300023-7.

Список литературы

- Ена А. В. Природная флора Крымского полуострова. – Симферополь: Н. Орианда, 2012. – 232 с.
- Иванов С. П., Мензатова Э. А. Методика изучения структуры трофических связей диких пчел-мегахилид (Hymenoptera, Megachilidae) по результатам анализа состава пыльцы из ячеек гнезд и скопы самок // Экосистемы. – 2016. – Вып. 5. – С. 66–86.
- Иванов С. П., Сидоров Д. А. Большая андрена. *Andrena magna* Warncke, 1965 // Красная книга Российской Федерации. Животные. – М.: ВНИИ Экология, 2021. – С. 204.
- Иванов С. П., Фатерыга А. В. Пчелы-мегахилиды (Hymenoptera: Megachilidae) Крымского природного заповедника // Биоразнообразие и роль животных в экосистемах: IV Международная конференция (Днепропетровск, 9–12 октября 2007 г.). – Днепропетровск: Днепропетровский национальный университет, 2007. – С. 257–258.
- Иванов С. П., Фатерыга А. В. Пчелы-мегахилиды (Hymenoptera, Megachilidae) Ялтинского горно-лесного природного заповедника // Заповідна справа в Україні. – 2011. – Т. 17, № 1–2. – С. 84–89.
- Иванов С. П., Фатерыга А. В. Пчела-каменщица Лефевра // Красная книга Республики Крым. Животные / Издание второе; ред. С. П. Иванов, А. В. Фатерыга. – Симферополь: Ариал, 2016. – С. 233.
- Иванов С. П., Фатерыга А. В., Жидков В. Ю. Жалящие перепончатокрылые (Hymenoptera, Aculeata), заселяющие гнезда-ловушки в Крыму // Энтомологическое обозрение. – 2019. – Т. 98, № 1. – С. 70–90.

- Иванов С. П., Филатов М. А., Фатерыга А. В. Пчелы-мегахилиды (Hymenoptera: Apoidea: Megachilidae) Карадагского природного заповедника, Отузской долины и Лисьей бухты // Карадаг – 2009: Сб. науч. тр., посвящ. 95-летию Карадагской научной станции и 30-летию Карадагского природного заповедника Национальной Академии наук Украины. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – С. 208–214.
- Корженевский В. В., Рыфф Л. Э., Литвинюк Н. А. Анализ флоры высших сосудистых растений Казантипского природного заповедника // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2006. – Т. 126. – С. 165–189.
- Определитель насекомых европейской части СССР. Т. III. Перепончатокрылые. Первая часть. – Л.: Наука, 1978. – 284 с. (Определители по фауне, издаваемые Зоологическим институтом АН СССР, вып. 119).
- Осичнюк Г. З. Фауна України. Т. 12. Бжоліні. Вип. 4. Бджолі-колетіди. – Київ: Наукова думка, 1970. – 159 с.
- Осичнюк Г. З. Фауна України. Т. 12. Бжоліні. Вип. 5. Бджолі-андреніди. – Київ: Наукова думка, 1977. – 328 с.
- Фатерыга А. В. Складчатокрылые осы (Hymenoptera: Vespidae) основных лесов Ялтинского горно-лесного заповедника // Биоразнообразие и роль зооценоза в естественных и антропогенных экосистемах: III Международная конференция. – Днепропетровск: Днепропетровский национальный университет, 2005. – С. 315–316.
- Фатерыга А. В. Складчатокрылые осы (Hymenoptera: Vespidae) Казантипского природного заповедника // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2006. – Т. 126. – С. 292–294.
- Фатерыга А. В. Складчатокрылые осы (Hymenoptera: Vespidae) Природного заповедника Мыс Мартыян // Биоразнообразие и роль животных в экосистемах: IV Международная конференция (Днепропетровск, 9–12 октября 2007 г.). – Днепропетровск: Днепропетровский национальный университет, 2007. – С. 305–306.
- Фатерыга А. В., Иванов С. П. Результаты 100-летнего изучения фауны складчатокрылых ос Карадагского природного заповедника и прилегающих территорий // Заповідна справа в Україні. – 2009. – Т. 15, № 1. – С. 65–70.
- Фатерыга А. В., Филатов М. А. Складчатокрылые осы (Hymenoptera: Vespidae) Опуцкого природного заповедника // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2006. – Т. 126. – С. 118–120.
- Филатов М. А. К фауне пчел (Hymenoptera: Apoidea) Опуцкого природного заповедника // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2006. – Т. 126. – С. 110–117.
- Филатов М. А., Иванов С. П. Андрена большая *Andrena magna* Warncke, 1965 // Красная книга Республики Крым. Животные / Издание второе; ред. С. П. Иванов, А. В. Фатерыга. – Симферополь: Ариал, 2016. – С. 225.
- Филатов М. А., Иванов С. П., Будашкин Ю. И. Пчелы (Hymenoptera, Apoidea) Казантипского природного заповедника // Труды Государственного Никитского ботанического сада. – 2006. – Т. 126. – С. 258–262.
- Bogusch P., Lukáš J., Šlachta M., Straka J., Šima P., Erhart J., Přidal A. The spread of *Colletes hederæ* Schmidt & Westrich, 1993 continues – first records of this plasterer bee species from Slovakia and the Czech Republic // Biodiversity Data Journal. – 2021. – Vol. 9. – e66112.
- Fateryga A. V. Wasps of the family Vespidae (Hymenoptera) of the Crimean Peninsula // Entomofauna. – 2018. – Bd. 39. – S. 193–233.
- Fateryga A. V., Ivanov S. P., Filatov M. A. Megachilid-bees (Hymenoptera: Megachilidae) of the Crimean Peninsula // Entomofauna. – 2018. – Bd. 39. – S. 235–283.
- Fateryga A. V., Proshchalykin M. Yu. New records of megachilid bees (Hymenoptera: Megachilidae) from the North Caucasus and the South of European Russia // Caucasian Entomological Bulletin. – 2020. – Vol. 16, N 2. – С. 225–231.
- Fateryga A. V., Protsenko Yu. V., Zhidkov V. Yu. *Isodontia mexicana* (Hymenoptera, Sphecidae), a new invasive wasp species in the fauna of Ukraine reared from trap-nests in the Crimea // Vestnik Zoologii. – 2014. – Vol. 48, N 2. – С. 185–188.
- Ferton C. Notes détachées sur l'instinct des Hyménoptères mellifères et ravisseurs (4^e série) avec la description de quelques espèces // Annales de la Société Entomologique de France. – 1908. – Vol. 77. – P. 535–586 + pl. 14.
- Hopfenmüller S. Folgt die Efeu-Seidenbiene *Colletes hederæ* Schmidt & Westrich, 1993 dem Ausbreitungsweg der Furchenbiene *Halictus scabiosae* (Rossi, 1790) in Bayern? (Hymenoptera: Apoidea) // Nachrichtenblatt der Bayerische Entomologie. – 2014. – Bd. 63, Hf. 1/2. – S. 2–7.
- Ivanov S. P., Fateryga A. V. First record of the invasive giant resin bee *Megachile (Callomegachile) sculpturalis* Smith, 1853 (Hymenoptera: Megachilidae) in the Crimea // Far Eastern Entomologist. – 2019. – N 395. – P. 7–13.
- Kuhlmann M., Proshchalykin M. Y. The bees of the genus *Colletes* Latreille (Hymenoptera: Colletidae) of the Caucasus region // Zootaxa. – 2016. – Vol. 4161, N 3. – P. 367–385.
- Mangum W. A., Brooks R. W. First records of *Megachile (Callomegachile) sculpturalis* Smith (Hymenoptera: Megachilidae) in the Continental United States // Journal of the Kansas Entomological Society. – 1997. – Vol. 70, N 2. – P. 140–142.
- Mauss V., Fateryga A. V., Yildirim E., Carpenter J. M. Contribution to the taxonomy, bionomics and distribution of the Palaearctic *Celonites cyprius*-group (Hymenoptera, Vespidae, Masarinae) with the description of two new species from the North Caucasus and East Anatolia // Journal of Hymenoptera Research. – 2022. – Vol. 89. – P. 109–155.
- Michez D., Kuhlmann M., Ivanov S. P., Radchenko V. G. Description of four new species in the bee genus *Melitta* Kirby, 1802 (Hymenoptera: Melittidae) // Zootaxa. – 2012. – Vol. 3337. – P. 57–67.
- Mokrousov M. V., Shorenko K. I., Shlyakhtenok A. S. New data on the Palaearctic digger wasps (Hymenoptera: Sphecidae, Crabronidae) // Far Eastern Entomologist. – 2019. – N 396. – P. 10–16.

Müller A., Kuhlmann M. Pollen hosts of western Palaearctic bees of the genus *Colletes* (Hymenoptera: Colletidae): the Asteraceae paradox // *Biological Journal of the Linnean Society*. – 2008. – Vol. 95, N 4. – P. 719–733.

Pisanty G., Scheuchl E., Martin T., Cardinal S., Wood T. J. Twenty-five new species of mining bees (Hymenoptera: Andrenidae: *Andrena*) from Israel and the Levant // *Zootaxa*. – 2022. – Vol. 5185, N 1. – P. 1–109.

Portman Z. M., Burrows S. J., Griswold T., Arduser M., Irber A. J., Tonietto R. K., Cariveau D. P. First records of the adventive *Pseudoanthidium nanum* (Mocsáry) (Hymenoptera: Megachilidae) in Illinois and Minnesota, with notes on its identification and taxonomy // *Great Lakes Entomologist*. – 2019. – Vol. 52, N 1–2. – P. 12–20.

Proshchalykin M. Yu., Astafurova Yu. V., Schwarz M., Levchenko T. V., Byvaltsev A. M. New records to the bee fauna of Russia (Hymenoptera, Apiformes) // *Far Eastern Entomologist*. – 2017. – N 337. – P. 17–24.

Saure C., Streese N., Ziska T. Erstnachweise von drei ausbreitungsstarken Stechimmenarten für Berlin und Brandenburg (Hymenoptera Aculeata) // *Märkische Entomologische Nachrichten*. – 2019. – Bd. 21, Hf. 2. – P. 243–252.

Schmidt K., Westrich P. *Colletes hederæ* n. sp., eine bisher unerkannte auf Efeu (*Hedera*) spezialisierte Bienenart (Hymenoptera: Apoidea) // *Entomologische Zeitschrift*. – 1993. – Bd. 103, Hf. 6. – S. 89–112.

Vereecken N. J., Barbier E. Premières données sur la présence de l'abeille asiatique *Megachile* (*Callomegachile*) *sculpturalis* Smith (Hymenoptera, Megachilidae) en Europe // *Osmia*. – 2009. – N 3. – P. 4–6.

Westrich P. Flexibles Pollensammelverhalten der ansonsten streng oligolektischen Seidenbiene *Colletes hederæ* Schmidt & Westrich (Hymenoptera: Apidae) // *Eucera*. – 2008. – N 2. – P. 17–29.

Ivanov S. P., Pyshkin V. B., Fateryga A. V., Puzanov D. V., Litvinyuk N. A., Svolynsky A. D., Kuramova V. V. New data on the fauna and ecology of protected species of bees (Andrenidae, Colletidae, Megachilidae) and wasps (Vespidae) of the Kazantip Nature Reserve // *Ekosistemy*. 2022. Iss. 32. P. 121–133.

The following bee species new to the Kazantip Nature Reserve are reported: *Colletes hederæ* Schmidt & Westrich, 1993, *C. similis* Schenk, 1853, *Andrena marginata* Fabricius, 1776, as is one species of vespid wasp, *Euodynerus posticus* (Herrich-Schäffer, 1841). In late September/early October, bees were recorded on two forage species: *Galatella villosa* (L.) Rchb. f. and *Galatella linosyris* (L.) Rchb. f., with their scopa full of pollen of these plants. The wasp *E. posticus* was detected in a trap-nest, occupied by females of this species. The nesting ecology of protected species of bees, *Megachile lefebvrei* (Lepelletier, 1841) and *Andrena magna* Warncke, 1965, is described. The bee *M. lefebvrei* inhabits areas of petrophytic steppe in the Reserve, nesting in shallow rock cavities, sometimes of a size of a single cell. Mastic made of mud mixed with salivary secretions was used as the main construction material. The final outer covering of the nest is built by the bee from small pebbles glued with putty made from chewed leaves of *Alcea rugosa* Alef. The *A. magna* bee nests colonially in the Reserve. The colonies are located in areas with clayey soil and sparse vegetation, usually on field roadsides, along paths or on outcrops of clay slopes. The largest colony in the Kazantip Nature Reserve consisted of 156 nests, with an average density of 2.2 nests per 1 m² and a maximum density of 28 nests. Nests were excavated after the first generation of bees had emerged. Nesting burrow is vertical, smoothly winding, 10 mm in diameter. Vertically placed oval cells (18–19×10 mm, neck 8 mm) are located in short nest burrows at the depth of 15–25 cm. The data on the nesting of *A. magna* are reported for the first time. Bees of the first-generation of *A. magna* in the Reserve are recorded as pollinators of several protected plant species: *Tulipa sylvestris* subsp. *australis* (Link) Pamp., *T. suaveolens* Roth, *Paeonia tenuifolia* L., as well as *Anacamptis morio* subsp. *caucasica* (K. Koch) H. Kretzschmar, Eccarius & H. Dietr. An invasive bee species *Megachile sculpturalis* Smith, 1853 was recorded on the border of the reserve in the town of Shchelkino.

Key words: wild bees, *Colletes hederæ*, *C. similis*, *Andrena magna*, *A. marginata*, *Megachile lefebvrei*, *M. sculpturalis*, *Euodynerus posticus*, bee nesting, trophic relationships, Kazantip Nature Reserve, Crimean Peninsula.

Поступила в редакцию 15.11.22

Принята к печати 30.12.22

СОДЕРЖАНИЕ

Сальникова Е. В., Каныгина О. Н., Юдин А. А. Сезонные изменения концентрации эссенциальных элементов в подземных водах Оренбургской области.....	5
Самбуу А. Д. Вторичные сукцессии фитоценозов в степных экосистемах Тувы.....	15
Салихов Ш. К., Гасанов Г. Н., Яхияев М. А., Гаджиев К. М., Баширов Р. Р., Рамазанова Н. И., Гимбатова К. Б., Кичева Ж. О., Ахмедова З. Н. Накопление азота фитоценозами дагестанской части Восточного Кавказа.....	24
Романчук Р. В., Мещерякова И. С., Поушкова С. В., Касаткин Д. Г., Хачиков Э. А., Купрюшкин Д. П. К распространению ясеневой изумрудной узкотелой златки <i>Agriilus planipennis</i> (Coleoptera: Vuprestidae) на юге Ростовской области	33
Кузьмина Т. Н. Сезонная динамика роста и развития пыльников <i>Jasminum fruticans</i> L. (Oleaceae) в условиях Южного берега Крыма	42
Зайцева Т. Б., Руссу А. Д., Медведева Н. Г. Микробиологическая деградация гормоноподобных ксенобиотиков	52
Ржевская В. С., Минкина Т. М., Крыжко А.В., Бурлуцкая Е.И., Лисовенко Р. В. Технологические приемы улучшения качества компоста, полученного из органических отходов мусороперерабатывающего завода	60
Щербань С. А, Макаров М. В., Мельник А. В. <i>Cerastoderma glaucum</i> (Bruguere, 1789) (Cardiidae) – малоизученный вид двустворчатых моллюсков Черного моря: распространение и некоторые аспекты биологии и физиологии. Обзор	73
Новиков И. А., Яцкова Е. В., Пузанова Е. В., Билык А. И., Шармагий А. К., Оберемок В. В. Первый опыт применения олигонуклеотидных инсектицидов для контроля численности калинового мучнистого червеца <i>Pseudococcus viburn</i>	85
Пономарева Т. В., Богородская А. В. Содержание тяжелых металлов и микробиологическая характеристика почв в импактной зоне Красноярского алюминиевого завода	90
Копий В. Г., Бондаренко Л. В., Тимофеев В. А., Подзорова Д. В., Макаров М. В., Ковалёва М. А. Макрозооэпифитон макрофитов мелководья Керченского пролива и прибрежной зоны Таманского полуострова.....	106
Иванов С. П., Пышкин В. Б., Фатерыга А. В., Пузанов Д. В., Литвинюк Н. А., Свольнский А. Д., Курамова В. В. Новые сведения о фауне и экологии охраняемых видов пчел (Andrenidae, Colletidae, Megachilidae) и ос (Vespidae) Казантипского природного заповедника.....	121

CONTENT

Salnikova E.V., Kanygina O.N., Yudun A.A. Seasonal changes in the concentration of essential elements in the underground waters of the Orenburg region	5
Sambuu A. D. Secondary successions of phytocenoses in steppe ecosystems of Tuva.....	15
Salikhov Sh. K., Gasanov G. N., Yakhyaev M. A., Gadzhiev K. M., Bashirov R. R., Ramazanova N. I., Gimbatova K. B., Kicheva Zh. O., Akhmedova Z. N. Nitrogen accumulation by phytocenoses of the Dagestan part Eastern Caucasus.....	24
Romanchuk R. V., Meshcheryakova I. S., Poushkova S. V., Kasatkin D. G., Khachikov E. A., Kupryushkin D. P. The distribution of the emerald ash borer <i>Agrilus planipennis</i> (Coleoptera: Buprestidae) in the south of the Rostov region.....	33
Kuzmina T.N. Seasonal dynamics of growth and development of anthers of <i>Jasminum fruticans</i> L. (Oleaceae) in conditions of the Southern Coast of Crimea	42
Zaytseva T.B., Russu A.D., Medvedeva N.G. Microbiological degradation of endocrine disrupting xenobiotics.....	52
Rzhevskaya V. S., Minkina T. M., Kryzhko A. V., Burlutskaya E. I., Lisovenko R. V. Technological methods to improve the quality of compost at a waste processing plant	60
Shcherban S. A., Makarov M. V., Melnic A. V. The understudied bivalve species of the Black Sea <i>Cerastoderma glaucum</i> (Bruguere, 1789) (Cardiidae): distribution and some aspects of biology and physiology. A review	73
Novikov I. A., Yatskova E. V., Puzanova Ye. V., Bilyk A. I., Sharmagiy A. K., Oberemok V. V. The first experience of using oligonucleotide insecticides for the obscure mealybug <i>Pseudococcus viburni</i> Signoret control.....	85
Ponomareva T. V., Bogorodskaya A. V. Content of heavy metals and microbiological characteristics of soils in the impact zone of Krasnoyarsk aluminum plant	90
Kopiy V. G., Bondarenko L. V, Timofeev V. A., Podzorova D. V., Makarov M. V., Kovaleva M. A. Macrozoepiphyton of macrophytes of the shallow waters of the Kerch Strait and the coastal zone of the Taman Peninsula	106
Ivanov S. P., Pyshkin V. B., Fateryga A. V., Puzanov D. V., Litvinyuk N. A., Svolynsky A. D., Kuramova V. V. New data on the fauna and ecology of protected species of bees (Andrenidae, Colletidae, Megachilidae) and wasps (Vespidae) of the Kazantip Nature Reserve.....	121