БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЭКОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

ECOLOGY

Издается с сентября 2017 г.
(до 2017 г. – «Экологический вестник»)
Выходит 1 раз в квартал

2 2024

МИНСК
БГУ

EDITORIAL BOARD

УДК 595.753;632.75;635.918(476)

КОКЦИДЫ (COCCOIDEA) ЗАКРЫТОГО ГРУНТА БЕЛАРУСИ. ВИДОВОЙ СОСТАВ И ХАРАКТЕР НАНОСИМЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Д. Г. ЖОРОВ

Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

В исследовании представлена информация о биологических особенностях, географическом происхождении, трофической специализации, характере инициируемых повреждений червецами и щитовками в условиях закрытого грунта Беларуси. В настоящее время из 39 видов Coccoidea, отмеченных в региональной фауне Беларуси, для 15 видов семейств Ortheziidae, Pseudococcidae, Coccidae и Diaspididae характерно обитание в условиях закрытого грунта, что составляет 38,5 % от общего видового состава. Преобладающее большинство (7 видов; 46,7 %) принадлежит семейству Pseudococcidae. К представителям Diaspididae относится 5 видов, что составляет 33,3 % от общего числа. В условиях закрытого грунта семейство Coccidae представлено двумя видами: ложнощитовкой мягкой (*Coccus hesperidum* Linnaeus, 1758) и полушаровидной (*Saissetia coffeae* (Walker, 1852)). Единичным видом – червецом пластинчатым оранжерейным (*Insignorthezia insignis* (Browne, 1887)) представлено семейство Ortheziidae. В условиях закрытого грунта большинство червецов и щитовок (11 видов) по трофической специализации принадлежат к числу неспециализированных фитофагов (полифаги), что составляет 73,4 % от списочного состава.

Образец цитирования:
Жоров ДГ. Кокциды (Coccoidea) закрытого грунта Беларуси. Видовой состав и характер наносимых повреждений. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;2:4–14.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-4-14

For citation:
Zhorov DG. Coccoidea of the indoor soil of Belarus. Species composition and nature of damage caused. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;2:4–14. Russian.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-4-14

Автор:
Дмитрий Георгиевич Жоров – кандидат биологических наук, доцент; заместитель начальника Главного управления – начальник отдела аспирантуры и докторантуры.

Author:
Dmitrii G. Zhorov, PhD (biology), docent; deputy head of the general directorate of science – head of the department of the postgraduate and doctoral studies.
zhorovdg@bsu.by

К специализированным (олигофаги) и узкоспециализированным (монофаги) фитофагам относится по 2 вида, что составляет по 13,3 % соответственно. Хорологический анализ кокцид, обитающих в условиях закрытого грунта Беларуси, показал, что большинство представителей (6 видов) имеют естественно-исторически сложившиеся ареалы в Северной, Центральной и Южной Америке, что составляет 40 % от списочного состава. Выходцами из афротропического региона являются три вида кокцид – *Vryburgia amaryllidis*, *Saissetia coffeae* и *Aspidiotus nerii*. Территория Австралии является регионом происхождения для червеца мучнистого цитрусового (*Pseudococcus calceolariae*), Средиземноморье – для щитовки лавровой (*Aonidia lauri*), Юго-Восточная Азия – для щитовки палочковидной (*Lepidosaphes gloverii*). Для двух видов кокцид (ложнощитовки мягкой (*Coccus hesperidum*) и щитовки розанной (*Aulacaspis rosae*)) предполагается, что регионом их происхождения является территория Азии.

В работе приведен перечень карантинных видов кокцид (Coccoidea) для осуществления фитосанитарного контроля (надзора) подкарантинной продукции и объектов с целью недопущения ввоза и распространения их по территории Беларуси.

Ключевые слова: вредители; инвазивные виды; карантинные виды; кокциды; фитофаги; закрытый грунт; фауна.

COCCOIDEA OF THE INDOOR SOIL OF BELARUS. SPECIES COMPOSITION AND NATURE OF DAMAGE CAUSED

D. G. ZHOROV

Belarusian State University,
4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

The paper presents information on biological peculiarities, geographical origin, trophic specialisation, nature of initiated damage by cutworms and shields in the closed ground conditions of Belarus. At present, out of 39 Coccoidea species recorded in the regional fauna of Belarus, 15 species of the families Ortheziidae, Pseudococcidae, Coccidae and Diaspididae are characterized as living in indoor conditions, which is 38.5 % of the total species composition. The predominant majority (7 species; 46,7 %) belongs to the family Pseudococcidae. Representatives of Diaspididae include 5 species, which is 33,3 % of the total number. Under indoor conditions, the family Coccidae is represented by two species: soft spoonworm (*Coccus hesperidum* Linnaeus, 1758) and hemispherical worm (*Saissetia coffeae (*Walker, 1852)). A single species – greenhouse lamellar worm (*Insignorthezia insignis* (Browne, 1887)) is represented in the family Ortheziidae.

Under indoor conditions, the majority of cutworms and cutworms (11 species) belong to non-specialized phytophages (polyphagous) by trophic specialization, which is 73,4 % of the list. Specialized (oligophages) and highly specialized (monophages) phytophages include 2 species each, accounting for 13.3 %, respectively. The chorological analysis of coccids inhabiting in the indoor conditions of Belarus showed that the majority of representatives (6 species) have natural-historically developed ranges from North, Central and South America, which is 40 % of the list composition. Three species of coccids – *Vryburgia amaryllidis*, *Saissetia coffeae* and *Aspidiotus nerii* – are native to the Afrotropical region. Australia is the region of origin for the citrus mealybug (*Pseudococcus calceolariae*), the Mediterranean for the laurel worm (*Aonidia lauri*), and Southeast Asia for the stick worm (*Lepidosaphes gloverii*). For two coccidian species (the soft spoonbill (*Coccus hesperidum*) and the rose borer (*Aulacaspis rosae*)), Asia is assumed to be the region of origin.

The list of quarantine species of coccids (Coccoidea) for phytosanitary control (supervision) of regulated products and objects in order to prevent their import and spread in Belarus is given.

Keywords: pests; invasive species; quarantine species; coccids; phytophages; closed ground; fauna.

Введение

Интенсификация торгово-рыночных отношений межу странами мира и активный импорт овощной, цветочной и декоративной продукции создали определенные предпосылки для проникновения чужеродных инвазивных видов насекомых-вредителей во все страны Европы, включая и территорию современной Республики Беларусь.

Особо опасным является проникновение вредителей в закрытый грунт (теплицы и оранжереи) [1], так как в нем создаются оптимальные условия (температурный режим, влажность) для круглогодичного размножения и развития насекомых-вредителей, преимущественно тропического и субтропического происхождения. Стремительному увеличению количества особей растительноядных вредителей также способствует отсутствие в условиях защищенного грунта естественных регуляторов численности [2]. Характерным для оранжерей и теплиц является преобладание фитофагов с сосущим типом ротового аппарата (тепличная белокрылка, некоторые виды тлей, бахромчатокрылых, кокцид и др.) [2].

Среди многочисленных видов насекомых-вредителей декоративных растений самыми трудноискоренимыми являются кокциды, или червецы и щитовки (Coccoidea). В силу своей экологической пластичности,

небольших размеров, скрытого образа жизни, отсутствия в новых местообитаниях различных видов хищных насекомых и паразитоидов, тесной трофической связи с кормовыми растениями они чаще других заносятся и проникают с зараженным посадочным материалом за пределы своих первичных ареалов. Проникая на новые, ранее незаселенные территории, они могут выступать в качестве экономически значимых вредителей косточковых и семечковых плодовых, ягодных, технических, полевых, огородных и субтропических культур, оранжерейных и комнатных растений [1].

Червецы и щитовки являются основными вредителями оранжерейных и комнатных растений. Питаясь на кормовых растениях, они потребляют значительное количество пластических веществ, что приводит к неконтролируемым патологическим изменениям в тканях растений (образование различного рода новообразований, или терат), усыхание отдельных веток и стволов, преждевременный опад листьев и плодов. В местах питания формируются хлоротичные участки. Самки и личинки кокцид продуцируют значительное количество медвяной росы, являющейся субстратом для развития сапрофитных сажистых грибов, которые приводят к нарушению ассимиляционных процессов в листьях и снижению декоративных свойств растений [3; 4].

К настоящему времени в региональной фауне Беларуси констатировано присутствие 39 видов Coccoidea из 31 рода и 11 семейств [5; 6], которые выступают в качестве серьезных вредителей декоративных, плодовых, ягодных и лесных культур. Для 15 видов из 12 родов и 4 семейств Ortheziidae, Pseudococcidae, Coccidae и Diaspididae характерно обитание в условиях закрытого грунта [5].

В настоящей работе приводятся данные о биологических особенностях, географическом происхождении, трофической специализации, характере инициируемых повреждений червецами и щитовками в условиях закрытого грунта Беларуси.

Материалы и методы исследования

В основу работы положены данные анализа работ предыдущих лет и результаты собственных исследований. Номенклатура Coccoidea соответствует классификации, приведенной в базе данных ScaleNet [7].

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам проведенных полевых исследований и обобщения данных литературных источников предыдущих лет составлен аннотированный список червецов и щитовок (Coccoidea), развивающихся в условиях закрытого (защищенного) грунта Беларуси, с указанием биологических особенностей, географического происхождения, трофической специализации, характера инициируемых повреждений. Приведены кормовые растения и ссылки на библиографические источники, в которых представлена информация о регистрации данных видов фитофагов на территории Беларуси.

Семейство Ortheziidae (Пластинчатые червецы)

Червец пластинчатый оранжерейный (*Insignorthezia insignis* (Browne, 1887)). Тело взрослой самки *I. insignis* овальное или круглое, длиной до 1,5 мм, шириной до 1,3 мм, темно-коричневого или темно-зеленого цвета с четкой сегментацией. Дорсальная сторона тела голая, за исключением двух узких продольных рядов из 12 маленьких белых восковых отростков, расположенных по обе стороны от средней линии; дорсальные восковые отростки довольно короткие, самые длинные и наиболее изогнутые расположены ближе к заднему концу тела [8–10].

Регион происхождения – Южная Америка [11]. По трофической специализации принадлежит к числу полифагов и является вредителем многих видов оранжерейных растений, среди которых стробилянты (*Strobilanthus* sp.), бигнонии, или биньонии (*Bignonia* sp.), аканты, или акантусы (*Acanthus* sp.), аденокалимы (*Adenocalymna* sp.), фиттонии (*Fittonia* sp.), *Dipterocanthus* sp. и др. [1; 4; 12].

Взрослые самки и личинки *I. insignis* локализуются на стебле и листовых пластинках. При массовом размножении червеца наблюдается задержка в росте и развитии растений, а поврежденные листья преждевременно желтеют и опадают. Насекомые продуцируют значительное количество пади, или медвяной росы, которая выступает в качестве субстрата для развития сапрофитных сажистых грибов [13]. Хозяйственного значения в качестве вредителя в условиях закрытого грунта Беларуси они не имеют [5].

Семейство Мучнистые червецы (Pseudococcidae)

Червец мучнистый цитрусовый (*Pseudococcus calceolariae* Maskell, 1879). Тело взрослой самки *P. calceolariae* овальное, длиной до 4,5 мм и шириной до 2,5 мм, светло-малинового цвета, покрытое белым восковым налетом. По краю тела располагаются толстые восковые нити в количестве 17 пар [14].

Регион происхождения – Австралия [8; 14]. По трофической специализации принадлежит к числу полифагов и повреждает свыше 250 видов субтропических культур и оранжерейных растений, в то время как основными кормовыми растениями являются цитрусовые (Citrinae) [4; 14]. В условиях теплиц может вредить винограду [2].

Взрослые самки и личинки *P. calceolariae* локализуются на стволах, ветках, побегах, листьях и плодах многочисленных декоративных субтропических растений. Заселенные вредителем молодые побеги искривляются, а листовые пластинки деформируются (скручиваются). С появлением плодов колонии червеца цитрусового мигрируют к основанию плодоножки и на плоды. Питаясь на плодоножках, фитофаг способствует их значительному ослаблению, что приводит к массовому опадению плодов, которое может достигать до 90 % урожая [1; 14]. На заселенных цитрусовым червецом плодах образуются пятна с желто-бурыми изъявлениями. Нередко отмечается, что омертвевшая кожица плодов растрескивается, а в образовавшиеся трещины проникают микроорганизмы, которые приводят к их загниванию. При массовой колонизации растений фитофагом наблюдается преждевременный листопад [1; 4]. Выделяемая самками медвяная роса служит субстратом для развития сапрофитных сажистых грибов, которые существенно загрязняют плоды, побеги и листья [14].

Червец мучнистый цитрусовый, указанный как *Pseudococcus gahani* [15], в условиях оранжерей Беларуси встречается редко [15; 16].

Червец мучнистый щетинистый (*Pseudococcus longispinus* Targioni-Tozzetti, 1867). Тело взрослой самки *P. longispinus* удлиненно-овальное, диной до 3,5 мм, шириной до 2,0 мм, зеленоватого цвета, покрытое по средней линии дорсальной поверхности тонким, а по бокам толстым слоем воска. По краю тела расположены тонкие белые восковые нити в количестве 17 пар [14; 17].

Регион происхождения – Тропический [8; 14; 18]. По трофической специализации принадлежит к числу полифагов и повреждает около 270 видов растений [19]. В областях с умеренным климатом встречается только в теплицах и оранжереях, где наносит повреждения ряду декоративных тропические и субтропические видов растений [3], среди которых аспарагусы (*Asparagus* sp.), цикламены (*Cyclamens* sp.), кофейное дерево (*Coffea* sp.), гардении (*Gardenias* sp.), гибискусы (*Hibiscus* sp.), филодендроны (*Philodendrons* sp.), виноградa (*Vitis* sp.), бегонии (*Begonias* sp.), драцены (*Dracaena* sp.), орхидные (Orchidaceae), бромелиевые (Bromeliaceae), цитрусовые (Citrinae) [2].

Взрослые самки и личинки *P. longispinus* локализуются на стволах, ветках, побегах, листьях и плодах, образуя скопления, покрытые воском. Насекомые, изымая пластические вещества, приводят к побурению листовых пластинок, их увяданию и преждевременному опаду, что способствуют потере декоративных свойств. У поврежденных *P. longispinus* растений наблюдается задержка роста побегов, а при массовом заселении – гибель молодых растений. На продуцируемой самками пади развиваются сажистые сапрофитные грибы, которые загрязняют листья и ветви, что приводит к нарушению обмена веществ у растений [2; 19].

В условиях Беларуси отмечен как *Pseudococcus adonidum* [19; 20] в оранжерее Центрального ботанического сада НАН Беларуси, где повреждает олеандр (*Nerium oleander*), колеус (*Coleus* sp.), драцены (*Dracaena* sp.), герани (*Geraniums* sp.), бегонии (*Begonias* sp.), пальмовые (Arecaceae), ароидные (Araceae) и многие другие виды растений [19].

Червец мучнистый приморский (*Pseudococcus maritimus* (Ehrhorn, 1900) (=*Pseudococcus affinis* (Maskell, 1894)). Тело взрослой самки *P. maritimus* овальное, длиной около 5 мм, шириной до 3,0 мм, розоватого цвета, равномерно покрытое восковым налетом. По краю тела расположены тонкие восковые нити в количестве 17 пар, задняя пара длиннее остальных и равна половине тела самки [14].

Регион происхождения – Центральная Америка [14]. По трофической специализации принадлежит к числу широких полифагов и повреждает более 300 видов растений [19]. Является одним из широко распространенных и опасных вредителей субтропических и тропических оранжерейных растений, в том числе огурца (*Cucumis sativus*), томата (*Solanum lycopersicum*), герберы (*Gerbera* sp.), магнолии (*Magnolia* sp.), фикуса (*Ficus* sp.), пуансеттии (*Euphorbia pulcherrima*), винограда (*Vitis* sp.), кактусовых (Cactaceae) и цитрусовых (Citrinae). Часто наносит серьезные повреждения луковицам нарциссов и тюльпанов при хранении [2]. В условиях открытого грунта повреждает яблони (*Malus* sp.), шелковицы (*Morus* sp.), тунги (*Aleurites* sp.), боярышники (*Crataegus* sp.), лавровишню (*Prunus laurocerasus*), акацию ленкоранскую (*Albizia julibrissin*), инжир (*Ficus carica*) и другие древесные и травянистые растения [14].

Взрослые самки и личинки *P. maritimus* локализуются на ветвях, побегах, стволах, листьях, плодах и корнеплодах. При массовой колонизации растений инициируют деформацию листовых пластинок и опадение плодов. В местах скопления червеца кора растрескивается, где формируются язвы, в которые попадают микроорганизмы, что приводит к усыханию ветвей и гибели всего растения. На продуцируемой самками пади развиваются сапрофитные сажистые грибы, которые загрязняют листья и ветви, что способствует нарушению обмена веществ у растений [2; 4; 14; 19].

На территорию Беларуси вид интродуцирован вместе с тропическими и субтропическими растениями и получил широкое распространение в оранжереях Центрального ботанического сада НАН Беларуси, где повреждает Cactaceae, многие виды Liliaceae, Araceae, Palmae, Moraceae и др. [19; 20].

Червец мучнистый калинный (*Pseudococcus viburni* (Signoret, 1875)). Тело взрослой самки *P. viburni* овальное, длиной до 2,5 мм, шириной до 1,5 мм, розового или светло-фиолетового цвета, покрытое тонким мучнисто-восковым налетом. По краю тела располагаются восковые нити в количестве 17 пар [11; 17; 21; 22].

Регион происхождения – Южная Америка [11; 16; 18]. По трофической специализации принадлежит к числу полифагов. Один из самых опасных вредителей комнатных и оранжерейных растений, в числе которых бегонии (*Begonia* sp.), кофе аравийский (*Coffea arabica*), молочай (*Euphorbia* sp.), фатсия японская (*Fatsia japonica*), фикус каучуконосный (*Ficus elastic*), герберы (*Gerbera* sp.), каланхоэ Блоссфельда (*Kalanchoe blossfeldiana*), лавр благородный (*Laurus nobilis*), магнолия крупноцветковая (*Magnolia grandiflora*) и другие [23]. В условиях открытого грунта наиболее часто вредит посадкам груши (*Pyrus* sp.), яблони (*Malus* sp.) и винограда (*Vitis* sp.) [24].

Взрослые самки и личинки *P. viburni* локализуются на корнях, плодах, листьях, стеблях, а также под корой древесных растений. Поврежденные растения отстают в росте, плоды опадают. При вспышках массового размножения инициируют искривление побегов, усыхание отдельных ветвей и молодого растения в целом. Самки продуцируют значительное количество медвяной росы, которая вызывает серьезные вторичные повреждения, поскольку способствует росту сапрофитных сажистых грибов, уменьшающих интенсивность фотосинтеза [7; 25]. Являются переносчиками вируса виноградной лозы (GRLaV-3) [26].

По литературным данным [5], *Pseudococcus viburni* присутствует на территории Беларуси.

Червец мучнистый амариллисовый (*Vryburgia amaryllidis* (Bouché, 1837)). Тело взрослой самки *V. amaryllidis* удлиненное, длиной до 5,0 мм, шириной до 2,2 мм, темно-фиолетового цвета, покрытое тонким слоем белого воска. На двух последних сегментах брюшка расположено по паре коротких, толстых восковых нитей [7; 14].

Регион происхождения – Афротропический [11]. По трофической специализации принадлежит к числу монофагов, которые заселяют и повреждают луковицы *Amaryllus* sp. [14]. Имеются данные о регистрации амариллисового червеца на *Agapanthus* sp. [27]. В регионах с умеренным климатом амариллисовый мучнистый червец вредит в теплицах [7].

Взрослые самки и личинки *V. amaryllidis* локализуются на луковицах растений под чешуйками. Изымая пластические вещества, червец повреждает чешуйки и верхушки луковиц *Amaryllus* sp., что приводит к массовому засыханию растений [1; 12; 14].

Впервые *Vryburgia amaryllidis* (как *Pseudococcus amaryllidis* [19; 20]) был отмечен в 1963 г. на *Amaryllis hybrid. f.* в оранжерее Центрального ботанического сада НАН Беларуси. В результате обработки растений эмульсией тиофоса вредитель был истреблен [19].

Червец обыкновенный кактусовый (*Rhizoecus cacticans* (Hambleton, 1946)). Тело взрослой самки *Rh. cacticans* овальное, длиной до 2,3 мм, шириной до 1 мм, зеленовато-желтого цвета, покрытое тонким слоем мучнистого воска [17; 21].

Регион происхождения – Южная Америка [11; 16]. По трофической специализации принадлежит к числу полифагов [11; 21]. Регистрируется в условиях закрытого грунта [4], где может нанести существенный ущерб [28]. Выступает в качестве серьезного вредителя кактусов (*Cactus* sp.) и других суккулентов [23].

Взрослые самки и личинки *Rh. cacticans* заселяют корни растений, которые покрываются белым пушистым восковым налетом. Почва вокруг растений характеризуется беловатым оттенком. Изымая питательные вещества из корней, инициируют их отмирание, в результате чего растение теряет тургор, желтеет и замедляет рост.

В работах G. Pellizzari & J.-F. Germain [11; 16] указывается присутствие *Rhizoecus cacticans* на территории Беларуси.

Червец мучнистый кактусовый (*Spilococcus mamillariae* Bouché, 1844 (=*Pseudococcus mamillariae* Bouché, 1844)). Тело взрослой самки *S. mamillariae* широкоовальное, длиной от 3 до 3,5 мм, шириной до 2 мм, розоватого цвета. По краю тела расположено 10–14 пар восковых нитей [1; 14; 17].

Регион происхождения – Северная Америка [11; 16]. По трофической специализации принадлежит к числу монофагов, которые заселяют маммиллярии (*Mammillaria* sp.), кактусы (*Cactus* sp.), эхинокактусы (*Echinocactus* sp.) и другие виды декоративных суккулентов [1; 12; 14].

Взрослые самки и личинки *S. mamillariae* локализуются на прикорневой части стеблей и на кладодиях кактусов, что приводит к отмиранию прикорневой части стебля. Представляет угрозу для ботанических оранжерейных коллекций и промышленной культуры кактусов [18].

В Беларуси *Spilococcus mamillariae* (как *Phenacoccus mamillariae*) часто встречается в оранжереях как вредитель кактусовых (*Cactus* sp.) [15].

Семейство Coccidae (Ложнощитовки и Подушечницы)

Ложнощитовка мягкая (*Coccus hesperidum* Linnaeus, 1758). Тело взрослой самки *C. hesperidum* плоское или слабовыпуклое, яйцевидно-ассиметричное, длиной от 2,5 до 4 мм, желтовато-зеленого,

зеленовато-коричневого, коричневого цвета с коричневой пунктировкой и полосами. Иногда пигментация может отсутствовать. Дорсальная поверхность тела эластичная или слегка склеротизирована. Форма тела насекомого сильно варьирует от места питания и неровностей поверхности кормового растения (листья или веточки). Щиток более мягкий, чем у настоящих щитовок [2–4; 17].

Криптогенный вид [16]. Предполагается, что *C. hesperidum* является выходцем из тропических и субтропических регионов Азии [18]. По трофической специализации принадлежит к числу широких полифагов. Встречается повсеместно в оранжереях, где вредит многочисленным декоративным растениям, а также паразитирует на комнатных растениях [4]. По данным [29], ложнощитовка мягкая может повреждать около 320 видов растений. Является опасный вредителем цитрусовых. К числу повреждаемых в закрытом грунте растений можно причислить цитрусовые (Citrinae), орхидеи (Orchidaceae) и многие другие виды субтропических и тропических растений, к числу которых принадлежит плющ (*Hedera* sp.), олеандр (*Nerium oleander*), фикус (*Ficus* sp.), кротон (*Crotons* sp.), монстера (*Monstera* sp.), роза (*Rosa* sp.), кофе (*Coffea* sp.), фуксия (*Fuchsias* sp.), папоротники (Polypodiophyta) [2].

Взрослые самки и личинки *C. hesperidum* локализуются на верхней стороне листовых пластинок вдоль центральной жилки, черешках и стеблях. При массовом заселении растений ложнощитовкой нарушается их нормальный рост, стебли деформируются, листья обесцвечиваются и преждевременно опадают, что может приводить к гибели растений, особенно молодых. Насекомые продуцируют значительное количество медвяной росы, на которой развиваются сапрофитные сажистые грибы, ухудшающие фотосинтез и резко снижающие декоративность растений [2–4; 18].

Coccus hesperidum регистрируется в оранжереях Центрального ботанического сада НАН Беларуси, где повреждает многочисленные виды растений, особенно цитрусовые (Citrinae), аралиевые (Araliaceae), фикусы (*Ficus* sp.), олеандр (*Nerium oleander* L.), плющи (*Hedera* sp.) и другие [19; 20; 30; 31].

Ложнощитовка полушаровидная (*Saissetia coffeae* (Walker, 1852)). Щиток взрослой самки *S. coffeae* выпуклый, на гладкой поверхности листовой пластинки круглый, а на тонкой ветке – продолговатый, диаметром около 2 мм. Тело взрослой самки короткоовальное, сильновыпуклое, почти полукруглое. Молодые особи желтого цвета, тогда как старые – желто-коричневые или коричневые, гладкие с диаметром щитка от 2 до 5 мм. На дорсальной стороне располагаются склеротизированные овальной формы ячейки, которые образуют характерный рисунок, напоминающий шлем [2; 3; 17; 32].

Регион происхождения – Афротропический [11; 16; 18]. По широте трофической специализации принадлежит к числу полифагов. При вспышках массового размножения, как и *C. hesperidum*, является опасным вредителем многих оранжерейных и таких комнатных цветочно-декоративных культур [2], как аспарагус (*Asparagus* sp.), гуава (*Psidium guajava*), камелия (*Camellia* sp.), кротон (*Codiaeum* sp.), кофейное дерево (*Coffea* sp.), мирт (*Myrtus* sp.), олеандр (*Nerium oleander*), орхидеи (Orchidaceae), пальмовые (Arecaceae). Особенно сильно вредит папоротникам (Polypodiophyta) и саговникам (*Cycas* sp.) [3].

Взрослые самки и личинки *S. coffeae* локализуются на черешках и листьях, стеблях, тонких ветках и плодах растений. В местах питания образуются хлоротичные участки, наблюдается деформация побегов и листьев. Интенсивная заселенность растений вредителем способствует полному пожелтению и усыханию листьев, отмиранию побегов и ветвей, также возможна гибель всего растения. Самки продуцируют значительное количество медвяной росы, которая служит субстратом для развития сапрофитных сажистых грибов [2; 3].

Впервые *Saissetia coffeae* (как *Saissetia hemisphaerica*) была отмечена в 1963 г. в оранжереях Центрального ботанического сада НАН Беларуси, где сильно вредила папоротникам. Она зарегистрирована на клеродендрумах (*Clerodendrum* sp.), гибискусах (*Hibiscus* sp.) [19; 20].

Семейство Diaspididae (Щитовки)

Щитовка лавровая (*Aonidia lauri* (Bouché, 1833)). Щиток взрослой самки *A. lauri* круглый или широко овальный, выпуклый, диаметром 0,9–1,3 мм, коричневого цвета с одним оранжевым субцентральным личиночным экзувием [12; 33; 34].

Регион происхождения – Средиземноморье [18; 34; 35].

По трофической специализации принадлежит к числу монофагов, которые повреждают *Laurus nobilis*, отмечаются также на *Laurus novocanariensis* и других видах лавра. Широко распространен на культивируемом лавре [33].

Взрослые самки и личинки *A. lauri* заселяют стволы, ветви и листья. Колонии щитовки расселяются по стеблям (особенно в узлах боковых побегов) и редко заселяют сами листья. При массовом размножении щитовок стебли становятся серыми. В местах питания появляются желтые пятна, листья опадают, кусты нередко полностью засыхают [35].

Aonidia lauri отмечена в оранжереях Центрального ботанического сада НАН Беларуси на *Laurus noibilis*, но широкого распространения не получила [19; 20; 33].

Щитовка плющевая, или олеандровая (*Aspidiotus nerii* Bouché, 1833). Щиток взрослой самки *A. nerii* плоский, тонкий, округлый, диаметром 1–2 мм, желтоватого или бело-серого цвета, состоит из двух светло-желтых личиночных экзувиев, расположенных в центре и легко отделяется от тела. Тело взрослой самки грушевидной формы, светло-желтого цвета [2; 12; 33].

Регион происхождения – Афротропический [11; 16; 18]. По трофической специализации принадлежит к числу широких полифагов, заселяющих целый ряд декоративных, плодовых и оранжерейных растений, в числе которых аспарагус (*Asparagus* sp.), орхидея (Orchidaceae), папоротник (Polypodiophyta), плющ (*Hedera* sp.), азалия (*Azalea* sp.), гибискус (*Hibiscus* sp.), роза (*Rosa* sp.), цитрусовые (Citrinae) и многие другие виды растений [7].

Взрослые самки и личинки *A. nerii* локализуются на ветках, стволах, плодах, а также нижней стороне листовых пластинок. Заселенные растения становятся ослабленными, их рост замедляется, в местах питания образуются желтые, светло-зеленые или зеленые пятна, в результате чего листья желтеют и опадают, побеги деформируются, ветви усыхают, а плоды преждевременно опадают. При высокой плотности вредителей все растение может усохнуть [2; 4; 18; 36].

Aspidiotus nerii отмечен в оранжереях Центрального ботанического сада НАН Беларуси, где вредит аспарагусам (*Asparagus* sp.), фикусам (*Ficus* sp.), жасминам (*Jasminum* sp.), аукубам (A*ucuba* sp.), олеандрам (*Nerium oleander*) и другим оранжерейным субтропическим растениям [19; 20]. Также вредитель отмечен на стрелиции королевской (*Strelitzia reginae*), произрастающей в оранжереях Центрального ботанического сада НАН Беларуси и КУП «Цветы столицы» [36].

Щитовка розанная (*Aulacaspis rosae* (Bouché, 1833)). Щиток взрослой самки *A. rosae* округлый или широкоовальный, диаметром 1,5–2,8 мм, белого или сероватого цвета. Личиночные экзувии желтые или серовато-оранжевые, располагаются в центре щитка. Тело взрослой самки удлиненное, желто-малиновое или красновато оранжевое. Передняя часть тела заметно шире задней части [1; 2; 37; 38].

Регион происхождения – Субтропический. Возможно, регионом происхождения вида является территория Азии [39].

По трофической специализации принадлежит к числу олигофагов, так как в качестве кормовых растений использует представителей семейства Розоцветные (Rosales). В условиях теплиц заселяет и повреждает ежевику (*Rubus fruticosus*), малину (*Rubus idaeus*), землянику (*Fragaria* sp.), розы (*Rosa* sp.) [1; 2; 4; 37].

Взрослые самки и личинки *A. rosae* локализуются на ветках и побегах растений, формируя при этом крупные колонии. В результате питания приводит к ослаблению растения, замедлению развития листьев. Щитовка продуцирует значительное количество пади, которой загрязняет листья и стебли, что приводит к потере декоративных свойств растений [1; 2; 4]. Единичная регистрация вида на *Rosa* sp. при исследовании цветоводческих хозяйств г. Минска [40].

Щитовка Буадюваля, или пальмовая (*Diaspis boisduvalii* Signoret, 1869). Щиток взрослой самки *D. boisduvalii* круглый, тонкий, плоский, полупрозрачный, диаметром 1,5–2,2 мм, белого или серовато-белого цвета со светло-коричневыми, расположенными в центе щитка, личиночными экзувиями. Взрослая самка круглая, плоская, в диаметре около 2 мм, серовато-желтого цвета [1; 3; 12; 17].

Регион происхождения – Южная Америка [11; 16; 18]. По трофической специализации принадлежит к числу широких полифагов, повреждающих многочисленные виды субтропических и тропических растений, а также выступает в качестве серьезного вредителя многих оранжерейных растений, в том числе цитрусовых (Citrinae), пальм (Arecaceae), орхидей (Orchidaceae), банановых (*Musaceae* sp.), маслин (*Olea* sp.), олеандра (*Nerium oleander*) и других [1; 3; 17; 41]. Особенно страдают от деятельности щитовки молодые листья веерных пальм [3].

Взрослые самки и личинки *D. boisduvalii* локализуются главным образом на нижней, реже верхней, стороне листовых пластинок, а также веточках и черешках. В местах скопления щитовок виден белый пушок, а в местах их питания образуются желтого цвета пятна. Листья растений преждевременно усыхают и опадают. При высокой численности щитовок развитие листьев приостанавливается, и растения, в частности, пальмы, нередко погибают [3; 18].

D. boisduvalii отмечен в оранжереях Центрального ботанического сада НАН Беларуси, где серьезно вредит орхидеям (Orchidaceae), а также пальмам (Arecaceae), бромелиевым (Bromeliaceae) и другим оранжерейным субтропическим растениям [19; 20]. Отмечен как вредитель стрелиции королевской (*Strelitzia reginae*), произрастающей в оранжереях Центрального ботанического сада НАН Беларуси и КУП «Цветы столицы» [36].

Щитовка палочковидная (*Lepidosaphes gloverii* (Packard, 1869)). Щиток взрослой самки *L. gloverii* удлиненный и параллельносторонний, слабовыпуклый, не сильно суженный к экзувиальному концу, диаметром 2,5–3,5 мм, желтый или светло-коричневый. Тело самки узкое, с параллельными боками, немного

расширено на уровне первого сегмента брюшка. Первая личиночная шкурка желтая, вторая – желто-коричневая [1; 4; 41].

Регион происхождения – Юго-Восточная Азия [18]. По трофической специализации принадлежит к числу полифагов и является одним из основных вредителей цитрусовых культур. Встречается также на магнолиях (*Magnolia* sp.), пальмах (Arecaceae), маслинах (*Olea* sp.), фейхоа (*Acca sellowiana*), лавре (*Laurus nobilis*) [42].

Взрослые самки и личинки *L. gloverii* локализуются стволе, ветках, листьях и плодах. Заселенные щитовкой ветки и побеги засыхают, листья желтеют и преждевременно опадают, нарушаются процессы транспирации. Растения становятся слабыми и снижают продуктивность. При массовом размножении вредителя плоды покрываются слоем щитков, деформируются, что приводит к потере товарных качеств [43; 44]. По данным сайта Arthropods of Economic Importance Diaspididae of the World [39], она присутствует на территории Беларуси.

В дополнение к аннотированному списку червецов и щитовок рецентной фауны Беларуси был подготовлен перечень карантинных видов кокцид (Coccoidea) на основании анализа нормативных правовых актов о карантинных видах растений и животных [45; 46]. Всего насчитывается 12 видов Coccoidea, среди которых *Aonidiella aurantii* (Maskell) – щитовка померанцевая красная, *Ceroplastes japonicus* Green – ложнощитовка восковая японская, *Ceroplastes rusci* (Linnaeus) – ложнощитовка восковая инжировая, *Chrysomphalus dictyospermi* (Morgan) – щитовка коричневая, *Lopholeucaspis japonica* (Cockerell) – щитовка японская палочковидная, *Maconellicoccus hirsutus* Green – червец жестковолосый, *Margarodes vitus* (Philippi) – червец южноамериканский цистообразующий виноградный, *Pseudaulacaspis pentagona* (Targioni-Tozzetti) – щитовка тутовая, или белая сливовая, *Pseudococcus citriculus* Green – червец мучнистый восточный, *Quadraspidiotus perniciosus* (Comstock, 1881) – щитовка калифорнийская, *Pseudococcus comstocki* (Kuwana) – червец Комстока, *Rhizoecus hibisci* Kawai & Takagi – червец коневой гибискусовый.

Проникновение перечисленных выше карантинных видов кокцид (Coccoidea) на территорию страны возможно вместе с подкарантинной продукцией: саженцами, подвоями и черенками плодовых культур, саженцами, подвоями и черенками ягодных культур, саженцами, подвоями и черенками винограда, деревьями и кустарниками декоративных культур, горшечными растениями различных культур, растениями тропических культур [45]. С целью ограничения проникновения карантинных видов на территорию Беларуси необходимо соблюдение карантинных фитосанитарных требований. Так, разрешается ввоз саженцев, подвоев и черенков плодовых культур из зон распространения карантинных видов только после обеззараживания растений в стране-экспортере с проставлением соответствующей записи об обеззараживании в фитосанитарном сертификате. Ввоз саженцев, подвоев и черенков ягодных культур, саженцев, подвоев и черенков винограда, деревьев и кустарников декоративных культур из зон распространения карантинных видов допускается при условии обеззараживания партии подкарантинной продукции с проставлением соответствующей записи об обеззараживании в фитосанитарном сертификате [45].

Заключение

В настоящее время из 39 видов Coccoidea, отмеченных в региональной фауне Беларуси, для 15 видов семейств Ortheziidae, Pseudococcidae, Coccidae и Diaspididae характерно обитание в условиях закрытого грунта, что составляет 38,5 % от общего видового состава. Преобладающее большинство (7 видов; 46,7 %) принадлежит семейству Pseudococcidae. К представителям Diaspididae относится 5 видов, что составляет 33,3 % от общего числа. В условиях закрытого грунта семейство Coccidae представлено двумя видами: ложнощитовкой мягкой (*Coccus hesperidum* Linnaeus, 1758) и полушаровидной (*Saissetia coffeae* (Walker, 1852)). Единичным видом – червецом пластинчатым оранжерейным (*Insignorthezia insignis* (Browne, 1887)) представлено семейство Ortheziidae.

В условиях закрытого грунта большинство червецов и щитовок (11 видов) по трофической специализации принадлежат к числу неспециализированных фитофагов (полифаги), что составляет 73,4 % от списочного состава. По 2 вида относится *к* специализированным (олигофаги) и узкоспециализированным (монофаги) фитофагам, что составляет по 13,3 % соответственно.

На основании проведенного хорологического анализа кокцид, обитающих в условиях закрытого грунта Беларуси, установлено, что большинство представителей (6 видов) имеют естественно-исторически сложившиеся ареалы в Северной, Центральной и Южной Америке и составляет 40 % от списочного состава. Выходцами из афротропического региона являются три вида кокцид – *Vryburgia amaryllidis*, *Saissetia coffeae* и *Aspidiotus nerii*. Территория Австралии является регионом происхождения для червеца мучнистого цитрусового (*Pseudococcus calceolariae*), Средиземноморье – для щитовки лавровой (*Aonidia lauri*), Юго-Восточная Азия – для щитовки палочковидной (*Lepidosaphes gloverii*). Для двух видов кокцид (ложнощитовки мягкой (*Coccus hesperidum*) и щитовки розанной (*Aulacaspis rosae*) предполагается, что регионом происхождения является территория Азии.

В работе приведен перечень карантинных видов кокцид (Coccoidea), который необходимо использовать для фитосанитарного контроля (надзора) подкарантинной продукции (грузы, материалы, товары) и подкарантинных объектов с целью недопущения ввоза и распространения их по территории Беларуси.

Библиографические ссылки

1. Борхсениус НС. *Практический определитель кокцид (Coccoidea) культурных растений и лесных пород СССР*. Москва – Ленинград: Издательство АН СССР; 1963. 311 с.

2. Ахатов АК, Ижевский СС, Мешков ЮИ, Борисов БА, Волков ОГ, Чижов ВН. *Вредители тепличных и оранжерейных растений (морфология, образ жизни, вредоносность, борьба)*. Москва: Товарищество научных изданий КМК; 2004. 307 с.

3. Козаржевская ЭФ. *Вредители декоративных растений (щитовки, ложнощитовки, червецы)*. Москва: Наука; 1992. 357 с.

4. Васильев ВП, редактор. *Вредители сельскохозяйственных культур и зеленых насаждений. Том 1. Вредные нематоды, моллюски и членистоногие*. Киев: Урожай; 1987. 440 с.

5. Zhorau DG, Buga SV. Coccoidea fauna of Belarus and presence of nucleotide sequences of the scale insects in the genetic databases. *Monographs of the Upper Silesian Museum in Bytom.* 2019;10:55–64.

6. Островский АМ. Новые находки кокцид (Rhynchota: Sternorrhyncha: Coccinea) – вредителей дуба черешчатого (*Quercus robur* Linnaeus, 1753) в фауне Беларуси. *Лесной вестник.* 2022;26(2):31–35. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-31-35

7. García Morales M, Denno BD, Miller DR, Miller GL, Ben-Dov Y & Hardy NB. ScaleNet: A literature-based model of scale insect biology and systematics [Internet, cited 2024 February 04]. 2016. Available from: http://scalenet.info/. DOI: 10.1093/database/bav118

8. Терезникова ЕМ. *Фауна України. Том. 20: Кокциды: Червці пластинчасті, гігантські та борошнисті Ortheziidae, Margarodidae, Pseudococcidae*. Київ: Наукова думка; 1975. 295 с.

9. Miller D, Rung A, Parikh G, Venable G, Redford AJ, Evans GA & Gill RJ. Scale Insects, Edition 2. USDA APHIS Identification Technology Program (ITP). Fort Collins, CO. [Internet, cited 2024 February 04]. 2014. Available from: https://idtools.org/tools/1044/index.cfm?packageID=1115&entityID=3558.

10. Malumphy C, Reid S, Down R, Dunn J, Collins D & Matthews J. Field Guide to Invasive Alien Invertebrate Pests in the South Atlantic UK Overseas Territories. Part 4. Insects (bugs, ants, wasps, moths). Defra: Fera; 2019. 55 p.

11. Pellizzari G, Germain J-F. Scales (Hemiptera, Superfamily Coccoidea). Chapter 9.3. *BioRisk*. 2010;4(1):475–510.

12. Борхсениус НС. *Червецы и щитовки СССР (Coccoidea)*. Москва – Ленинград: Издательство АН СССР; 1950. 251 с.

13. Global Invasive Species Database (GISD) [Internet, cited 2024 February 04]. 2024. Available from: http://www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=1462.

14. Борхсениус НС. *Фауна СССР. Насекомые. Хоботные. Том 7. Хоботные. Подотряд Червецы и щитовки СССР (Coccoidea). Семейство Мучнистые червецы (Pseudococcidae)*. Москва – Ленинград: Издательство АН СССР; 1949. 382 с.

15. Бяляўская ВІ. Мучністыя чарвяцы. *Энцыклапедыя прыроды Беларусі*. Том 3. Мінск: Беларуская савецкая энцыклапедыя імя Петруся Броўкі; 1984. 418 с.

16. Germain J-F, Pellizzari G. Alien Scale Insects in Europe: a renewed checklist. *Hemipteran-Plant Interactions Symposium (Madrid, 2017 June 5–7)*. Madrid: [publisher unknown]; 2017.

17. Дорохова ГИ, Верещагина АБ, Великань ВС, Сорокина АП, Красавина ЛП, Козлова ЕГ, Белякова НА, Гуськова ЛА, Сапрыкин АА. *Определитель вредных и полезных беспозвоночных закрытого грунта*. Санкт-Петербург: «Инновационный центр защиты растений» ВИЗР; 2003. 172 с.

18. Масляков ВЮ, Ижевский СС. *Инвазии растительноядных насекомых в европейскую часть России*. Москва: ИГРАН; 2011. 289 с.

19. Горленко СВ, Панько НА. *Вредители и болезни интродуцированных растений*. Минск: Наука и техника; 1967. 136 с.

20. Буга СВ, Каминский ВА, Бородин ОИ. Некоторые итоги и перспективы исследования фауны равнокрылых насекомых Беларуси. В: *Достижения современной биологии и биологическое образование. Труды научной конференции, посвященной 75-летию биологического факультета Белгосуниверситета*. Минск: БГУ; 1997. с. 50–54.

21. Malumphy C, Ostrauskas H, Pye D. A provisional catalogue of scale insects (Hemiptera, Coccoidea) of Lithuania. *Acta Zoologica Lituanica*. 2008;8(2):108–121.

22. Masumeh M. A review of the mealybugs (Hemiptera: Coccoidea: Pseudococcidae, Putoidae and Rhizoecidae) of Iran, with descriptions of four new species and three new records for the Iranian fauna. *Zootaxa.* 2013;3632(1):76–77.

23. Leafminers and plant galls of Europe [Internet, cited 2024 February 04]. 2001–2024. Available from: https://bladmineerders.nl/.

24. Varela L, Smith R, Battany M, Bentley W. Which mealybug is it, why should you care? Practical Winery and Vineyard January – February. 2006;1–6.

25. Mathulwe LL, Malan AP, Stokwe NF. A Review of the Biology and Control of the Obscure Mealybug, *Pseudococcus viburni* (Hemiptera: Pseudococcidae), with Special Reference to Biological Control Using Entomopathogenic Fungi and Nematodes. *African Entomology*. 2021; 29(1):1–16.

26. Hamlet J. Mealybug: Why we should sit up and take notice. Hawke's Bay Focus Vineyard Project. 2005. 1 p.

27. Longo S. First report of *Vryburgia amaryllidis* (Bouché) (Homoptera, Pseudococcidae) on *Agapanthus* sp. in Sicily, Italy. *Journal of Entomological and Acarological Research*. 2012;44(e3):17–19. DOI: 10.4081/jear.2012.e3

28. Dziedzicka A. The characteristic of scale insects (Coccinea) occurring in Polish greenhouses. Part III. Pseudococcidae. *Acta Biologica Cracoviensia: Series Zoologia.* 1990;32:29–38.

29. Ильинская МИ. *Вредители оранжерейных растений.* Москва: Издательство АН СССР; 1963. 132 с.

30. Панько Н. Враги комнатных растений. *Сельское хозяйство Белоруссии*. 1968;11:44.

31. Бяляўская ВІ. Ілжэшчытоўкі і падушачніцы. *Энцыклапедыя прыроды Беларусі*. Том 2. Мінск: Беларуская савецкая энцыклапедыя імя Петруся Броўкі; 1983. 402 с.

32. Борхсениус НС. *Фауна СССР. Насекомые. Хоботные. Том 9. Хоботные. Подотряд червецы и щитовки (Coccoidea). Семейство подушечницы и ложнощитовки (Coccoidea)*. Москва-Ленинград: Издательство АН СССР; 1957. 495 с.

33. Данциг ЕМ. *Подотряд кокциды (Coccinea). Семейства Phoenicoccidae и Diaspididae*. Санкт-Петербург: Наука; 1993. 453 с.

34. Graora D, Radonjić S. Bionomy of the Laurel scale *Aonidia lauri* (Bouche) (Hemiptera: Diaspididae) in Podgorica, Montenegro. *Pesticidi i fitomedicina*. 2016;31:69–75.

35. Malumphy C. Laurel scale, *Aonidia lauri* (Bouche) (Homoptera: Coccoidea, Diaspididae), a pest of bay laurel, new to Britain. *Entomologist's Gazette*. 1997;48:195–198.

36. Жудрик ЕВ. Патогены и вредители стрелитции королевской (*Strelitzia reginae*). *Весцi БДПУ. Серыя 3*. 2008;1:35–38.

37. Данциг ЕМ. *Кокциды Дальнего Востока СССР (Homoptera, Coccinea): с анализом филогении кокцид мировой фауны*. Ленинград: Наука; 1980. 367 с.

38. Терезникова ЕМ. *Определитель кокцид – вредителей сельскохозяйственных и лесных культур на Украине*. Киев: Наукова думка; l982. 76 с.

39. Arthropods of Economic Importance: Diaspididae of the World [Internet, cited 2024 February 04]. 2002. Available from: https://diaspididae.linnaeus.naturalis.nl/.

40. Березко ОМ. Основные вредители роз в закрытом грунте. *Труды БГТУ. Серия лесного хозяйства*. 2004;12:312–315.

41. Терезникова ЕМ. *Фауна Украины. Том 20. Кокциды: Щитовки*. Киев: Наукова думка; 1986. 132 с.

42. Борхсениус НС. *Каталог щитовок (Diaspidoidea) мировой фауны*. Ленинград: Наука; 1966. 452 с.

43. Рубцов ИА. *Вредители цитрусовых и их естественные враги*. Москва – Ленинград: Издательство АН СССР; 1954. 259 с.

44. Bruwer IJ. Long mussel scale *Lepiodasphes gloverii* (Packard). In: Citrus Pests in the Republic of South Africa. Nelspruit, South Africa: Dynamic Ad; 1998. p. 153–157.

45. Об утверждении Единых карантинных фитосанитарных требований, предъявляемых к подкарантинной продукции и подкарантинным объектам на таможенной границе и на таможенной территории Евразийского экономического союза, утвержденных решением Совета Евразийской экономической комиссии от 30 ноября 2016 г. № 157 [Интернет, процитировано 04 февраля 2024]. URL: https://mshp.gov.by/ru/vneshtorg-ru/view/edinye-karantinnye-fitosanitarnye-trebovanija-predjjavljaemye-k-podkarantinnoj-produktsii-i-podkarantinnym-2133/.

46. Об утверждении единого перечня карантинных объектов Евразийского экономического союза, утвержденного решением Совета Евразийской экономической комиссии от 30 ноября 2016 г. № 158 [Интернет, процитировано 04 февраля 2024]. URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=F91600444.

References

1. Borkhsenius NS. *Prakticheskij opredelitel' koktsid (Coccoidea) kul'turnykh rastenij i lesnykh porod SSSR* [Practical Identification of the Coccoidea of Cultivated Plants and Forest Species of the USSR]. Moscow – Leningrad: Izdatelstvo AN SSSR; 1963. 311 p. Russian

2. Akhatov AK, Izhevskij SS, Meshkov YuI, Borisov BA, Volkov OG, Chizhov VN. *Vrediteli teplichnykh i oranzherejnykh rastenij (morfologiya, obraz zhizni, vredonosnost', bor'ba)* [Pests of greenhouse and glasshouse plants (morphology, lifestyle, pests, control)]. Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdanij KMK; 2004. 307 p. Russian.

3. Kozarzhevskaya EF. *Vrediteli dekorativnykh rastenij (shchitovki, lozhnoshchitovki, chervetsy)* [Pests of ornamental plants (scale insects)]. Moscow: Nauka; 1992. 357 p. Russian.

4. Vasil'ev VP, editor. *Vrediteli sel'skokhozyajstvennykh kul'tur i zelenykh nasazhdenij. V 3 t. Tom 1. Vrednye nematody, mollyuski i chlenistonogie* [Pests of agricultural crops and green spaces. Volume 1. Harmful nematodes, molluscs and arthropods]. Kiev: Urozhaj; 1987. 440 p. Russian.

5. Zhorau DG, Buga SV. Coccoidea fauna of Belarus and presence of nucleotide sequences of the scale insects in the genetic databases. *Monographs of the Upper Silesian Museum in Bytom*. 2019;10:55–64.

6. Ostrovskij AM. Novye nakhodki koktsid (Rhynchota: Sternorrhyncha: Coccinea) – vreditelej duba chereshchatogo (*Quercus robur* Linnaeus, 1753) v faune Belarusi [New records of scale insects (Rhynchota: Sternorrhyncha: Coccinea) – pedunculate oak pests (*Quercus robur* Linnaeus, 1753) in fauna of Belarus]. *Lesnoj vestnik*. 2022;26(2):31–35. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-31-35. Russian.

7. García Morales M, Denno BD, Miller DR, Miller GL, Ben-Dov Y & Hardy NB. ScaleNet: A literature-based model of scale insect biology and systematics [Internet, cited 2024 February 04]. 2016. Available from: http://scalenet.info/ DOI: 10.1093/database/bav118.

8. Tereznikova EM. *Fauna Ukraïni: Tom. 20. Koktsidy: Chervtsi plastinchasti, gigants'ki ta boroshnisti Ortheziidae, Margarodidae, Pseudococcidae* [Fauna of Ukraine. Volume 20. Coccidae: Ortheziidae, Margarodidae, Pseudococcidae]. Kiïv: Naukova dumka; 1975. 295 p. Ukrainian.

9. Miller D, Rung A, Parikh G, Venable G, Redford AJ, Evans GA & Gill RJ. Scale Insects, Edition 2. USDA APHIS Identification Technology Program (ITP). Fort Collins, CO. [Internet, cited 2024 February 04]. 2014. Available from: https://idtools.org/tools/1044/index.cfm?packageID=1115&entityID=3558.

10. Malumphy C, Reid S, Down R, Dunn J, Collins D & Matthews J. Field Guide to Invasive Alien Invertebrate Pests in the South Atlantic UK Overseas Territories. Part 4. Insects (bugs, ants, wasps, moths). Defra: Fera; 2019. 55 p.

11. Pellizzari G, Germain J-F. Scales (Hemiptera, Superfamily Coccoidea). Chapter 9.3. *BioRisk*. 2010;4(1):475–510.

12. Borkhsenius NS. *Chervetsy i shchitovki SSSR (Coccoidea)* [Soft and armoured scale insect (Coccoidea) of the USSR]. Moscow – Leningrad: Izdatelstvo AN SSSR; 1950. 251 p. Russian.

13. Global Invasive Species Database (GISD) [Internet, cited 2024 February 04]. 2024. Available from: http://www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=1462.

14. Borkhsenius NS. *Fauna SSSR. Nasekomye. Khobotnye. Tom 7. Khobotnye. Podotryad Chervetsy i shchitovki SSSR (Coccoidea). Semejstvo Muchnistye chervetsy (Pseudococcidae)* [Fauna of the USSR. Insects. Rhynchota. Volume 7. Rhynchota. Suborder *Coccoidea* of the USSR. Family Mealybugs (*Pseudococcidae*)]. Moscow – Leningrad: Izdatelstvo AN SSSR, 1949. 382 p.

15. Byalyauskaya VI. Muchnistyya charvyatsy [Wax scales]. *Entsyklapedyya pryrody Belarusi*. Volume 3. Minsk: Belaruskaja savetskaja entsiklopedia imia Petrusia Broŭki; 1984. 418 p. Belarusian.

16. Germain J-F, Pellizzari G. Alien Scale Insects in Europe: a renewed checklist. *Hemipteran-Plant Interactions Symposium* (Madrid, 2017 June 5–7). Madrid: [publisher unknown]; 2017.

17. Dorokhova GI, Vereshchagina AB, Velikan' BC, Sorokina AP, Krasavina LP, Kozlova EG, Belyakova NA, Gus'kova LA, Saprykin AA. *Opredelitel' vrednykh i poleznykh bespozvonochnykh zakrytogo grunta* [A definition of the harmful and the beneficial invertebrates of the indoor environment]. Saint Petersburg: «Innovatsionnyj tsentr zashchity rastenij» VIZR; 2003. 172 p. Russian.

18. Maslyakov VYu, Izhevskij SS. *Invazii rastitel'noyadnykh nasekomykh v evropejskuyu chast' Rossii* [Invasions of plant-eating insects in the European part of Russia]. Moscow: IGRAN; 2011. 289 p. Russian.

19. Gorlenko SV, Pan'ko NA. *Vrediteli i bolezni introdutsirovannykh rastenij* [Pests and diseases of introduced plants]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1967. 136 p. Russian

20. Buga SV, Kaminskij VA, Borodin OI. *Nekotorye itogi i perspektivy issledovaniya fauny ravnokrylykh nasekomykh Belarusi* [Some results and perspectives of the study of the fauna of Homoptera insects of Belarus]. In: *Dostizheniya sovremennoj biologii i biologicheskoe obrazovanie: trudy nauchnoj konferentsii, posvyashchennoj 75-letiyu biologicheskogo fakul'teta Belgosuniversiteta*. Minsk: BGU; 1997. p. 50–54. Russian.

21. Malumphy C, Ostrauskas H, Pye D. A provisional catalogue of scale insects (Hemiptera, Coccoidea) of Lithuania. *Acta Zoologica Lituanica*. 2008;8(2):108–121.

22. Masumeh M. A review of the mealybugs (Hemiptera: Coccoidea: Pseudococcidae, Putoidae and Rhizoecidae) of Iran, with descriptions of four new species and three new records for the Iranian fauna. *Zootaxa*. 2013;3632(1):76–77.

23. Leafminers and plant galls of Europe [Internet, cited 2024 February 04]. 2001–2024. Available from: https://bladmineerders.nl/.

24. Varela L, Smith R, Battany M, Bentley W. Which mealybug is it, why should you care? Practical Winery and Vineyard January – February. 2006; 1–6.

25. Mathulwe LL, Malan AP, Stokwe NF. A Review of the Biology and Control of the Obscure Mealybug, *Pseudococcus viburni* (Hemiptera: Pseudococcidae), with Special Reference to Biological Control Using Entomopathogenic Fungi and Nematodes. *African Entomology*. 2021; 29(1):1–16.

26. Hamlet J. (2005). Mealybug: Why we should sit up and take notice. Hawke's Bay Focus Vineyard Project. 2005. p. 1.

27. Longo S. First report of *Vryburgia amaryllidis* (Bouché) (Homoptera, Pseudococcidae) on Agapanthus sp. in Sicily, Italy. *Journal of Entomological and Acarological Research*. 2012;44(e3):17–19. DOI: 10.4081/jear.2012.e3.

28. Dziedzicka A. The characteristic of scale insects (Coccinea) occurring in Polish greenhouses. Part III. Pseudococcidae. *Acta Biologica Cracoviensia. Series Zoologia*. 1990;32:29–38. Russian.

29. Il'inskaya MI. *Vrediteli oranzherejnykh rastenij* [Pests of orangery plants]. Moscow: Izdatelstvo AN SSSR; 1963. 132 p. Russian.

30. Pan'ko N. *Vragi komnatnykh rastenij* [Enemies of indoor plants]. *Sel'skoe khozyajstvo Belorussii*. 1968;11:44. Russian.

31. Byalyaўskaya VI. *Ilzheshchytoўki i padushachnitsy* [Mealybugs and soft scales]. *Entsyklapedyya pryrody Belarusi*. Volume 2. Minsk: Belaruskaja savetskaja entsiklopedia imia Petrusia Brouki; 1983. 402 p. Belarusian.

32. Borkhsenius NS. *Fauna SSSR. Nasekomye. Khobotnye. Tom 9: Khobotnye. Podotryad chervetsy i shchitovki (Coccoidea). Semejstvo podushechnitsy i lozhnoshchitovki (Coccoidea)* [Fauna of USSR. Insects. Rhynchota. Volume 9. Rhynchota. Suborder mealybugs and mus scales (Coccoidea). Family soft scales and mealybugs (Coccoidea)]. Moscow – Leningrad: Izdatelstvo AN SSSR; 1957. 495 p. Russian.

33. Dantsig EM. *Podotryad koktsidy (Coccinea). Semejstva Phoenicoccidae I Diaspididae* [Suborder Coccinea. Family Phoenicoccidae and Diaspididae]. Saint Petersburg: Nauka; 1993. 453 p. Russian.

34. Graora D, Radonjić S. Bionomy of the Laurel scale *Aonidia lauri* (Bouche) (Hemiptera: Diaspididae) in Podgorica, Montenegro. *Pesticidi i fitomedicina*. 2016;31:69–75.

35. Malumphy C. Laurel scale, *Aonidia lauri* (Bouche) (Homoptera: Coccoidea, Diaspididae), a pest of bay laurel, new to Britain. *Entomologist's Gazette*. 1997;48:195–198.

36. Zhudrik EV. *Patogeny i vrediteli strelittsii korolevskoj* (*Strelitzia reginae*) [Pathogens and pests of *Strelitzia reginae*]. *Vestsi BDPU. Seryya 3*. 2008;1:35–38. Russian

37. Dantsig EM. *Koktsidy Dal'nego Vostoka SSSR (Homoptera, Coccinea): s analizom filogenii koktsid mirovoj fauny* [Coccidae of the Far East of the USSR (Homoptera, Coccinea): with an analysis of the phylogeny of coccids of the world fauna]. Leningrad: Nauka; 1980. 367 p. Russian.

38. Tereznikova EM. *Opredelitel' koktsid – vreditelej sel'skokhozyajstvennykh i lesnykh kul'tur na Ukraine* [Determinator of coccids – pests of agricultural and forest crops in Ukraine]. Kiev: Naukova dumka; l982. 76 p. Russian.

39. Arthropods of Economic Importance: Diaspididae of the World [Internet, cited 2024 February 04]. 2002. Available from: https://diaspididae.linnaeus.naturalis.nl/.

40. Berezko OM. *Osnovnye vrediteli roz v zakrytom grunte* [The main pests of roses indoors]. *Trudy BGTU. Seriya lesnogo khozyajstva*. 2004;12:312–315. Russian.

41. Tereznikova EM. *Fauna Ukrainy. Tom 20. Koktsidy: Shchitovki* [Fauna of Ukraine. Volume 20. Coccidae: armoured scale insect]. Kiev: Naukova dumka; 1986. 132 p. Ukrainian

42. Borkhsenius NS. *Katalog shchitovok (Diaspidoidea) mirovoj fauny* [Catalogue of the Diaspidoidea of the world fauna]. Leningrad: Nauka; 1966. 452 p. Russian.

43. Rubtsov IA. *Vrediteli tsitrusovykh i ikh estestvennye vragim* [Pests of citrus fruits and their natural enemies]. Moscow – Leningrad: Izdatelstvo AN SSSR; 1954. 259 p. Russian.

44. Bruwer IJ. Long mussel scale *Lepiodasphes gloverii* (Packard). In: *Citrus Pests in the Republic of South Africa*. Nelspruit, South Africa: Dynamic Ad; 1998: p. 153–157.

45. On approval of Uniform quarantine phytosanitary requirements to regulated products and regulated objects on the customs border and on the customs territory of the Eurasian Economic Union, approved by the decision of the Council of the Eurasian Economic Commission from 2016 November 30 № 157 [Internet, cited 2024 February 04]. Available from: https://mshp.gov.by/ru/vneshtorg-ru/view/edinye-karantinnye-fitosanitarnye-trebovanija-predjjavljaemye-k-podkarantinnoj-produktsii-i-podkarantinnym-2133/ Russian.

46. On approval of the unified list of quarantine objects of the Eurasian Economic Union, approved by the decision of the Council of the Eurasian Economic Commission from 2016 November 30 № 158. [Internet, cited 2024 February 04]. Available from: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=F91600444. Russian.

Статья поступила в редколлегию 06.03.2024.
Received by editorial board 06.03.2024.

УДК 573.6:595.76:631.316.022

ПЕРЕДНИЕ ГОЛЕНИ ЖУКА-НОСОРОГА ОБЫКНОВЕННОГО (*ORYCTES NASICORNIS* (LINNAEUS, 1758) КАК БИОНИЧЕСКИЙ ПРОТОТИП ДЛЯМОДЕЛИРОВАНИЯ СТРЕЛЬЧАТЫХ ЛАП КУЛЬТИВАТОРОВ

О. В. СИНЧУК[1)], ***Д. Г. ЖОРОВ***[1)]

[1)]*Белорусский государственный университет,*
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Рассмотрены основные принципы бионического моделирования и проектирования как важной части экологического знания. Указана важность использования бионического дизайна в качестве регенеративного подхода в проектировании деталей и их отдельных элементов. Подчеркивается значимость использования природных объектов для создания принципиально новых технических решений и адаптации отдельных элементов в уже созданные технологии в сельском хозяйстве. Приводятся сведения о возможности использования голеней жука-носорога обыкновенного (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758) для бионического моделирования стрельчатых лап культиваторов. С этой целью рассмотрены части насекомого – передние голени, которые испытывают наибольшую нагрузку при движении в органическом субстрате растительного происхождения или формирующейся почвенной среде. Выбор бионического аналога обусловлен подобием выполняемых функций и износостойкостью. При этом приведены сведения о механике перемещения насекомого и некоторых особенностях биологии. Рассмотрены уникальные морфологические особенности голени жука-носорога, в частности их адаптированная форма и функциональные характеристики. Указывается наличие у рабочей части голеней закругленных к вершине зубцов. В пространстве между зубцами имеются округлые, уплощенные к краю выемки. Электронная сканирующая микроскопия позволила установить скульптуру поверхности зубчатого края голеней. Морфология поверхности рабочей части голени имеет пористое строение. Отдельные линии формируют извитые канальцы различной глубины. Анализ элементного состава позволил выявить наличие алюминия в структуре внешнего скелета зубчатого края голеней. Для объективной оценки и разработки наиболее эффективных технологических решений предлагается проанализировать аналогичные части ног представителей семейства Scarabaeidae. По результатам исследований выдвигается гипотеза по использованию зубчатого края голеней жука-носорога при проектировании стрельчатых лап культиваторов, путем создания наплавки или накладок из износостойких материалов на рабочую поверхность. При этом общая структура голени может служить объектом для адаптации и создания принципиально новых решений в земледельческой механике, характеризуясь при этом высокой эффективностью, износостойкостью и экологичностью.

Ключевые слова: бионика; экоинновации; земледельческая механика; прикладная биология; сельское хозяйство; Scarabaeidae.

Образец цитирования:
Синчук ОВ, Жоров ДГ. Передние голени жука-носорога обыкновенного (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758) как бионический прототип для моделирования стрельчатых лап культиваторов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;2:15–23.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-15-23

For citation:
Sinchuk AV, Zhorov DG. The front tibia of the european rhinoceros beetle (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758) as a bionic prototype for modeling the row crop cultivator sweep. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;2:15–23. Russian.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-15-23

Авторы:
Олег Викторович Синчук – старший преподаватель кафедры физической географии мира и образовательных технологий, факультет географии и геоинформатики; сокоординатор межкафедрального центра – кафедры ЮНЕСКО по естественнонаучному образованию.
Дмитрий Георгиевич Жоров – кандидат биологических наук, доцент кафедры физической географии мира и образовательных технологий, факультет географии и геоинформатики; заместитель начальника Главного управления науки – начальник отдела аспирантуры и докторантуры.

Authors:
Aleh V. Sinchuk, senior lecturer at the department of physical geography of the world and educational technologies, faculty of geography and geoinformatics; co-coordinator UNESCO department in science education with emphasis on natural sciences.
aleh.sinchuk@gmail.com
Dmitrii G. Zhorov, PhD (biology), associate professor at the department of physical geography of the world and educational technologies, faculty of geography and geoinformatics; deputy head of the General directorate of science – head of the department of postgraduate and doctoral studies.
dmitrii.zhorov.89@mail.ru

Благодарность. Исследования проводились в рамках выполнения НИР «Исследование износостойких биоинспирированных рабочих поверхностей стрельчатых лап культиваторов для ухода за посадками овощных культур» ГПНИ «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность». Авторы приносят благодарность Центру коллективного пользования уникальным научным оборудованием «Белорусский межвузовский центр обслуживания научных исследований» физического факультета БГУ и лично ведущему инженеру радиационной и вакуумной аппаратуры сектора обслуживания научных исследований С. В. Гусаковой за оказанную помощь в проведении исследований методами электронной микроскопии.

THE FRONT TIBIA OF THE EUROPEAN RHINOCEROS BEETLE (*ORYCTES NASICORNIS* (LINNAEUS, 1758) AS A BIONIC PROTOTYPE FOR MODELING THE ROW CROP CULTIVATOR SWEEP

A. V. SINCHUK[a], ***D. G. ZHOROV***[a]

[a]*Belarusian State University,*
4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus
Corresponding author: A. V. Sinchuk (aleh.sinchuk@gmail.com)

The basic principles of bionic modeling and design as an important part of ecological knowledge are considered. The importance of using bionic design as a regenerative approach in the design of parts and their individual elements is pointed out. The importance of using natural objects to create fundamentally new technical solutions and adaptation of individual elements into already created technologies in agriculture is emphasized. Information is given about the possibility of using the tibiae of the european rhinoceros beetle (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758) for bionic modeling of lancet legs of cultivators. For this purpose, the parts of the insect – the anterior tibiae, which experience the greatest load during movement in organic substrate of plant origin or forming soil environment, were considered. A bionic analog was chosen due to the similarity of the functions performed and wear resistance. Information on the mechanics of insect movement and some peculiarities of biology is given. The unique morphological features of rhinoceros beetle tibiae are considered, in particular, their adapted form and functional characteristics. The presence of teeth rounded to the apex at the working part of the tibia is indicated. In the space between the teeth there are rounded, flattened to the edge notches. Electron scanning microscopy allowed to establish the sculpture of the surface of the serrated edge of the tibiae. The morphology of the surface of the working part of the tibiae has a porous structure. Individual lines form tortuous tubules of different depth. The analysis of elemental composition allowed to reveal the presence of aluminum in the structure of the external skeleton of the dentary edge of the tibiae. For an objective assessment and development of the most effective technological solutions, it is proposed to analyze similar parts of the legs of representatives of the family Scarabaeidae. Based on the results of the research, a hypothesis is put forward to use the serrated edge of the tibiae of the rhinoceros beetle in the design of lancet feet of cultivators, by creating cladding or overlays of wear-resistant materials on the working surface. In this case, the general structure of the tibia can serve as an object for adaptation and creation of fundamentally new solutions in agricultural mechanics, characterized by high efficiency, wear resistance and environmental friendliness.

Keywords: bionics; eco-innovation; agricultural mechanics; applied biology; agriculture; Scarabaeidae.

Aknowledgements. The research was carried out within the framework of the research work «Study of wear-resistant bioinspired working surfaces of the row crop cultivator sweep for planting vegetable crops» State Research Program «Agricultural Technologies and Food Security». The authors are grateful to the Center for Collective Use of Unique Scientific Equipment «Belarusian Interuniversity Research Service Center» of the BSU Faculty of Physics and personally to the leading engineer of radiation and vacuum equipment of the research service sector S. V. Gusakova for her assistance in conducting research by electron microscopy methods.

Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется развитию бионических исследований [1]. Принципы и подходы бионического проектирования направлены на содействие как существующих целей устойчивого развития, так и возникающих целей регенеративного дизайна [2]. В качестве альтернативы разрушающим экосистемы технологиям индустриальной эпохи появляются экологические подходы к технологиям и инновациям, которым на протяжении уже многих лет уделяется все больше внимания [3]. Бионика является примером такого экологического подхода к технологиям и инновациям, к которой прибегают ученые, изучая устройство природных систем и затем имитируя эти конструкции для решения хозяйственно важных проблем и задач [4–6]. Природа рассматривается здесь как вдохновляющий источник знаний, который позволяет создавать технологические инновации, созданные природой. По мнению

Дж. М. Беньюса, «гармония рука об руку» идет с природными системами, в которой «организмы приспосабливаются к своему местообитанию и друг к другу» [7], что является главным уроком, который мы можем извлечь из природы и который может стать вдохновением для будущих экологических разработок и более надежных технологий и инноваций [3].

Современная практика бионики включает три ключевых уровня [2; 8]. Первый уровень бионики стремиться к имитации естественной формы (бионическое подобие) [9]. Второй уровень исследует биологические процессы и то, как их можно имитировать в дизайне и инженерии [10; 11]. Третий – может возникать на системном уровне, когда исследования сосредотачиваются на принципах, моделях и стратегиях, принятых в экосистемах [9]. Многие исследователи подчеркивают возможность перехода к практике бионики на уровне экосистемы [9; 12; 13], отмечая, что подходы на уровне формы и процесса не обязательно приводят к разработке устойчивого решения, особенно с учетом склонности к подражанию некоторым избранным чертам конкретного организма. Вместо этого они предлагают более целостную интерпретацию и практику бионики, которая рассматривает применение бионических решений в различных пространственных, временных и организационных масштабах [13–15]. В связи с чем рассматривается не только бионическое подобие отдельных органов, но и их функциональное назначение, механика и структура.

С учетом указанных подходов бионическое проектирование широко применяются при разработке конструктивных схем и обосновании параметров различных сельскохозяйственных и почвообрабатывающих машин [16; 17]. В качестве бионических прототипов могут выступать различные почвенные животные: их форма тела, отдельные части и даже целые органы [16–19]. Использование почвенных животных в качестве бионического прототипа связано с их антиадгезионными способностями и функциями снижения сопротивления в эдафической среде. Они также характеризуются исключительными и идеальными механизмами борьбы с прилипанием различных веществ к их телам [19].

В качестве бионических моделей при проектировании стрельчатых лап культиваторов рассматриваются мандибулы черного садового муравья (*Lasius niger* (Linnaeus, 1758) [20; 21], копательные щетинки обыкновенного муравьиного льва (*Myrmeleon formicarius* Linnaeus, 1767) [22]. Также нами предполагается возможность использования для этих целей голеней жука-носорога обыкновенного (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758).

Жук-носорог обыкновенный – представитель отряда жесткокрылые (Coleoptera), характеризующийся наличием копательных голеней передних ног, которые можно использовать в качестве прототипа для бионического моделирования в земледельческой механике.

O. nasicornis – жесткокрылое насекомое западно-палеарктического ареала [23], широко распространенный по территории Южной и Центральной Европы, Северной Африки. Вид также отмечается в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России. В процессе случайной интродукции человеком жук-носорог обыкновенный постепенно изменяет (в сторону расширения) свою северную и восточную границу ареала [23–26]. Жук-носорог обыкновенный может выступать как синантроп, используя для развития личинок места скопления разлагающихся растительных остатков (парники, компосты, навозные кучи и т. д.) [23; 24; 27; 28]. *O. nasicornis* относится к числу наиболее крупных, достигая в длину более 4 см, видов жесткокрылых фауны Беларуси [29]. Предпочитает заселять увлажненные участки, долины, речные поймы. В условиях нашей страны вид встречается повсеместно.

Личинки *O. nasicornis* являются ксилофагами и сапрофагами – питаются разрушающимися древесиной и другими растительными остатками. Развитие личинки составляет 2–4 года. Взрослые жуки отмечаются рядом с местами развития личинок. Днем жуки обычно малоактивные, не летают и скрываются на земле, в дуплах деревьев. Активность начинается в сумерках и с наступлением полной темноты, продолжаясь почти всю ночь. Взрослые жуки живут 1–2 месяца. Жуки летают с весны до середины лета, иногда до начала осени. Для яйцекладки самка зарывается в дупла деревьев (береста, дуба, ивы и других пород), а также в перепревший навоз, мусорные кучи, кучи из стружек и опилок.

Тело насекомого умеренно продолговатое, выпуклое, довольно широкое. Имаго блестящее, темно-буро-красного цвета. Голова небольшая. Наличник имеет треугольную форм, с почти прямыми боками. У самцов большая часть головы занята рогом, который постепенно утончается по направлению к вершине, имеет трехгранное сечение, равномерно изогнут и направлен от самого основания вверх и назад. У самок рог развит слабо. Самцы длиной 26–43 мм, шириной – 13,5–21,3 мм; самки длиной – 26–41 мм, шириной – 13–21 мм [23].

Поисковые исследования существующих биологических прототипов животных-землероев показали, что особого внимания заслуживает обоснование параметров передних голеней жука-носорога обыкновенного. Он послужил основной для бионического проектирования ротационного рыхлителя почвы [30], кольчато-режущего почвообрабатывающего катка [31], s-образной стойки с регулируемой жесткостью культиватора-плоскореза и др. [32].

Целью настоящего исследования является всестороннее изучение голеней передних конечностей *O. nasicornis* для использования их в качестве бионического прототипа для проектирования стрельчатых лап культиваторов.

Материалы и методы исследования

В основу настоящей работы положены сборы имаго *Oryctes nasicornis*, проведенные в 2021–2022 гг. (leg. A. V. Sinchuk) на территории Беларуси. Идентификация видовой принадлежности материала осуществлялась с использованием специализированных определителей [23; 33; 34] под стереомикроскопом *МБС-10* и тринокулярном микроскопе *Optec SZ780,* снабженном цифровой камерой *Canon 1100d.*

Собранных насекомых помещали в пластиковые и стеклянные емкости различного объема, а затем фиксировали в 40–96 % растворе этилового спирта. Далее насекомых препарировали с целью изучения их передних ног. Съемку голеней передних ног жука-носорога осуществляли с использованием сканирующего электронного микроскопа *LEO – 1455 VP* (с приставками) на базе Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием «Белорусский межвузовский центр обслуживания научных исследований» физического факультета БГУ.

Измерения проводились при помощи свободного программного обеспечения *ImageJ.* В работе приводятся значения: минимум – максимум, средняя арифметическая с доверительным интервалом – стандартной ошибкой.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования существующих бионических прототипов животных, обитающих в почве, показали, что особое внимание заслуживает изучение передних ног жука-носорога обыкновенного как возможной части для создания различных по функциям почвообрабатывающих органов.

Ноги взрослого жука сильные, но не длинные. Голени (рис. 1 *а, б*) передних ног широкие, снаружи с тремя широкими, притупленными на концах зубцами, разделенными закругленными выемками, причем средний зубец заметно приближен к вершинному, на вершинном крае, против заднего края среднего зубца, с сильно прямой шпорой, снизу без зубца.

а/a *б/b*

Рис. 1. Голень передней ноги *Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758): вид сверху (*а*), вид снизу (*б*)

Fig. 1. Tibia of the front leg of *Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758): dorsal view (*a*), ventral view (*b*)

Голени передних ног жука-носорога выполняют копательную функцию и помогают перемещаться в различном по консистенции субстрате, что может служить основой их использования в качестве бионического прототипа для проектирования стрельчатых лап культиваторов.

В течение жизни имаго *O. nasicornis* перемещается в достаточно рыхлом слое, который состоит из отмерших тканей различных видов древесных растений, навозе, мусорных кучах и богатых растительной органикой почвах. Твердость такого субстрата минимальна, что позволяет для перемещения жука эффективно использовать передние ноги. При этом основную нагрузку при копании испытывает зубчатая голень. Для этого жук совершает возвратно поступательное движение каждой передней ногой.

Детальное рассмотрение голени жука-носорога позволяет констатировать наличие между зубцами закругленных выемок (рис. 2 *а, б*). Все пространство между зубцами имеет уплощение к краю строение.

Длина передней выемки (ближе к лапке) варьирует от 1,35 мм до 1,38 мм (1,37 ± 0,02 мм), длина средней выемки – от 1,82 до 1,84 (1,83 ± 0,01 мм). Все измерения производились от центра зубца.

При большем увеличении (200× и 500×) (рис. 3 *а, б*) отмечается уплощенная структура и самих зубцов, которые характеризуются двухсторонней уплощенностью, что напоминает подобие рабочих органов почвообрабатывающих машин.

а/a *б/b*

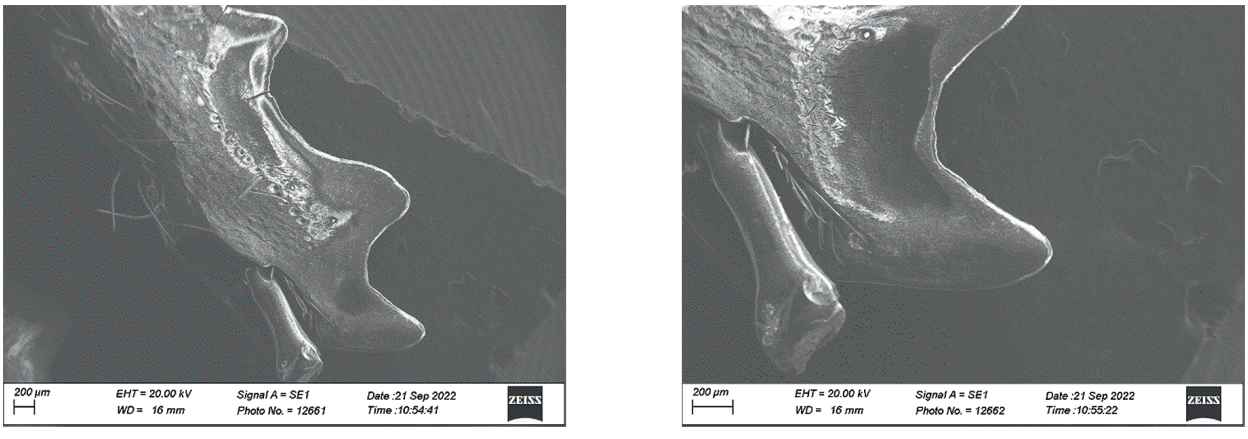


Рис. 2. Голень передней ноги *Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758) вид сверху при увеличении: 50× (*а*), 100× (*б*)

Fig. 2. Tibia of the front leg of *Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758) dorsal view at magnification: 50× (*a*), 100× (*b*)

а/a *б/b*

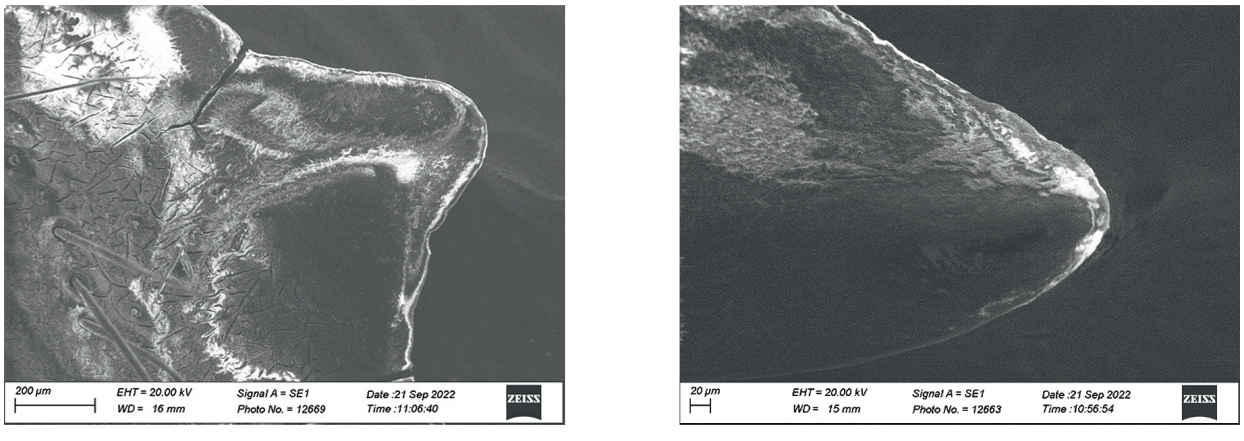


Рис. 3. Отдельный зубец на голени жука-носорога при увеличении: 200× (*а*); 500× (*б*)

Fig. 3. An individual tooth on the tibia of a european rhinoceros beetle at magnification: 200× (*a*); 500× (*b*)

Высота первого зубчика (ближе к лапке) составляет 0,49 ± 0,01 мм, второго – 0,76 ± 0,02 мм, третьего – 0,60 ± 0,01 мм (измерения от вершины зубчика до основания зубчика – граница выемки).

Скульптура поверхности рабочих органов имеет пористое строение (рис. 4). Отдельные линии формируют извитые канальцы различной глубины. Отмечено наличие Al (алюминия) в тканях зубчиков голени. На гладких участках голени отмечается отсутствие атомов кремния (Si).

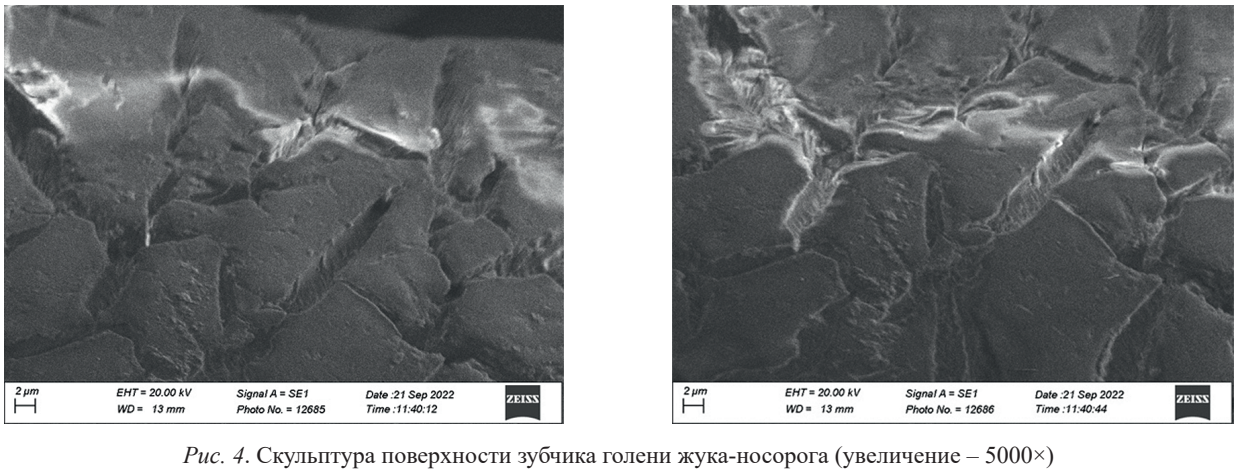


Рис. 4. Скульптура поверхности зубчика голени жука-носорога (увеличение – 5000×)

Fig. 4. Sculpture of the surface of the tibia of a european rhinoceros beetle (magnification – 5000×)

Длина отдельных линий, формирующих исчерченность скульптуры поверхности зубчиков голени, варьирует 1,46–16,28 мкм (7,65 ± 1,86 мкм), ширина – от 0,73 мкм до 1,35 мкм (1,13 ± 0,12 мкм).

Пористость позволяет, по-видимому, легче осуществлять сцепление с субстратом и эффективнее выполнять копательную функцию насекомого.

Применительно к разрыхляющим рабочим органам поисковые исследования позволили установить, что голени обыкновенного жука-носорога совершают эффективное передвижение в почве передними лапами с зубьями шириной *b* и расположенными с определенным шагом S, одна из которых показана на рис. 5. На основе соотношения размерных характеристик этих частей может быть рассчитана математическая модель потенциальной бионической модели.

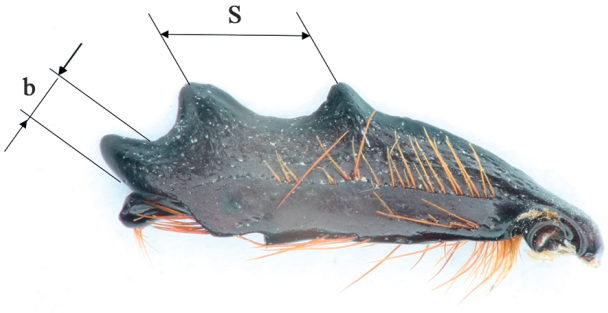


Рис. 5. Голень передней ноги Oryctes nasicornis (вид сверху)

Fig. 5. Tibia of the foreleg of Oryctes nasicornis (dorsal view)

Особенности морфологии голеней других представителей семейства Scarabaeidae может быть проанализирована с целью получения объективной информации для разработки наиболее эффективных технологических решений при проектировании бионических решений в земледельческой механике. Как и в случае голени медведки [35], голень жука-носорога (ее зубчатый край) может быть использована для проектирования рабочей поверхности стрельчатых лап культиваторов. Из полученных данных предполагается использование зубчатого края голеней жука-носорога при проектировании стрельчатых лап культиваторов, путем создания накладок из износостойких материалов на рабочую поверхность [36]. При этом общая структура голени может служить полноценным бионическим прототипом для адаптации и создания принципиально новых решений в земледельческой механике, характеризуясь высокой эффективностью и износостойкостью. Это определяется тем, что внутренняя структура голени свидетельствует о соотношении твердого хитинсодержащего слоя с более мягким и пористым, как 1/4–1/8 по линии радиуса, а остальной участок представлен полостью. При создании принципиально новых решений для проектирования сельскохозяйственных орудий стоит учитывать данную полость как важную часть рабочего органа.

Заключение

Развитие бионических исследований рассматривается не только как эффективный инструмент для решения хозяйственно важных задач, но и является частью экоинноваций и регенеративного дизайна. Общая схема бионического проектирования включает в себя не только анализ геометрии, испытывающих основную нагрузку участков функционального органа, но и изучение их элементного состава, общей внутренней и функциональной структуры. Для этих целей проанализированы передние голени жука-носорога. Определено наличие особой геометрии части голени, испытывающей наибольшую нагрузку, рассмотрены особенности микроструктуры поверхности зубцов голеней. Основу элементного состава исследуемой части насекомого составляют углерод, кислород и азот. Однако отмечается незначительный процентный состав (менее 0,5 %) алюминия. На гладких участках голени отмечается отсутствие атомов кремния (Si). Данный факт может быть рассмотрен как фактор, касающийся усиления структуры поверхности насекомых, а также качеств, связанных с износостойкостью голеней. Внутреннее строение голеней показывает, что твердый хитинсодержащий слой соотносится с более мягким и пористым, как 1/4–1/10 по линии радиуса (в различных частях голени), в то время как остальной участок представлен полостью. Как и в случае голени медведки, голень жука-носорога (ее зубчатый край) может быть использована для проектирования рабочей поверхности стрельчатых лап культиваторов. При этом стоит отметить серьезный потенциал использования технологии наплавки и накладки для увеличения долговечности и соответствующих рабочих органов. При создании принципиально новых решений для проектирования сельскохозяйственных орудий стоит учитывать внутреннюю полость как важную часть рабочего органа. Это позволит максимально приблизиться к природному «решению» по сохранению функциональности и износостойкости исследуемых частей у насекомых.

Рассматриваемый подход включает в себя идеи бионики как процесса изучения природных систем и процессов для создания новых материалов, структур и технологий.

Библиографические ссылки

1. Li M, Yang Y, Guo L, Chen D, Sun H, Tong J. Design and analysis of bionic cutting blades using finite element method. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2015:1–7. DOI: https://doi.org/10.1155/2015/471347.

2. Hayes S, Desha C, Baumeister D. Learning from nature – Biomimicry innovation to support infrastructure sustainability and resilience. *Technological Forecasting and Social Change*. 2020;161:120287. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.12.

3. Blok V. Biomimicry and the materiality of ecological technology and innovation: toward a natural model of nature. *Environmental Philosophy*. 2016;13(2):195–214. DOI: https://doi.org/10.5840/envirophil201692035.

4. Forbes P. The Gecko's Foot. Bio-inspiration–Engineered From Nature. London: Fourth Estate; 2005. 292 p.

5. Myers W. Biodesign: Nature, Science, Creativity. London: Thames & Hudson; 2012. 304 p.

6. Harman J. The Shark's Paintbrush. Ashland: White Cloud Press; 2014. 326 p.

7. Benyus JM. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. New York: Harper Perennial; 2002. 308 p.

8. Азаренко ВВ, Голдыбан ВВ, Бегун ПП. Методические подходы передачи решений от биологии к инженерии. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2023;56:3–8.

9. Benyus JM. A biomimicry primer. Biomimicry 3.8 Resource Handbook. Missoula: Biomimicry Group Inc.; 2011. 280 p.

10. Li G, Meng H. Overview of crack self-healing. *Recent Advances in Smart Selfhealing Polymers and Composites*. 2015:1–19. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-1- 78242-280-8.00001-7.

11. Kumar Ramesh V, Bhuvaneshwari B, Maheswaran S, Palani SG, Ravisankar K, Iyer NR. An overview of techniques based on biomimetics for sustainable development of concrete. *Current Science*. 2011;101(6):741–747.

12. Reap J, Baumeister D, Bras B Holism, biomimicry and sustainable engineering. In: ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition, 2005 November 5–11. Orlando: [publisher unknown]; 2005. p. 423–431. DOI: https://doi.org/10.1115/IMECE2005-81343.

13. Pedersen Zari M, Storey JB. An ecosystem based biomimetic theory for a regenerative built environment. In: International Conference on Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium, 2007 September 12–14. Lisbon: IOS Press; 2007. p. 620–627.

14. Reap JJ. Holistic Biomimicry: A Biologically Inspired Approach to Environmentally Benign Engineering. ProQuest Dissertations Publishing Dissertation/Thesis. Atlanta: Georgia Institute of Technology; 2009. 899 p.

15. De Pauw IC, Karana E, Kandachar P, Poppelaars F. Comparing biomimicry and cradle to cradle with ecodesign: a case study of student design projects. *Journal of Cleaner Production*. 2014;78:174–183. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.077.

16. Бабицкий ЛФ, Москалевич ВЮ, Соболевский ИВ. Развитие бионического направления в земледельческой механике. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2017;4:69–74.

17. Zhang Z, Wang X, Tong J, Stephen C. Innovative design and performance evaluation of bionic imprinting toothed wheel. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2018. p. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1155/2018/9806287.

18. Maohua X, Kaixin W, Wang Y, Weichen W, Feng J. Design and Experiment of Bionic Rotary Blade Based on Claw Toe of *Gryllotalpa orientalis* Burmeister. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2021;52(2):55–63.

19. Голдыбан ВВ. Использование бионических принципов при решении отдельных задач земледельческой механики. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2022;55:36–40.

20. Голдыбан ВВ, Синчук ОВ, Ткаченко ГА, Курилович МИ. Исследование мандибул черного садового муравья в качестве бионической модели для повышения надежности культиваторных лап. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2022;55:251–258.

21. Sinchuk AV, Logachev MA. Prospects of using the mandibles of the black garden ant (*Lasius niger* (Linnaeus, 1758)) in designing wear-resistant working surfaces of cultivator rake tines. *Young scientist*. 2024;1:261–265.

22. Синчук ОВ, Логачёв МА, Лисовская ЕИ. Перспективы использования личинок обыкновенного муравьиного льва как бионического прототипа для проектирования износостойких рабочих поверхностей стрельчатых лап культиваторов. В: *Проблема оценки, мониторинга и сохранения биоразнообразия. Материалы пятой Республиканской научно-практической экологической конференции, г. Брест, 23 ноября 2023 г.* Брест: БрГУ; 2023. с. 273–276.

23. Медведев СИ. *Пластинчатоусые (Scarabaeidae). Подсем. Euchirinae, Dynastinae, Glaphyrinae, Trichiinae.* Москва; Ленинград: Изд. АН СССР; 1960. 399 с. Серия Фауна СССР. Жесткокрылые.

24. Семёнов-Тян-Шанский АП, Медведев СИ. Жуки-носороги (Oryctes I11.) русской и среднеазиатской фаун (Coleoptera, Scarabaeidae). *Ежегодник Зоологического музея Академии Наук СССР*. 1931;32(4):481–502.

25. Шиленков ВГ. Редкие жужелицы (Coleoptera, Carabidae) Байкальского региона и принципы охраны насекомых. *Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология*. 2010;3(1):37–41.

26. Емцев АА, Берников КА, Акопян ЭК. О расширении границ ареалов некоторых видов животных в северной части Западной Сибири. *Мир науки, культуры, образования*. 2012;6:471–477.

27. Медведев СИ. *Личинки пластинчатоусых жуков*. Москва; Ленинград: Издательство АН СССР; 1952. 342 с.

28. Николаев ГВ. *Пластинчатоусые жуки (Coleoptera, Scarabaeoidea) Казахстана и Средней Азии*. Алма-Ата: Наука; 1987. 232 с.

29. Aleksandrowicz O, Pisanenko A, Ryndevich S, Saluk S. The check-list of Belarus Coleoptera. Słupsk: Pomeranian University; 2023. 189 p.

30. Соболевский ИВ. Бионическое обоснование конструкции ротационного рыхлителя почвы. *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2019;20:78–90.

31. Бабицкий ЛФ, Соболевский ИВ, Куклин ВА, Исмаилов ЯН. Теоретические предпосылки к бионическому обоснованию параметров рабочих органов кольчато-режущего почвообрабатывающего катка. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2018;6:121–127.

32. Соболевский ИВ. Исследования качества поверхностной обработки почвы упругими S-образными стойками с регуруемой жесткостью культиватора-плоскореза КПП-3. *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2020;21:106–116.

33. Chinary M. Collins guide to the insects of Britain and Western Europe. London: Collins; 1993. 320 p.

34. Просвиров АС. *Атлас жуков средней полосы России*. Москва: Издательство «Фитон XXI»; 2018. 272 с.

35. Zhang Y, Zhou C, Ren L. Biology Coupling Characteristics of Mole Crickets' Soil-Engaging Components. *Journal of Bionic Engineering*. 2008;5:164–171. DOI: https://doi.org/10.1016/s1672-6529(08)60089-x.

36. Ткаченко ГА, Синчук ОВ, Голдыбан ВВ, Ковальчук АВ. Повышение надежности культиваторных лап за счет упрочнения рабочих поверхностей на основе бионического подхода. В: *Современные технологии для заготовительного производства* [Интернет]. *Сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ, 14 апреля 2021 г.* Минск: БНТУ; 2021:149–151.

References

1. Li M, Yang Y, Guo L, Chen D, Sun H, Tong J. Design and analysis of bionic cutting blades using finite element method. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2015:1–7. DOI: https://doi.org/10.1155/2015/471347.

2. Hayes S, Desha C, Baumeister D. Learning from nature – Biomimicry innovation to support infrastructure sustainability and resilience. *Technological Forecasting and Social Change*. 2020;161:120287. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.12.

3. Blok V. Biomimicry and the materiality of ecological technology and innovation: toward a natural model of nature. *Environmental Philosophy*. 2016;13(2):195–214. DOI: https://doi.org/10.5840/envirophil201692035.

4. Forbes P. The Gecko's Foot. Bio-inspiration–Engineered From Nature. London: Fourth Estate; 2005. 292 p.

5. Myers W. Biodesign: Nature, Science, Creativity. London: Thames & Hudson; 2012. 304 p.

6. Harman J. The Shark's Paintbrush. Ashland: White Cloud Press; 2014. 326 p.

7. Benyus JM. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. New York: Harper Perennial; 2002. 308 p.

8. Azarenko VV, Goldyban VV, Behun PP. *Metodicheskie podhody peredachi reshenij ot biologii k inzhenerii* [Methodological approaches of decision transfer from biology to engineering]. *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. 2023;56:3–8. Russian.

9. Benyus JM. A biomimicry primer. Biomimicry 3.8 Resource Handbook. Missoula: Biomimicry Group Inc.; 2011. 280 p.

10. Li G, Meng H. Overview of crack self-healing. *Recent Advances in Smart Selfhealing Polymers and Composites*. 2015:1–19. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-280-8.00001-7.

11. Kumar Ramesh V, Bhuvaneshwari B, Maheswaran S, Palani SG, Ravisankar K, Iyer NR. An overview of techniques based on biomimetics for sustainable development of concrete. *Current Science*. 2011;101(6):741–747.

12. Reap J, Baumeister D, Bras B Holism, biomimicry and sustainable engineering. *ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition,* 2005 November 5–11. Orlando: [publisher unknown]; 2005. p. 423–431. DOI: https://doi.org/10.1115/IMECE2005-81343.

13. Pedersen Zari M, Storey JB. An ecosystem based biomimetic theory for a regenerative built environment. I*:* International Conference on Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium, 2007 September 12–14. Lisbon: IOS Press; 2007. p. 620–627.

14. Reap JJ. Holistic Biomimicry: A Biologically Inspired Approach to Environmentally Benign Engineering. ProQuest Dissertations Publishing Dissertation/Thesis. Atlanta: Georgia Institute of Technology; 2009. 899 p.

15. De Pauw IC, Karana E, Kandachar P, Poppelaars F. Comparing biomimicry and cradle to cradle with ecodesign: a case study of student design projects. *Journal of Cleaner Production*. 2014;78:174–183. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.077.

16. Babitskiy LF, Moskalevich VY, Sobolevsky IV. *Razvitie bionicheskogo napravlenija v zemledel'cheskoj mehanike* [The development of bionic trends in agricultural mechanics]. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2017;4:69–74. Russian.

17. Zhang Z, Wang X, Tong J, Stephen C. Innovative design and performance evaluation of bionic imprinting toothed wheel. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2018:1–11. DOI: https://doi.org/10.1155/2018/9806287.

18. Maohua X, Kaixin W, Wang Y, Weichen W, Feng J. Design and Experiment of Bionic Rotary Blade Based on Claw Toe of *Gryllotalpa orientalis* Burmeister. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2021;52(2):55–63.

19. Goldyban VV. *Ispol'zovanie bionicheskih principov pri reshenii otdel'nyh zadach zemledel'cheskoj mehaniki* [The use of bionic principles in solving problems of tillage mechanics]. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2022;55:36–40. Russian.

20. Goldyban VV, Sinchuk OV, Tkachenko GA, Kurylovich MI. *Issledovanie mandibul chernogo sadovogo murav'ja v kachestve bionicheskoj modeli dlja povyshenija nadezhnosti kul'tivatornyh lap* [Study of black garden ant mandibules as a bionic model to increase the reliability of cultivated paws]. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2022;55:251–258. Russian.

21. Sinchuk AV, Logachev MA. Prospects of using the mandibles of the black garden ant (*Lasius niger* (Linnaeus, 1758)) in designing wear-resistant working surfaces of cultivator rake tines. *Young scientist*. 2024;1:261–265.

22. Sinchuk AV, Logachev MA, Lisovskaya EI. *Perspektivy ispol'zovanija lichinok obyknovennogo murav'inogo l'va kak bionicheskogo prototipa dlja proektirovanija iznosostojkih rabochih poverhnostej strel'chatyh lap kul'tivatorov* [Prospects for using common antlion larvae as a bionic prototype for the design of wear-resistant working surfaces of pointed paws of cultivators]. In: *Problema ocenki, monitoringa i sohranenija bioraznoobrazija*. Materials of the fifth Republican scientific and practical environmental conference, Brest, 2023 November 23. Brest: BrSU; 2023. p. 273–276. Russian.

23. Medvedev SI. *Plastinchatousye (Scarabaeidae). Podsemejstv Euchirinae, Dynastinae, Glaphyrinae, Trichiinae* [Scarab beetles (Scarabaeidae). Subfamilies Euchirinae, Dynastinae, Glaphyrinae, Trichiinae]. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1960. 399 p. Series Fauna of the USSR. Coleoptera. Russian.

24. Semenov-Tyan-Shansky AP, Medvedev SI. *Zhuki-nosorogi (Oryctes I11.) russkoj i sredneaziatskoj faun (Coleoptera, Scarabaeidae)* [Scarab beetles (Oryctes I11.) of Russian and Central Asian faunas (Coleoptera, Scarabaeidae)]. *Yearbook of the Zoological Museum of the USSR Academy of Sciences*. 1931;32(4):481–502. Russian.

25. Shilenkov VG. *Redkie zhuzhelicy (Coleoptera, Carabidae) Bajkal'skogo regiona i principy ohrany nasekomyh* [Rare ground beetles (Coleoptera, Carabidae) of the Baikal region and principles of insect conservation]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Series «Biology. Ecology».* 2010;3(1):37–41. Russian.

26. Emtsev AA, Bernikov KA, Akopyan EK. *O rasshirenii granic arealov nekotoryh vidov zhivotnyh v severnoj chasti Zapadnoj Sibiri* [On the expansion of the boundaries of the ranges of some animal species in the northern part of Western Siberia]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovanija*. 2012;6:471–477. Russian.

27. Medvedev SI. *Lichinki plastinchatousyh zhukov* [Scarab beetles larvae]. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1952. 342 p. Russian.

28. Nikolaev GV. *Plastinchatousye zhuki (Coleoptera, Scarabaeoidea) Kazahstana i Srednej Azii* [Scarab beetles (Coleoptera, Scarabaeoidea) of Kazakhstan and Central Asia]. Alma-Ata: Nauka; 1987. 232 p. Russian.

29. Aleksandrowicz O, Pisanenko A, Ryndevich S, Saluk S. The check-list of Belarus Coleoptera. Słupsk: Pomeranian University; 2023. 189 p.

30. Sobolevsky IV. *Bionicheskoe obosnovanie konstrukcii rotacionnogo ryhlitelja pochvy* [Bionic rationale for the design of a rotary soil ripper]. *Izvestija sel'skohozjajstvennoj nauki Tavridy*. 2019;20:78–90. Russian.

31. Babitsky LF, Sobolevsky IV, Kuklin VA, Ismailov YaN. *Teoreticheskie predposylki k bionicheskomu obosnovaniju parametrov rabochih organov kol'chato-rezhushhego pochvoobrabatyvajushhego katka* [Theoretical prerequisites for the bionic substantiation of the parameters of the working parts of a ring-cutting soil-cultivating roller]. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2018;6:121–127. Russian.

32. Sobolevsky IV. *Issledovanija kachestva poverhnostnoj obrabotki pochvy uprugimi S-obraznymi stojkami s reguruemoj zhestkost'ju kul'tivatora-ploskoreza KPP-3* [Research on the quality of surface tillage of soil using elastic S-shaped stands with adjustable rigidity of the KPP-3 flat cutter cultivator]. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2020;21:106–116. Russian.

33. Chinary M. Collins guide to the insects of Britain and Western Europe. London: Collins; 1993. 320 p.

34. Prosvirov AS. *Atlas zhukov srednej polosy Rossii* [Atlas of beetles of central Russia]. Moscow: Fiton XXI Publishing House; 2018. 272 p. Russian.

35. Zhang Y, Zhou C, Ren L. Biology Coupling Characteristics of Mole Crickets' Soil-Engaging Components. *Journal of Bionic Engineering*. 2008;5:164–171. DOI: https://doi.org/10.1016/s1672-6529(08)60089-x.

36. Tkachenko GA, Sinchuk AV, Goldyban VV, Kovalchuk AV. Increasing the reliability of cultivator shares by strengthening the working surfaces based on the bionic approach. In: *Sovremennye tehnologii dlja zagotovitel'nogo proizvodstva* [Modern technologies for procurement production] [Internet]. Collection of scientific works of the Republican Scientific and Technical Conference of teaching staff, researchers, doctoral students and graduate students of the MTF BNTU (2021 April 14). Minsk: BNTU; 2021:149–151. Russian.

Статья поступила в редколлегию 06.03.2024.
Received by editorial board 06.03.2024.

УДК 504.064.2:330.15

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ ОЗЕЛЕНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ Г. ЖОДИНО

И. И. СЧАСТНАЯ[1)], ***У. А. РОНДАК***[1)]

[1)]*Белорусский государственный университет,*
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

В исследовании представлены результаты оценки экологического состояния озелененных территорий общего пользования (3 парка, 25 скверов, 2 бульвара) г. Жодино (среднего промышленного города областного подчинения в Минской обл.) и расчетов их экосистемных услуг. Оценка экологического состояния зеленых насаждений выполнена в летний период 2023 г. В границах озелененных территорий, площадью 49,71 га, заложено 30 площадок, в пределах которых обследовано 966 деревьев, преимущественно лиственных пород. Анализ и оценка насаждений проводились на основе полученного набора дендрометрических показателей (изреженность кроны; цвет листьев/хвои; усыхание листьев/хвои; усыхание ветвей, механические повреждения; окорение ствола) с последующим расчетом индекса состояния древостоев и определения категории жизненного состояния насаждений в рамках заложенных площадок. Выявлено четыре категории их состояния: 20 % здоровых, 30 – здоровых с признаками ослабления, 40 – ослабленных и 10 % поврежденных. На основе информации об экологическом состоянии озелененных территорий, а также данных о возрастном и видовом составе насаждений выполнена оценка их экосистемных услуг (интегральная и поэлементная). Современные представления об экосистемных услугах основаны на подходах, согласно которым природная среда функционирует как система, приносящая значительную пользу обществу, включая природные ресурсы. В Республике Беларусь порядок проведения стоимостной оценки экосистемных услуг насаждений и определения стоимостной ценности биологического разнообразия для принятия управленческих решений в экологической сфере определен ТКП 17.02-10-2013 (02120). Расчеты, выполненные в соответствии с этим документом и адаптированные для выявления услуг зеленых насаждений города, показали, что интегральная стоимость услуг зеленых насаждений общего пользования г. Жодино равна 12 271,3 руб./год, при этом основной вклад в эту сумму вносят парки (8 646,7 руб./год). Объем аккумуляции диоксида углерода составляет 418 т/год, здесь также доминируют насаждения парков (281,5 т/год). Полученные результаты исследования позволили дать рекомендации по оптимизации системы озелененных территорий общего пользования г. Жодино.

Ключевые слова: экологическое состояние; жизненное состояние; экосистемные услуги; система зеленых насаждений; озелененные территории общего пользования.

Благодарность. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» подпрограммы «Природные ресурсы и их рациональное использование (2021–2025 гг.) и использована при разработке градостроительного проекта специального планирования «Схема озелененных территорий общего пользования города Жодино» (Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы от 25.10.2023 г.).

Образец цитирования:
Счастная ИИ, Рондак УА. Оценка экологического состояния и экосистемных услуг озелененных территорий общего пользования г. Жодино. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;2:24–34.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-24-34

For citation:
Shchasnaya II, Rondak UA. Assessment of public green spaces' ecological condition and ecosystem services in Zhodino city. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;2:24–34. Russian.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-24-34

Авторы:
Ирина Иосифовна Счастная – кандидат географических наук; доцент кафедры географической экологии, факультет географии и геоинформатики.
Ульяна Андреевна Рондак – студентка, факультет географии и геоинформатики.

Authors:
Irina I. Shchasnaya, PhD (geography); associate professor at the department of geographical ecology, faculty of geography and geoinformatics.
schastnaya@tut.by
Ulyana A. Rondak, student, faculty of geography and geoinformatics.
rondakulyana@gmail.com

ASSESSMENT OF PUBLIC GREEN SPACES' ECOLOGICAL CONDITION AND ECOSYSTEM SERVICES IN ZHODINO CITY

I. I. SHCHASNAYA[a], ***U. A. RONDAK***[a]

[a]*Belarusian State University,*
4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus
Corresponding author: I. I. Shchasnaya (schastnaya@tut.by)

The article presents the results of public green spaces' (3 parks, 25 squares, 2 boulevards) ecological condition assessment in Zhodino city (a medium-sized industrial city of oblast subordination in the Minsk region) and calculations of plantings' ecosystem services. Public green spaces' ecological condition assessment was carried out in the summer of 2023. In the territory of green spaces, covering an area of 49.71 hectares, there were 30 plots, within which 966 trees, mostly deciduous species, were surveyed. The analysis and assessment of the plantings' state were carried out based on a set of dendrometric indicators (crown tracery, leaves/needle color, leaves/needle drying, branch drying, mechanical damage, bark abscission) with subsequent calculation of the stand condition index and determination of the category of the plants' life condition within the established plots. Four categories of their condition were identified: 20 % healthy, 30 – healthy with signs of weakening, 40 – weakened and 10 % damaged. Based on information about green spaces' ecological condition, as well as data on the age and species composition of the plantings, the evaluation of their ecosystem services (integral and elemental) was carried out. Modern concepts of ecosystem services are based on approaches according to which the natural environment functions as a system that brings significant benefits to society, including natural resources. In the Republic of Belarus, the procedure for conducting a cost assessment of plantings' ecosystem services and determining the cost value of biodiversity for making management decisions in the environmental sphere is defined in TCP 17.02-10-2013 (02120). Calculations conducted in accordance with this document and adapted to identify the services of urban green plantings showed that the integral value of the ecosystem services of public green spaces in Zhodino city is 12,271.3 rubles per year, with parks contributing the most to this amount (8,646.7 rubles per year). The carbon dioxide sequestration volume is 418 tons per year, with park plantings also dominating (281.5 tons per year). The results of the research have allowed recommendations to be made for optimizing the system of public green spaces in Zhodino city.

Keywords: ecological state; living state; ecosystem services; green spaces system; public green spaces.

Acknowledgements. The research was realized within the framework of the State Program of Scientific Research «Natural Resources and Environment» under the subprogram «Natural Resources and their rational use (2021–2025)» and was used in the development of the urban planning project for the special planning scheme «Scheme of public green spaces of Zhodino city» (Implementation report of the research results dated 25.10.2023).

Введение

Благоприятное экологическое состояние окружающей среды является неотъемлемой частью устойчивого развития современных городов, поэтому так важно всесторонне изучить все ее компоненты и факторы их образования. Одним из таких компонентов являются зеленые насаждения. В городах они занимают значительную площадь, становятся частью городской среды и выполняют незаменимые функции для ее успешного функционирования. Растения играют значительную роль в формировании окружающей человека среды, так как способны изменять ее характеристики в лучшую сторону. Создание зеленых насаждений не только улучшает санитарно-гигиенические условия жизни, но и преобразует архитектуру города, являясь ее незаменимой частью [1]. Часто из-за прогрессирующей урбанизации количество зеленых насаждений уменьшается, а уже существующие активно подвергаются негативному влиянию антропогенной среды, что приводит к ухудшению экологической обстановки города. Поэтому экологическое состояние зеленого фонда – вопрос экологической безопасности населения.

Экосистемные услуги (ЭУ) – это выгоды, которые люди получают от экосистем [2]. Смысл концепции ЭУ состоит в том, чтобы лучше учитывать экологические услуги (бесплатные природные ресурсы) в процессах принятия решений и обеспечить устойчивое землепользование с целью противодействовать перенапряжению и деградации естественных условий жизни. Современные представления об ЭУ основаны на подходах, согласно которым природная среда функционирует как система, приносящая значительную пользу обществу. Экосистемные услуги зеленых насаждений понимаются как полезные для человека и биосферы функции, выполняемые биотой. Наиболее важными среди них являются средообразующие (санирующие, санитарно-гигиенические, климатические) и средозащитные (водо-, почво-, шумозащитные) функции. В контексте экономической теории экосистемные услуги рассматриваются как часть природного капитала. Соответственно, когда эти услуги будут признаны, идентифицированы и экономически оценены, информацию об этом можно использовать в процессе принятия решений различного уровня с целью повышения их эффективности [3].

В качестве объекта исследования экологического состояния и экосистемных услуг зеленых насаждений г. Жодино приняты озелененные территории общего пользования – парки, скверы, бульвары. Для выявления экологического состояния и определения выгоды (ценности) зеленых насаждений города проведены исследования и выполнены соответствующие оценки. С целью изучения экологического состояния зеленых насаждений г. Жодино проведены полевые исследования озелененных территорий, расположенных в разных частях города, для исследования и фиксации жизненных показателей древостоев. Полученные данные послужили основой оценки их экологического состояния. Средством для учета выгоды или ценности экосистемных услуг выбрана монетарная (экономическая) оценка. Именно монетарная оценка все больше принимается в качестве основы в процессе принятия решений на всех уровнях, что показывают множественные исследования этой темы [4].

Материалы и методы исследования

В структуру озеленения территорий г. Жодино входят насаждения общего пользования, ограниченного пользования и специального назначения. При этом наибольшую ценность для города и его жителей играют насаждения общего пользования: парки, скверы и бульвары суммарной площадью 50,02 га. В настоящее время на территории города находится 3 парка городского значения общей площадью 29,45 га: городской парк культуры и отдыха (14,2 га), парк им. 50-летия БелАЗа (6,75 га), парк у мемориала-комплекса «Матери-патриотки» (8,5 га), 26 скверов городского значения общей площадью 20,07 га и 2 бульвара городского значения общей площадью 0,5 га[1]. Из процентного соотношения объектов озеленения видно, что основную роль в формировании системы насаждений г. Жодино играют парки и скверы.

Наиболее крупные озелененные территории сконцентрированы в западной части города, локализуясь ближе к центру. В восточной же части мозаично расположено большое количество небольших скверов. Северные и южные участки рассматриваемого урбанизированного пространства в целом характеризуются отсутствием озелененных территорий общего пользования. Подобная тенденция в расположении объясняется особенностями застройки города: северные и южные участки заняты жилой усадебной застройкой, в то время как на западе и востоке преобладает многоквартирная жилая и общественно-жилая застройка. В центральных районах города распространена преимущественно производственная застройка с объектами озеленения ограниченного пользования.

Среди древесных пород, преобладающих в озеленении г. Жодино, чаще всего встречаются клен остролистный (*Acer platanoides* L.), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.), каштан конский (*Aesculus hippocastanum* L.) и др., большинство из которых входят в перечень рекомендуемых для городского озеленения[2]. По видовому и численному составу преобладают лиственные породы, однако хвойные все же играют значительную роль в структуре насаждений города.

В качестве основы оценки экологического состояния озелененных территорий взята информация об обследовании 966 деревьев, в числе которых клен остролистный (*Acer platanoides* L.) (279), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) (267), береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.) (119), каштан конский (*Aesculus hippocastanum* L.) (109), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.) (69), тополь канадский (*Populus x canadensis Moench.*) (33), ель европейская (*Picea abies* (L.) Karst.) (17), лиственница европейская (*Larix decidua* Mill.) (14), ель колючая *(Picea pungens* Engelm.) (12), дуб красный (*Quercus rubra* L.) (9), ива белая (*Salix alba* L.) (8), береза повислая (*Betula pendula* Roth) (7), клен серебристый (*Acer saccharinum* L.) (5), ольха черная (*Alnus glutinosa (*L.) *Gaertn*) (4), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.) (4), тополь дрожащий (*Populus tremula* L.) (4), тополь черный (*Populus nigra* L.) (3), робиния псевдоакация (*Robinia pseudoacacia* L.) (2), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) (1). В возрастном составе осмотренных насаждений преобладают приспевающие деревья (63,5 %), почти равную долю занимают средневозрастные (15,4 %) и спелые (15,2 %), в меньшей степени представлен молодняк (4,1 %). При полевых исследованиях экологического состояния зеленых насаждений было заложено 30 площадок с не менее чем 30 деревьями на каждой.

В рамках ключевых участков изучались и анализировались следующие показатели: степень изреженности кроны (количество просветов в процентах), наличие усыхания листьев или хвои и ветвей, цвет листьев или хвои, окорение, наличие трещин и других механических повреждений ствола. По совокупности

[1]10.23-00.ПЗ-2 Экологический доклад по стратегической экологической оценке. «Схема озелененных территорий общего пользования г. Жодино». Научно-проектное государственное унитарное предприятие «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА». Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2023.

[2]Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 18.07.2017 № 5-Т. Об утверждении экологических норм и правил. [Электронный ресурс]. URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732307p (дата обращения: 09.03.2024).

данных признаков проводилась оценка, которая включает расчет индекса состояния древостоя и определение категории жизненного состояния отдельных деревьев.

Изучение зеленых насаждений проведено в соответствии со шкалой состояния деревьев В. А. Алексеева, согласно которой выделяется 6 классов насаждений: без признаков ослабления, ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие, свежий сухостой, старый сухостой с последующей группировкой состояния древостоя, то есть совокупности деревьев [5]. Категория жизненного состояния древостоя определена на основании расчета индекса состояния древостоя достаточного количества (при наличии не менее 30) случайно отобранных деревьев из доминирующих в насаждении. Расчет индекса состояния древостоев проведен по формуле:

$$L_n = (100_{n_1} + 70_{n_2} + 40_{n_3} + 5_{n_4}) / N, \quad (1)$$

где L_n – относительное жизненное состояние древостоя; n_1 – количество здоровых (без признаков ослабления) деревьев, n_2 – ослабленных, n_3 – сильно ослабленных, n_4 – усыхающих; N – общее количество деревьев (включая сухостой).

Дальнейшее отнесение насаждений к категориям жизненного состояния осуществлено на основе модифицированной шкалы В. А. Алексеева [5]. Древостои с индексом состояния 90–100 % относятся к категории здоровые, 80–89 % – здоровые с признаками ослабления, 70–79 % – ослабленные, 50–69 % – поврежденные, 20–49 % – сильно поврежденные, менее 20 % – разрушенные.

Для проведения расчета стоимостной оценки экосистемных услуг озелененных территорий общего пользования г. Жодино в рамках уже заложенных участков необходимо было определить породный и возрастной состав насаждений, а также занимаемую ими площадь. Полученные в ходе исследования данные позволили провести интегральную и поэлементную стоимостную оценку экосистемных услуг.

Экономическая оценка экосистемных услуг зеленых насаждений г. Жодино предполагает проведение стоимостной оценки экосистемных услуг – денежного выражения экономической ценности экологических ресурсов, обеспечивающих удовлетворение экологических потребностей общества и сохранение экологического равновесия. Такая оценка базируется на стоимостной оценке экологического ресурса различных типов естественных экологических систем и проводится в соответствии с Техническим Кодексом установившейся Практики (ТКП) 17.02-10-2013 (02120) «Охрана окружающей среды и природопользование. Порядок определения стоимостной оценки экосистемных услуг и биологического разнообразия (утвержден и введен в действие постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 15 марта 2013 г. № 3-Т)»[3]. В зависимости от целей стоимостной оценки и сферы применения ее результатов используются следующие методические подходы:

– Интегральная оценка применяется для обоснования альтернативных вариантов использования экологических систем и биологических ресурсов. Она базируется на теории экологической ренты и механизме ее выражения – альтернативной стоимости с учетом эффективности воспроизводства в экономической и экологической сферах.

– Поэлементная оценка используется в прикладных исследованиях, связанных с учетом ценности нетоварных экосистемных услуг. Она основана на оценке величины депонирования двуокиси углерода экологическими системами.

Расчет стоимостной оценки экосистемных услуг производится в три этапа:

1. Предварительный этап – получение первичной информации о территории, на которой дается оценка экосистемных услуг.

2. Полевое обследование проводится в случае недостаточности или отсутствия всей необходимой для выполнения расчетов информации.

3. Проведение расчетов стоимостной оценки экосистемных услуг. Расчет интегральной стоимостной оценки экосистемных услуг определяется по формуле:

$$Ц_{экI} = R_{экI} \cdot S_I, \quad (2)$$

где $R_{экI}$ – текущая (ежегодная) оценка услуг экологической системы I-го типа, руб./га; S_I – площадь территории I типа экологической системы, га.

Текущая оценка экосистемных услуг ($R_{экI}$) дается в расчете на 1 га по формуле:

$$R_{экI} = R_I \cdot \left(\frac{q_э}{q_{экI}} - 1\right), \quad (3)$$

где R_I – удельная текущая (ежегодная) оценка (дифференциальная рента) для I типа экологической системы, руб./га; $q_э$ – капитализатор экономической сферы (принят на уровне 0,05); $q_{экI}$ – капитализатор или

[3]ТКП 17.02-10-2013 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Порядок определения стоимостной оценки экосистемных услуг и биологического разнообразия. Минск: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды; 2013.

коэффициент дисконтирования, значение которого обратно пропорционально сроку воспроизводства потребляемого природного вещества, составляющего основу естественной экологической системы I типа.

Расчет удельной текущей (ежегодной) оценки (R_I) для лесных экологических систем осуществляется по формуле:

$$R_I = \frac{Ц \cdot К_R}{1+p+К_R} \cdot К_{вых} \cdot К_{хцп} \cdot К_{пп} \cdot К_э \cdot Р, \quad (4)$$

где Ц – рыночная цена основного продукта природопользования (по пиломатериалам хвойных пород), руб./м^3. Определяется на основании средних биржевых котировок по итогам торгов (на внешнем рынке) Белорусской универсальной товарной биржи за 6 мес., предшествующих моменту оценки; p = 0,3 – коэффициент эффективности (рентабельности) производства продукции в результате эксплуатации основного продукта природопользования; $К_R$ = 0,3 – коэффициент эффективности воспроизводства основного продукта природопользования; $К_{хцп}$ – коэффициент хозяйственной ценности главной древесной породы на оцениваемом участке. В случае равных долей пород в составе насаждений расчет проводится по наиболее ценной (той, у которой $К_{хцп}$ выше); $К_{пп}$ = 1,25 – коэффициент, отражающий стоимость продукции побочного лесопользования; $К_{вых}$ = 0,7 – коэффициент выхода конечной основной продукции природопользования с единицы природного сырья (по пиломатериалам); $К_э$ = 1 – коэффициент экологической значимости лесных экологических систем; Р – ежегодная продуктивность ресурса основного продукта природопользования в расчете на 1 га площади, м^3/га в год.

Поэлементная стоимостная оценка экосистемных услуг проводится в соответствии с углерододепонирующей способности озелененных экологических систем. Стоимостная оценка ежегодного поглощения диоксида углерода для озелененной экологической системы ($О_{удл}$, руб.) рассчитывается по формуле:

$$О_{удл} = Ц_{CO_2} \cdot А, \quad (5)$$

где А – аккумуляция диоксида углерода (CO_2) лесной экологической системой, т/год; $Ц_{CO_2}$ – средняя мировая цена квоты на выброс 1 т CO_2, руб.

Расчет оценки ежегодной углерододепонирующей способности лесов в натуральном выражении (А, т) проводится по формуле:

$$А = \sum V_{ij} \cdot К_{О.К.} \cdot К_п \cdot I \cdot К_Ф \cdot S_{ij}, \quad (6)$$

где V_{ij} – объемный показатель среднего изменения запаса стволовой древесины – средний ежегодный прирост (определяется как отношение древесного запаса i-ой лесообразующей породы j-ой возрастной группы (в разрезе I и II групп леса) к фактическому возрасту насаждения); $К_{О.К.}$ – объемно-конверсионные коэффициенты для перевода объемного запаса (изменения запаса) стволовой древесины (м^3/га) в массу отдельных фракций фитомассы (т/га) – древесина, кора стволов, ветви, корни, листья, подрост, подлесок, напочвенный покров, т/м^3; $К_п$ – переводной коэффициент (для перевода объема компоненты лесного ресурса в количество поглощенного углерода, принимается равным 0,5); I – коэффициент перевода пулов углерода в количество диоксида углерода (принимается на уровне 3,67); $К_Ф$ – коэффициент, учитывающий запас углерода в органическом веществе почвы и мортмассе (принимается на уровне 2,04); S_{ij} – площадь оцениваемого участка насаждений i-й породы j-го типа леса, га.

Результаты исследования и их обсуждение

Для выявления экологического состояния насаждений парков, доминировавших по площади на территории города, было заложено 3 площадки, в пределах которых обследовано 108 деревьев (рис. 1). Исследования свуидетельствуют, что основная часть обследованных деревьев на территории парков г. Жодино характеризуется изреженностью кроны в диапазоне от 10 до 40 %, светло-зеленым и естественным зеленым оттенками листвы и хвои. В меньшей степени встречаются деревья с более высоким показателем ажурности, практически не отмечены деревья с количеством просветов до 10 и от 90 %. Около 20 % осмотренных деревьев характеризуются наличием листвы или хвои с желто-зеленым оттенком, около 5 % – с желтым. Среди нехарактерных окрасок или повреждений листьев отмечено лишь наличие белого налета у 8 % насаждений, что является индикатором имеющегося у деревьев грибкового заболевая – предположительно мучнистой росы. Для большинства осмотренных деревьев характерно отсутствие усыхания листьев или хвои, при этом у более 20 % деревьев присутствуют полностью усохшие листья или хвоя. Причем у 50 % осмотренных деревьев наблюдаются отдельно усохшие ветки.Стоит отметить, что в выборке отмечено лишь около 9 % деревьев с полным отсутствием усыхающих ветвей. Окорение ствола наблюдается у 19,4 % всех осмотренных деревьев. Среди других механических повреждений чаще всего встречаются трещины (73,1 % осмотренных деревьев), наросты (18,5 %) и у 10,2 % деревьев отмечено смолотечение. Более чем у 25 % деревьев механические повреждения отсутствуют.

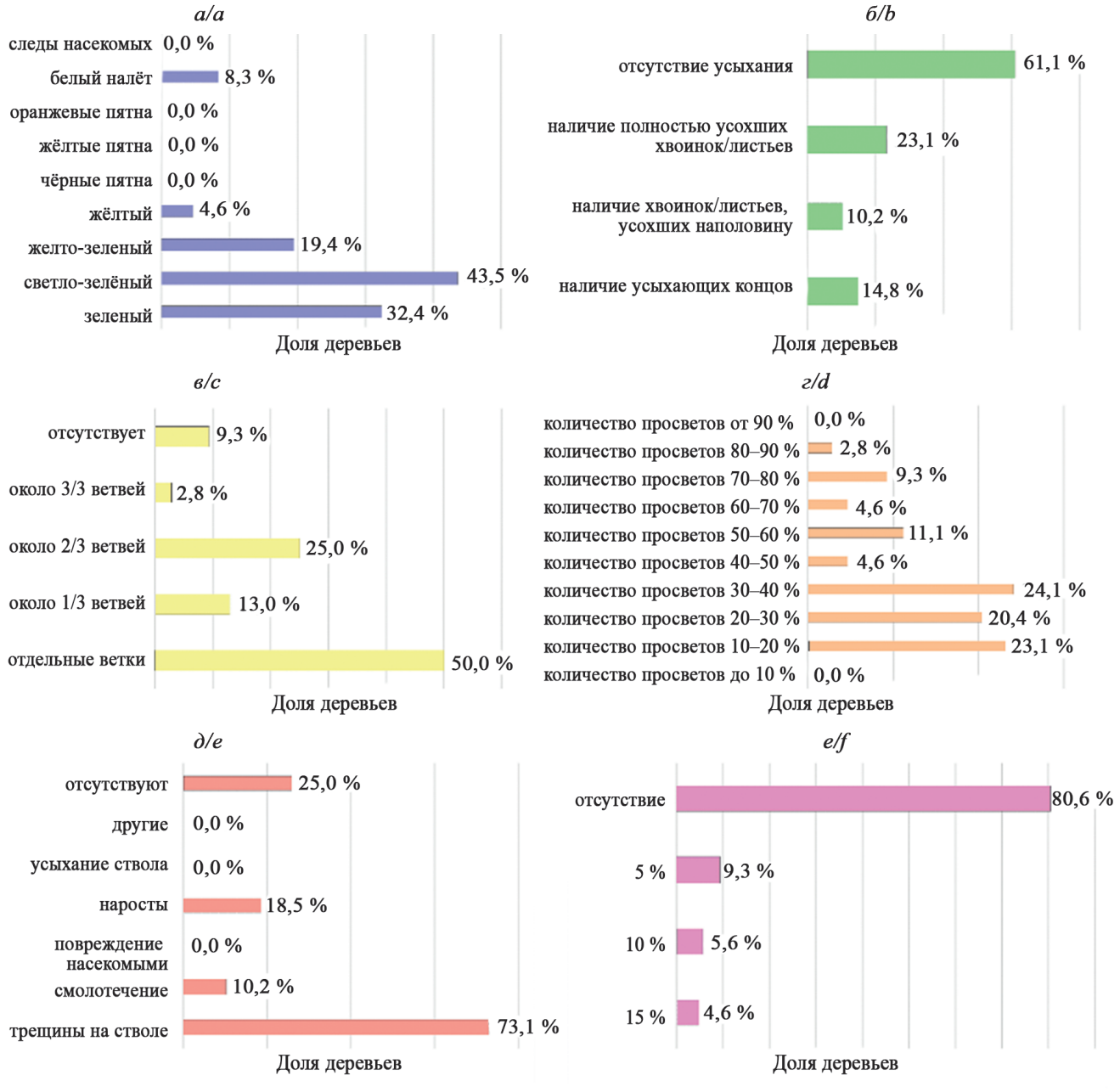


Рис. 1. Дендрометрические показатели деревьев на территории парков г. Жодино: *а* – цвет хвои/листвы; *б* – усыхание хвои/листвы; *в* – усыхание ветвей; *г* – изреженность кроны; *д* – механические повреждения ствола; *е* – окорение ствола

Fig. 1. Dendrometric characteristics of trees within parks' territory of Zhodino city: *a* – color of leaves/needles; *b* – drying of leaves/needles; *c* – drying of branches; *d* – crown tracery; *e* – trunk mechanical damages; *f* – bark abscission

Для выявления экологического состояния насаждений скверов и бульваров города заложено 27 площадок, в пределах которых обследовано 858 деревьев (рис. 2). Большинство из осмотренных деревьев характеризуется зеленой и светло-зеленой окраской листвы и хвои. Среди повреждений листвы чаще всего встречаются оранжевые пятна – примерно у 13 % деревьев, также высока доля насаждений с желтыми и черными пятнами. Для подавляющего большинства осмотренных деревьев характерно отсутствие усыхания листвы или хвои, однако примерно у 15 % деревьев замечено усыхание кончиков, также у 15 % – усыхание наполовину и еще у 15 % – полное усыхание. Более чем у половины осмотренных деревьев наблюдаются отдельно усохшие ветки.

При этом деревьев с полным отсутствием усыхающих ветвей в выборке более 25 %. Окорение ствола наблюдается примерно у 15 % всех осмотренных деревьев. Среди других механических повреждений чаще всего встречаются трещины, наросты и повреждения насекомыми. Для 40 % деревьев выборки характерно отсутствие каких-либо повреждений ствола.

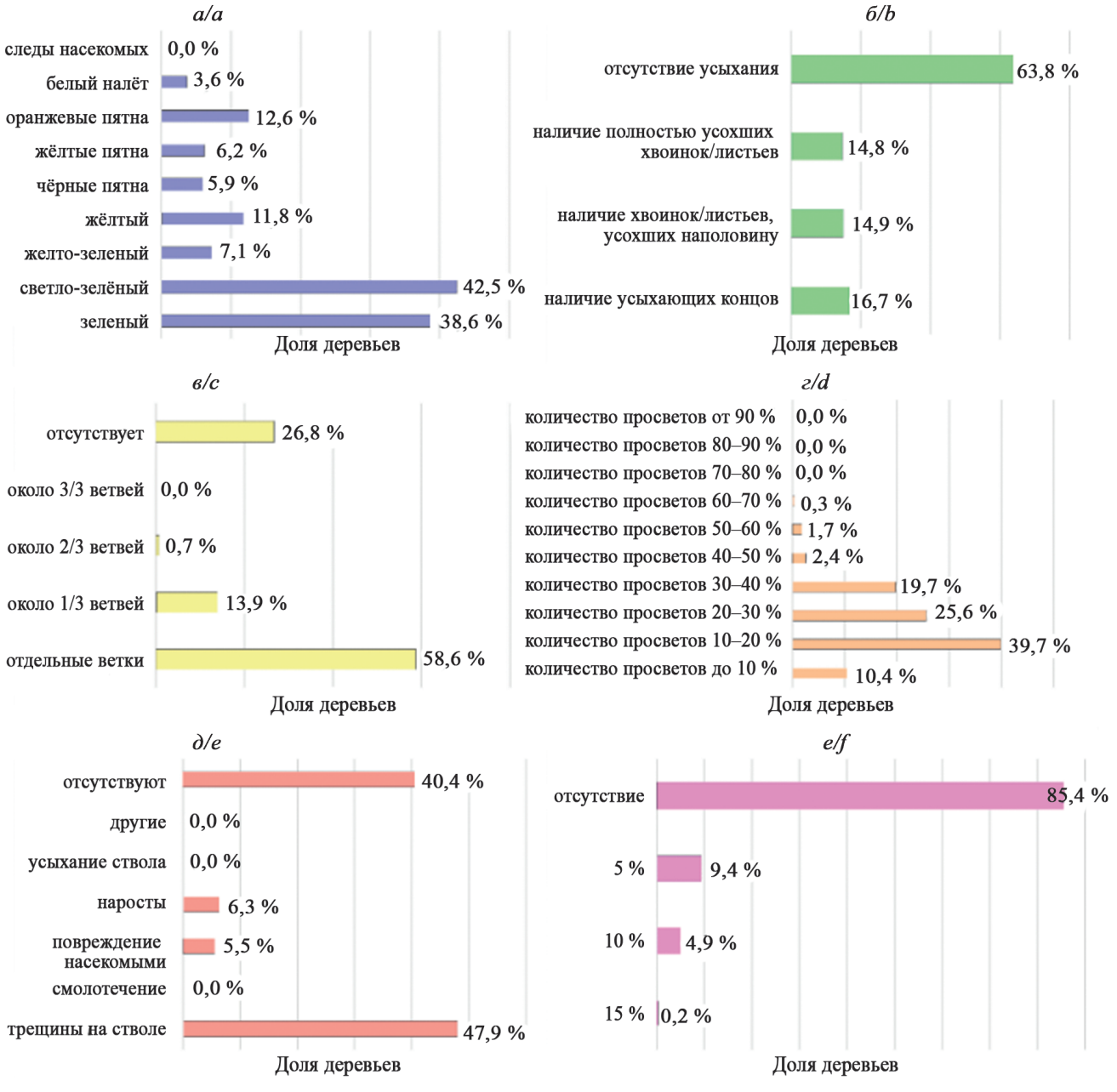


Рис. 2. Дендрометрические показатели деревьев на территории скверов и бульваров г. Жодино: *а* – цвет хвои/листвы; *б* – усыхание хвои/листвы; *в* – усыхание ветвей; *г* – изреженность кроны; *д* – механические повреждения ствола; *е* – окорение ствола

Fig. 2. Dendrometric characteristics of trees within squares and boulevards' territory of Zhodino city: *a* – color of leaves/needles; *b* – drying of leaves/needles; *c* – drying of branches; *d* – crown tracery; *e* – trunk mechanical damages; *f* – bark abscission

При сравнении полученных показателей парков с данными в скверах и бульварах, прослеживаются следующие различия. Количество деревьев с нормальной окраской листвы в границах разных озелененных территорий суммарно равны. Однако в парках наблюдается больше растительности с нездоровым цветом листвы, при этом в скверах и бульварах велика доля насаждений с различными повреждениями листовой пластины. Данные об усыхании листьев различаются незначительно, а вот усыхание ветвей более распространено среди насаждений парков. Более высокие показатели ажурности кроны также характерны для парков, причем здесь виден большой разброс показателей, в то время как основная масса растительности скверов и бульваров имеет ажурность менее 30 %. Рассмотрение механических повреждений стволов насаждений озелененных территорий показывает его менее благоприятное состояние в парках. При этом показатели окорения ствола на территории парков, скверов и бульваров практически идентичны.

По полученным дендрометрическим показателям выполнен расчет индексов состояния древостоев согласно формуле (1), после чего насаждения были отнесены к различным категориям жизненного состояния.

Группировка полученных результатов расчетов и оценка жизненного состояния насаждений парков г. Жодино по участкам показала, что среди древостоев парков выделено три группы, занимающие равные доли (по 33,3 %) среди изученных: здоровые с признаками ослабления, ослабленные и поврежденные. Среди скверов и бульваров выделено четыре группы: 22,2 % здоровых, 29,6 – здоровых с признаками ослабления, 40,7 – ослабленных и 7,4 % поврежденные. В совокупности оценка жизненного состояния всех зеленых насаждений г. Жодино выявила четыре группы насаждений: 20 % здоровых, 30 – здоровых с признаками ослабления, 40 – ослабленных и 10 % поврежденных (рис. 3).

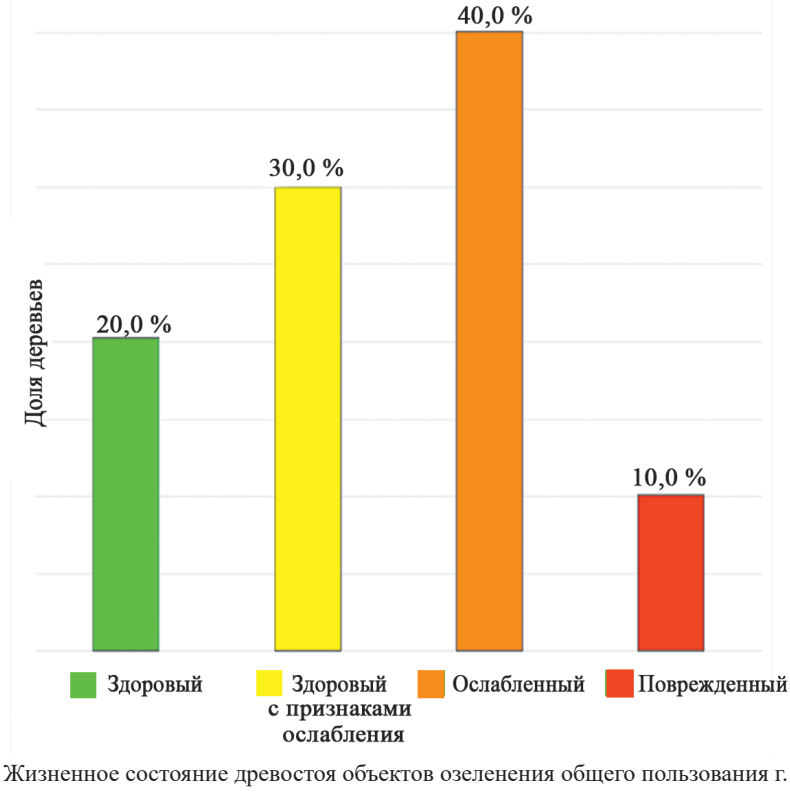


Рис. 3. Жизненное состояние древостоя объектов озеленения общего пользования г. Жодино

Fig. 3. Tree stands living condition index of public green spaces within territory of Zhodino city

Анализ пространственного изменения экологического состояния зеленых насаждений по территории города свидетельствует, что наихудшее состояние растительности характерно для озелененных территорий, расположенных в западной части г. Жодино, где сконцентрировано наибольшее количество ослабленных и здоровых с признаками ослабления древостоев. Такое их состояние объясняется несколькими факторами. Во-первых, своим расположением в зоне общественно-жилой застройки, являющейся основным местом притяжения как местных жителей, так и туристов, посетителей города. Помимо близости к крупной автомобильной трассе Р-53 (Минск – Борисов), данная часть города в целом отличается интенсивным транспортным движением в силу сконцентрированности здесь большого количества объектов общественной застройки. Таким образом, для этой части города характерен значительный выброс загрязняющих веществ и пылевое загрязнение от транспортных объектов, оказывающих негативное воздействие на экологическое состояние зеленых насаждений. На экологическом состоянии может сказываться возраст и видовой состав насаждений. Например, в западной части парка у мемориала-комплекса «Матери-патриотки» распространены каштаны конские (*Aesculus hippocastanum* L.), отличающиеся достаточно низкой устойчивостью к загрязняющим веществам, но высаживаемые благодаря своим высоким декоративным показателям. В восточной же части парка доминируют хвойные, особенно лиственница европейская (*Larix decidua* Mill.) и ель европейская (*Picea abies* (L.) Karst.), отличающиеся большим возрастом насаждений и плохой переносимостью засушливых летних периодов.

Более благоприятное экологическое состояние зеленых насаждений наблюдается в восточной части города. Здесь встречаются озелененные территории со всеми описанными категориями древостоев, однако преобладают здоровые и здоровые с признаками ослабления. Данные объекты озеленения расположены в зоне преобладания жилой застройки: здесь меньше концентрация людей в сравнении с западными районами, слабее транспортный поток и не так много крупных автомобильных дорог.

Таким образом, можно сделать вывод, что экологическое состояние зеленых насаждений г. Жодино оценивается как умеренно удовлетворительное, но требующее улучшения, а также периодического

проведения мониторинга и осуществления различных профилактических работ санитарно-защитного характера при выявлении возникающих проблем. Проведенная оценка экологического состояния насаждений крайне важна для дальнейшей части исследования, так как от состояния растительности будет зависеть эффективность выполняемых ей функций.

Полученная в ходе полевых исследований информация позволила провести интегральную и поэлементную стоимостную оценку экосистемных услуг. Для каждой озелененной территории был получен следующий перечень данных: рассчитаны показатели интегральной стоимостной оценки экосистемных услуг согласно формуле (2), текущей оценки экосистемных услуг согласно формуле (3), удельной текущей оценки для лесных экологических систем согласно формуле (4). По результатам расчетов, интегральная оценка экосистемных услуг озелененных территорий общего пользования г. Жодино составляет 12 271,3 руб./год (в долларовом эквиваленте 3 760,86 USD/год), в том числе 8 646,7 руб./год (70,5 %) вклад парков; 3 219,7 руб./год (26,2%) – скверов; 404,9 руб./год (3,3 %) – бульваров.

Согласно формулам (5) и (6), проведен расчет поэлементной стоимостной оценки экосистемных услуг озелененных территорий общего пользования г. Жодино, которая позволила установить объемы аккумуляции диоксида углерода лесными экосистемами и определить их рыночную стоимость. По результатам расчетов поэлементная стоимостная оценка зеленых насаждений г. Жодино составляет 42 637,8 руб./год (13 067,46 USD/год), в том числе 28 716,1 руб./год – парки (67,3 %); 12 746,5 руб./год – скверы (29,9 %);1 175,2 руб./год – бульвары (2,8 %).

При этом расчеты показали, что объем аккумуляции диоксида углерода составляет 418 т/год, (в том числе 281,5 т/год зелеными насаждениями парков; 125,0 т/год – скверов; 11,5 т/год – бульваров). Анализ пространственного распространения аккумулирования диоксида углерода показал, что наибольший вклад в реализацию экосистемных услуг вносят объекты озеленения, расположенные в западной части города, и парки, что объясняется большой площадью их насаждений (рис. 4).

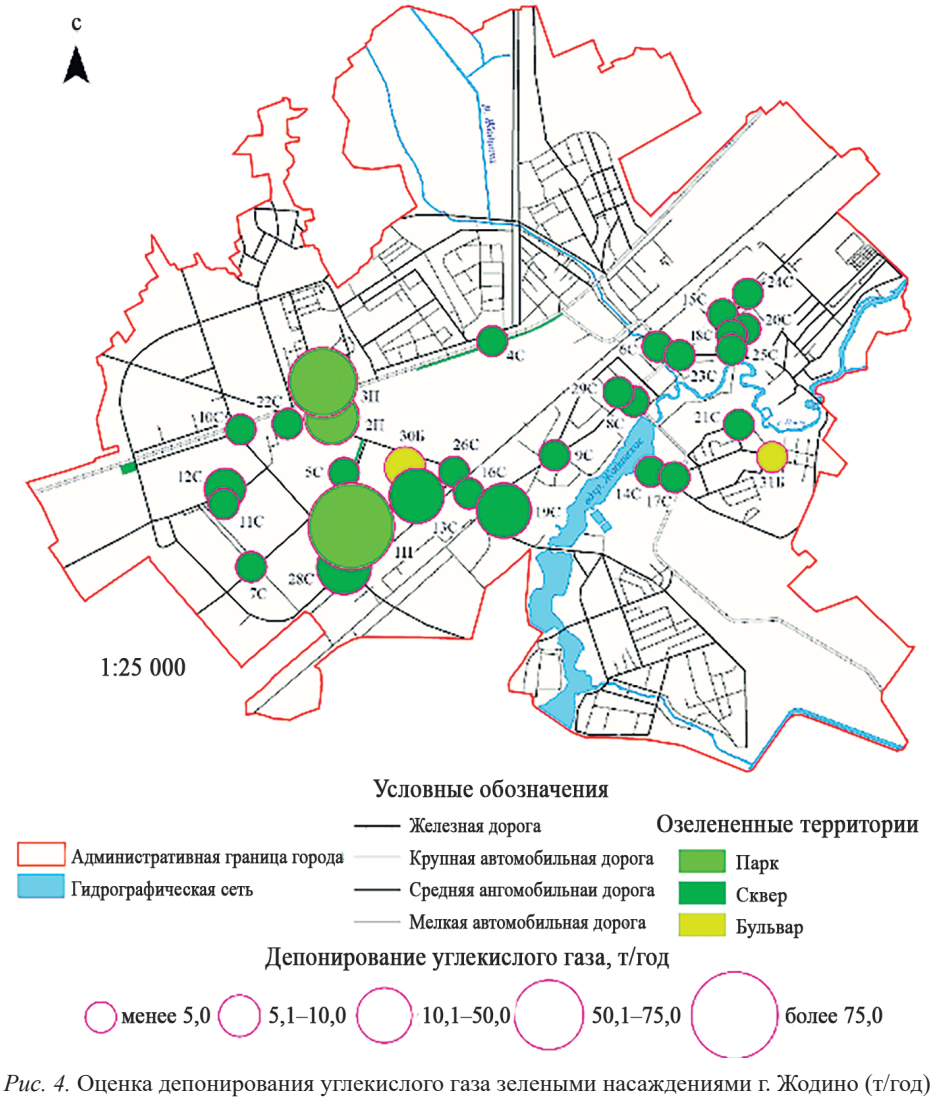


Рис. 4. Оценка депонирования углекислого газа зелеными насаждениями г. Жодино (т/год)

Fig. 4. Assessment of carbon dioxide deposition by green spaces within territory of Zhodino city (t/year)

Оценка озелененных территорий позволила выявить отдельные скверы, не отличающиеся большими площадями насаждений, но при этом вносящими значительный вклад в формирование интегральной стоимости экосистемных услуг и отдельно – объемы аккумуляции диоксида углерода. В обоих случаях подобные высокие показатели объясняются породным и возрастным составом насаждений, которые важны при расчетах стоимости их экосистемных услуг.

Заключение

В исследовании представлены результаты оценки экологического состояния зеленых насаждений г. Жодино и расчетов стоимостной оценки их экосистемных услуг, которые выполнена на основе изучения дендрометрических показателей древостоев в процессе полевых исследований и дальнейших расчетов их жизненного состояния по методике В. А. Алексеева.

Выявлено, что состояние всех зеленых насаждений озелененных территорий общего пользования г. Жодино оценивается как умеренно удовлетворительное, но требующее тщательного контроля. Выполненная оценка экологического состояния зеленых насаждений показывает, что хотя при соответствующем уходе они будут способствовать уменьшению экологических рисков и улучшению здоровья городского населения, однако сама система озелененных территорий нуждается в оптимизационных мероприятиях. В первую очередь необходимо обратить внимание на насаждения западной части города, где отмечена наибольшая концентрация ослабленных и поврежденных древостоев. Основу озеленения данной территории составляют парки, состояние которых можно улучшить проведением ряда санитарно-защитных работ по уходу за растительностью, формированием устойчивого комплекса зеленых насаждений. Устойчивость в данном случае будет достигаться двумя путями. Во-первых, необходима оптимизация породного состава. Обилие неустойчивых к загрязняющим веществам каштанов конских (*Aesculus hippocastanum* L.) и неустойчивых к жарким летним температурам хвойных насаждений лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) и ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) необходимо заменить на более подходящие для городских условий виды. Так, наиболее устойчивые комплексы можно формировать при высаживании липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) или гинкго двулопастного (*Ginkgo biloba* L.)[4]. Во-вторых, в парках крайне необходима оптимизация возрастного состава: чем старше становится дерево, тем сильнее оно подвергаться различным заболеваниям, теряет устойчивость и эстетические качества. Именно поэтому важно проводить посадку более молодых насаждений, тем самым обеспечивая благоприятное состояние озелененных территорий в будущем.

Большой блок санитарно-защитных работ необходим для насаждений скверов и бульваров. Такие, небольшие по площади насаждения, хуже справляются с неблагоприятными факторами городской среды из-за отсутствия большого количества периферийных посадок, что приводит к ухудшению их экологического состояния намного быстрее. Помимо санитарных обрезок или очистки от пыли посредством опрыскивания водными растворами осмотренная растительность ряда скверов нуждается в проведении работ по борьбе с вредителями и возбудителями болезней. Отметим, что насаждения скверов и бульваров должны состоять из наиболее устойчивых к загрязняющим веществам растениям. Причем важно упомянуть и необходимость использования солевыносливого ассортимента: клена остролистного (*Acer platanoides* L.), березу повислую (*Betula pendula* Roth) и березу пушистую (*Betula pubescens* Ehrh.)[5].

Насаждения восточной части отличаются более благоприятным экологическим состоянием. Однако здесь и в центральных районах города выделяется иная проблема – недостаточное количество зеленых насаждений и не достигающая нормативных показателей обеспеченность населения озелененными территориями. Наблюдающаяся в городе неравномерность распределения насаждений создает видимость соблюдения нормативов по озеленению. Обеспеченность жителей г. Жодино озелененными территориями общего пользования составляет 7,82 м^2/чел, при нормативе 3–5 м^2/чел для объектов районного значения и 6–8 м^2/чел для объектов городского значения[6]. Однако в отдельных частях города, особенно в центральных, данные показатели на самом деле намного ниже.

Решение данной проблемы может быть произведено также посредством внедрения одной из инновационных градостроительных практик – вертикального озеленения. Этот позволит не только увеличить показатели озелененности территории и обеспеченности зелеными насаждениями населения, но и улучшить экологическое состояние городской среды. Такая форма зеленого строительства использует

[4]Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 18.07.2017 № 5-Т. Об утверждении экологических норм и правил. [Электронный ресурс]. URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732307p (дата обращения: 09.03.2024).

[5]Там же.

[6]ТКП 45-3.01-116-2008 (02250). Технический кодекс установившейся практики. Градостроительство. Населенные пункты. Нормы планировки и застройки. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь; 2018.

в качестве озеленяемой основы вертикальные поверхности зданий, что позволяет расширить систему озеленения без выделения дополнительной территории.

Оценка экосистемных услуг зеленых насаждений выполнена в соответствии с ТКП) 17.02-10-2012 (02120) «Порядок определения стоимостной оценки экосистемных услуг и биологического разнообразия». Интегральная стоимостная оценка экосистемных услуг зеленых насаждений г. Жодино – 12 271,3 руб./год (3 760,86 долл./год).

Поэлементная стоимостная оценка позволила оценить объемы аккумуляции диоксида углерода зелеными насаждениями и определить их рыночную стоимость. Установлено, что объем аккумуляции диоксида углерода зелеными насаждениями составляет 418 т/год, а его рыночная стоимость определена в 42 637,8 руб./год (67,46 долл./год).

Выполненные оценки экологического состояния и экосистемных услуг зеленых насаждений в г. Жодино подтверждают, что они имеют существенный экологический и ассимиляционный потенциал, который, однако, недостаточен для рассматриваемого промышленного города с населением 64 тыс. чел. (по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь на 01.01.2023 г.) и нуждается в существенном увеличении.

Библиографические ссылки

1. Тетиор АН. *Городская экология.* Москва: Издательский центр «Академия»; 2008.
2. Тихонова ТВ. Экосистемные услуги: роль в региональной экономике и подходы к оценке. *Известия Коми НЦ УрО РАН*. 2016;3:134–144.
3. Directorate-General for Environment (European Commission). Mapping and assessment of ecosystems and their services. European Union, 2013. DOI: 10.2779/12398.
4. Karsten Grunewald, Ralf-Uwe Syrbe, Ulrich Walz, Benjamin Richter, Gotthard Meinel, Hendrik Herold, Stefan Marzelli. Germany's Ecosystem Services – State of the Indicator Development for a Nationwide Assessment and Monitoring. *One Ecosystem*. 2017;2(3):1–18. DOI: 10.3897/oneeco.2.e14021.
5. Алексеев ВА. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев. *Лесоведение.* 1989;4:51–57.

References

1. Tetior AN. *Gorodskaya ekologiya* [Urban ecology]. Moscow: Publishing Center «Academia», 2008. Russian.
2. Tikhonova TV. Ecosystem services: role in the regional economy and approaches to assessment. *Izvestiya Komi NC UrO RAS*. 2016;3:134–144. Russian.
3. Directorate-General for Environment (European Commission). Mapping and assessment of ecosystems and their services. European Union, 2013. DOI: 10.2779/12398.
4. Karsten Grunewald, Ralf-Uwe Syrbe, Ulrich Walz, Benjamin Richter, Gotthard Meinel, Hendrik Herold, Stefan Marzelli. Germany's Ecosystem Services – State of the Indicator Development for a Nationwide Assessment and Monitoring. *One Ecosystem*. 2017;2(3):1–18. DOI: 10.3897/oneeco.2.e14021.
5. Alekseev VA. Diagnostics of the vital condition of trees and stands. *Lesovedenie.* 1989;4:51–57. Russian.

Статья поступила в редколлегию 14.04.2024.
Received by editorial board 14.04.2024.

УДК 549.25/.29:581.526.3:556.5(476.2-21Гомель)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ТКАНЯХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МОЛЛЮСКОВ ВОДОЕМОВ Г. ГОМЕЛЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Т. В. МАКАРЕНКО[1]**,** ***А. И. МАКАРЕНКО***[2]

[1]*Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, ул. Советская, 108, 246028, г. Гомель, Беларусь*
[2]*Гомельский государственный медицинский университет, ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Беларусь*

Изучено содержание и накопление некоторых тяжелых металлов в мягких тканях и раковинах брюхоногих (Gastropoda: прудовик обыкновенный *Limnaea stagnalis* L. и живородка речная *Viviparus viviparus* L.), а также двустворчатых моллюсков (беззубка обыкновенная *Anodonta cygnea* L. и перловица обыкновенная *Unio pictorum* L.). На основании наблюдений установлено более высокое содержание меди, хрома и никеля в мягких тканях брюхоногих моллюсков. У хрома максимальное содержание характерно для тканей прудовика, тогда как у живородки оно минимальное. Содержание свинца, цинка, марганца и кобальта выше у двустворчатых моллюсков. В раковинах моллюсков концентрация свинца, кобальта, хрома и цинка была ниже предела обнаружения. Медь преимущественно концентрируется в мягких тканях моллюсков, никель равномерно распределяется между мягкими тканями и раковинами. Содержание марганца в тканях двустворчатых моллюсков превышает концентрацию в раковинах, у брюхоногих моллюсков отмечена противоположная тенденция. Представленные ряды накопления изучаемых металлов для гастропод и двустворчатых моллюсков имеют значительные отличия, что может определяться различной доступностью металлов в абиотических компонентах водоема для особей разных классов моллюсков. Уровень накопления отдельных металлов в тканях брюхоногих моллюсков в контрольном водоеме превышал таковые величины, рассчитанные для городских водоемов, чего не наблюдалось у двустворчатых моллюсков. На основании полученных данных для комплексной оценки водоемов в отношении определения степени загрязнения абиотических компонентов тяжелыми металлами можно рекомендовать живородку как индикатора меди и никеля для определения загрязнения цинком, марганцем и кобальтом – перловицу, хромом – прудовика, свинцом – беззубку. Однако определить степень загрязнения водоемов тяжелыми металлами, используя только мягкие ткани моллюсков и величины коэффициентов накопления металлов в тканях, по донным отложениям сложно, поэтому необходимо прибегать к специальным интегральным показателям загрязнения.

Ключевые слова: тяжелые металлы; брюхоногие и двустворчатые моллюски; межвидовые различия; водные экосистемы, коэффициент накопления.

Образец цитирования:
Макаренко ТВ, Макаренко АИ. Сравнительная характеристика содержания тяжелых металлов в тканях различных видов моллюсков водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;2:35–45.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-35-45

For citation:
Makarenko TV, Makarenko AI. Comparative characteristics of heavy metals content in the various types of mollusks' tissues in Gomel water bodies and its adjacent territories. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;2:35–45. Russian.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-35-45

Авторы:
Макаренко Татьяна Викторовна – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры химии биологического факультета.
Макаренко Андрей Игоревич – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры общей и биоорганической химии.

Authors:
Tatiana V. Makarenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of chemistry, faculty of biology.
tmakarenko1968@bk.ru
Andrei I. Makarenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of general and bioorganic chemistry.
amakarenko198989@mail.ru

Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2024;2:35–45
Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2024;2:35–45

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF HEAVY METALS CONTENT IN THE VARIOUS TYPES OF MOLLUSKS' TISSUES IN GOMEL WATER BODIES AND ITS ADJACENT TERRITORIES

T. V. MAKARENKO[a], *A. I. MAKARENKO*[b]

[a]*Francisk Skorina Gomel State University,*
108 Saveckaja Street, Gomel 24602, Belarus.
[b]*Gomel State Medical University,*
5 Lange Street, Gomel 246000, Belarus.
Corresponding author: T. V. Makarenko (tmakarenko1968@bk.ru)

The content and accumulation of some heavy metals in the soft tissues and shells of gastropods (Gastropoda: *Limnaea stagnalis* L. and *Viviparus viviparus* L.) and bivalves (*Anodonta cygnea* L. and *Unio pictorum* L.) were studied. Based on observations, a higher content of copper, chromium and nickel in the soft tissues of gastropods has been established. In chromium, the maximum content is typical for the tissues of the pond snail, while in the viviparus it is minimal. The content of lead, zinc, manganese and cobalt is higher in bivalves. In shellfish shells, the concentrations of lead, cobalt, chromium and zinc were below the detection limit. Copper is predominantly concentrated in the soft tissues of mollusks; nickel is evenly distributed between the soft tissues and shells. The manganese content in the tissues of bivalves exceeds the concentration in shells; the opposite trend is observed in gastropods. The presented series of accumulation of the studied metals for gastropods and bivalves have significant differences, which may be determined by the different availability of metals in the abiotic components of the reservoir for individuals of different classes of mollusks. The level of accumulation of individual metals in the tissues of gastropods in the control reservoir exceeded those values calculated for urban reservoirs, which was not observed in bivalves. Based on the data obtained, for a comprehensive assessment of water bodies in relation to determining the degree of contamination of abiotic components with heavy metals, we can recommend the viviparous as an indicator of copper and nickel, for determining contamination with zinc, manganese and cobalt – pearl barley, chromium – pond snail, lead - toothless. However, it is difficult to determine the degree of pollution of water bodies with heavy metals using only the soft tissues of mollusks and the values of the coefficients of metal accumulation in tissues based on bottom sediments; it is necessary to resort to special integral indicators of pollution.

Keywords: heavy metals; gastropods and bivalve molluscs; interspecies differences; aquatic ecosystems; accumulation coefficient.

Введение

Оценка общего уровня загрязнения водоема тяжелыми металлами должна включать анализ содержания этих элементов в тканях биоты, среди которой одними из основных индикаторов могут выступать пресноводные моллюски. Для определения индикаторных видов, в наибольшей степени отражающих общую картину содержания загрязнителей в водоеме, важно определить общий уровень накопления тяжелых металлов в тканях моллюсков различных водоемов, который может быть видоспецифичен и в существенной степени варьирует в зависимости от класса и вида моллюсков и условий того или иного водного объекта.

Цель исследования: изучить видовые особенности содержания тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий, а также установить виды, возможные для использования при изучении загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами.

Материалы и методы исследования

Данные, представленные в работе, получены в исследованиях, проводимых в течение 2016–2019 гг. В этот период дождевые и талые воды поступали в водоемы в незначительных количествах, поэтому уровень воды в водных экосистемах, по данным гидрометеоцентра, снизился более чем на 1 м[1]. Отбор проб моллюсков проводили с помощью дночерпателя и применяли ручной сбор в водоемах г. Гомеля, различающихся по характеру антропогенной нагрузки. Для проведения сравнительной характеристики был выбран контрольный водоем – старичный комплекс р. Сож, который не испытывает видимой антропогенной нагрузки и расположен на 10–12 км выше города по течению р. Сож. Мягкие ткани моллюсков отделяли от раковин и далее анализировали отдельно. Просушивали в сушильном шкафу при температуре 105 °C до постоянной массы, затем подвергали сухому озолению в муфельной печи при 450 °C [1]. Содержание металлов в золе растений и донных отложений определяли атомно-эмиссионным спектральным методом на спектрофотометре *PGS–2* в лаборатории физико-химического анализа Республиканского

[1]Уровень и температура воды в р. Сож по гидропосту г. Гомель сегодня [Электронный ресурс]. URL: https://allrivers.info/gauge/sozh-gomel (дата обращения: 16.07.2022).

унитарного предприятия «Белорусский научно-исследовательский геологоразведочный институт». Для анализа выбраны следующие виды моллюсков из класса брюхоногих (Gastropoda) – прудовик обыкновенный (*Limnaea stagnalis* L.), живородка речная (*Viviparus viviparus* L.); из класса двустворчатых (Bivalvia) – беззубка обыкновенная (*Anodonta cygnea* L.), перловица обыкновенная (*Unio pictorum* L.).

Статистическая обработка данных проводилась общепринятыми методами с использованием табличных процессоров и программ статистического анализа количественных данных при проверке на их соответствие закону нормального распределения. Парный двухвыборочный t-тест для средних подтвердил гипотезу о достоверности различий между содержанием металлов в мягких тканях моллюсков представленных видов из различных водоемов, что указало на наличие отличий между выборками при уровне значимости $p = 0{,}01$.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ видового состава моллюсков водоемов г. Гомеля показал, что доминирующими являются два вида класса брюхоногих моллюсков (живородка речная и прудовик обыкновенный) и два вида двустворчатых моллюсков (беззубка обыкновенная и перловица обыкновенная).

Данные по среднему содержанию тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков водоемов г. Гомеля приведены в табл. 1, 2, из которых следует, что максимальным уровнем содержания характеризуется марганец (на один-два порядка выше, чем у других металлов), а минимальным – кобальт. Марганец выполняет важные физиологические функции в организме моллюсков: активатор ряда ферментов, участвует в процессах дыхания, биосинтезе нуклеиновых кислот, влияет на минеральный обмен [2]. Высокое содержание марганца в тканях моллюсков, особенно двустворчатых, также характеризует влияние терригенного стока на водные экосистемы [3].

Таблица 1

Среднее содержание (мг/кг сухой массы) тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля и окрестностей

Table 1

Average content (mg/kg dry weight) of heavy metals in soft tissues of mollusks inhabiting water bodies of Gomel and its environs

Место отбора	Параметр	Pb	Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Ni
Городские водоемы	Среднее	0,66	6,32	26,60	247,85	0,11	0,46	0,32
	Мин	0,03	0,51	2,12	24,00	0,02	0,02	0,05
	Макс	3,42	28,60	65,30	1000,00	0,25	2,86	0,82
Старичный комплекс р. Сож	Среднее	0,10	4,00	24,16	489,75	0,06	0,08	0,10
	Мин	0,06	0,54	3,62	60,00	0,03	0,05	0,06
	Макс	0,18	12,60	65,40	1056,00	0,08	0,13	0,18

Высокое содержания в мягких тканях моллюсков характерно также для меди (4,00–6,32 мг/кг) и цинка (24,16–26,60 мг/кг), тогда как концентрации кобальта, хрома, никеля и свинца не превышают 1,00 мг/кг. Следует отметить, что самым высоким уровнем концентрирования в тканях моллюсков отличаются биогенные элементы, для которых доказана важность в осуществлении жизненных функций (марганец, цинк и медь), что значительно ниже содержание такого биогенного элемента, как кобальт (0,06–0,11 мг/кг), и таких элементов, как хром и никель, значение которых в обеспечении жизнедеятельности до конца не изучено [4]. По данным некоторых авторов [3], медь и цинк в тканях моллюсков являются индикаторами хозяйственно-бытового загрязнения, никель – показатель техногенного воздействия. Ряд содержания металлов для брюхоногих и двустворчатых моллюсков выглядит следующим образом: Mn > > Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > Co и Mn > Zn > Cu > Pb > Ni > Cr > Co соответственно. Ряды содержания металлов у моллюсков представленных классов различаются положением металлов, оказывающих токсическое действие на живые организмы – хром, свинец и никель. В двустворках южного Вьетнама, также, как и у пресноводных двустворчатых моллюсков водоемов Беларуси, наибольшая среди всех исследованных элементов концентрации определена для марганца, зафиксированные уровни цинка были высокими относительно свинца, меди и никеля [5]. Так, представленный ряд содержания металлов в мягких тканях черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* Lamarck Zn > Mn > Cu > Pb > Co > Ni [6] схож с таковым для представителей двустворчатых моллюсков водоемов Гомеля.

Таблица 2

Сравнительная характеристика содержания (мг/кг сухой массы) тяжелых металлов в тканях брюхоногих и двустворчатых моллюсков водоемов г. Гомеля

Table 2

Comparative characteristics of the content (mg/kg dry weight) of heavy metals in the tissues of gastropods and bivalve mollusks of water bodies in Gomel

Класс	Параметр	Pb	Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Ni
Брюхоногие	Среднее	0,45	9,76	22,09	78,43	0,10	0,71	0,40
	Мин	0,03	0,51	2,12	24,00	0,02	0,02	0,13
	Макс	1,63	28,60	65,30	195,00	0,25	2,86	0,82
Двустворчатые	Среднее	0,90	2,32	31,87	445,50	0,12	0,18	0,23
	Мин	0,06	0,86	6,84	103,00	0,02	0,04	0,05
	Макс	3,42	4,93	62,50	1000,00	0,22	0,48	0,51

Сопоставление усредненных показателей концентрации металлов в тканях моллюсков в городских водоемах относительно старичного комплекса р. Сож показало, что содержание большинства изученных элементов было высоким в городских водных объектах. Особенно четкие отличия в сторону превышения в городских водоемах определены для свинца, хрома и никеля (превышение в 6,60; 5,75 и 3,20 раза соответственно). Различия по концентрации меди и кобальта не столь существенны и составляют лишь 1,58 и 1,83 раза соответственно. Для цинка не определено значимых отличий содержания в старичном комплексе р. Сож и водных объектах в городской черте. В то же время концентрация марганца в городских водоемах оказалась почти в 2,00 раза ниже, чем в старичном комплексе, что требует дальнейшего изучения. Стоит отметить, что похожие закономерности по содержанию марганца были отмечены и в исследованиях, проводимых на данных водоемах ранее[2]. Полученные данные подтверждают возможность использования старичного комплекса в качестве фонового водоема сравнения при проведении мониторинговых исследований загрязнения моллюсков водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий тяжелыми металлами. Однако в различные временные промежутки концентрация исследуемых соединений металлов в мягких тканях моллюсков старичного комплекса была сравнима с содержанием тяжелых металлов у особей городских водоемов. Поэтому для более точной оценки загрязненности водных экосистем необходимо установление фоновых концентраций в мягких тканях моллюсков с использованием статистического метода.

С целью выявления видов-индикаторов моллюсков для определения загрязнения водоемов тяжелыми металлами была проведена детальная оценка загрязненности мягких тканей изученных видов моллюсков по каждому тяжелому металлу (рис. 1, 2). На видовую специфику аккумуляции металлов моллюсками, а значит, и возможность использования моллюсков для оценки степени загрязнения водных экосистем соединениями металлов указывают различные авторы[3] [1–3; 5–8]. Но некоторые виды моллюсков не обладают такой особенностью. Так, устрицы избирательно накапливают в своих тканях высокие концентрации цинка и меди, тогда как мидии не склонны концентрировать в тканях соединения вышеназванных металлов [9].

Особую значимость в проведенном анализе имеет изучение концентрации в тканях моллюсков свинца, который является наиболее опасным токсикантом и загрязнителем водоемов [7; 10; 11]. Как следует из рис. 1, максимальным уровнем содержания свинца отличается беззубка, концентрация металла в мягких тканях которой достигает 1,31 мг/кг, что превышает значения, полученные для прудовика (следующего по уровню содержания свинца), в 2,01 раза. Такие результаты были неожиданными, так как в исследованиях, проводимых ранее, высоким уровнем содержания металла отличался прудовик, на втором месте располагалась живородка[4]. Значительное превышение концентрации свинца в тканях беззубки в сравнении с другими видами, а особенно с живородкой и прудовиком, было отмечено практически во всех водоемах города. Одной из причин может быть высокая доступность соединений металла в компонентах водных экосистем для ее особей.

[2]Макаренко Т. В. Распределение тяжелых металлов в биотических и абиотических компонентах водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий: дис. … канд. биол. наук: 03.02.08. Минск, 2010.

[3]Уровень и температура воды в р. Сож по гидропосту г. Гомель сегодня [Электронный ресурс]. URL: https://allrivers.info/gauge/sozh-gomel (дата обращения: 16.07.2022).

[4]Макаренко Т. В. Распределение тяжелых металлов в биотических и абиотических компонентах водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий: дис. … канд. биол. наук: 03.02.08. Минск, 2010.

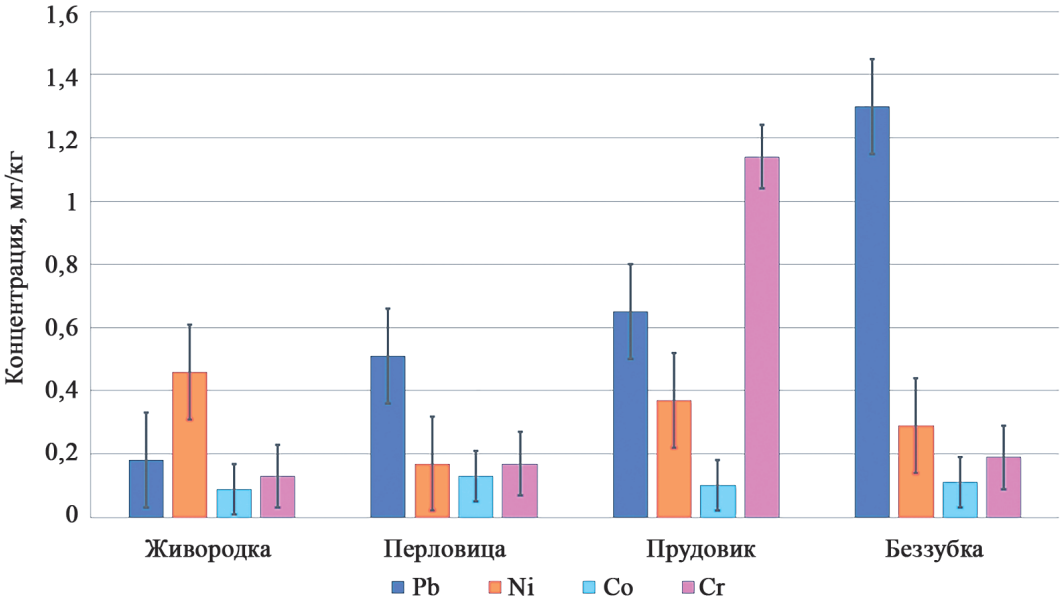


Рис. 1. Содержание свинца, никеля, кобальта и хрома (мг/кг сухой массы) в мягких тканях различных видов моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля

Fig. 1. The content of lead, nickel, cobalt and chromium (mg/kg dry weight) in the soft tissues of various types of mollusks inhabiting the water bodies of Gomel

Изменение доступности соединений свинца для моллюсков разных видов в абиотических компонентах изучаемых водоемов связано с изменением гидрологического режима и значительным снижением уровня воды в водных экосистемах изучаемой территории. Очевидно, что именно этот вид моллюска в настоящее время наиболее целесообразно использовать в качестве индикаторного при оценке общего загрязнения водоема свинцом. Недостаток этого вида двустворчатого моллюска в том, что он обитает не во всех водоемах изучаемой территории, а если и встречается, то в большей степени, на глубоководной части водоема, что значительно затрудняет отбор проб. Наименьшая концентрация данного металла определена в тканях живородки (0,18 мг/кг), что более чем в 7 раз ниже, по сравнению с показателями беззубки. В то же время содержание других тяжелых металлов в тканях беззубки не отличается столь высокими показателями.

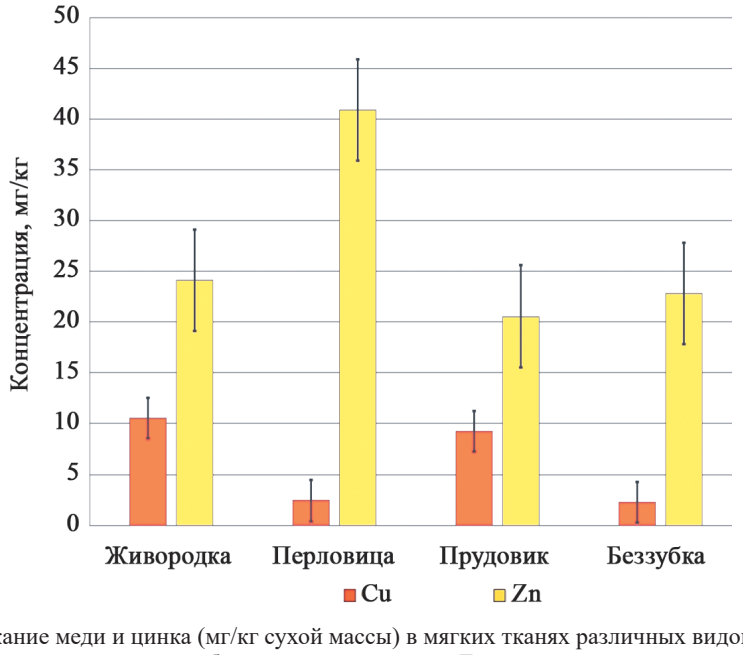


Рис. 2. Содержание меди и цинка (мг/кг сухой массы) в мягких тканях различных видов моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля

Fig. 2. The content of copper and zinc (mg/kg dry weight) in the soft tissues of various species of mollusks inhabiting the water bodies of Gomel

Концентрация никеля и меди имеет наибольшие значения в тканях живородки (рис. 1, 2). Так, содержание меди у живородки достигает 10,52 мг/кг и превышает показатели прудовика, занимающего второе место по уровню концентрации данного металла, на 14 %. Содержание меди, в отличие от свинца, в тканях беззубки, наоборот, имеет минимальные значения (2,23 мг/кг), что в 4,72 раза ниже максимального значения. Однако заметно четкое превышение содержания соединений меди у брюхоногих моллюсков по сравнению с двустворчатыми (табл. 2). По полученным ранее данным живородка активно аккумулировала в тканях медь, свинец и цинк[5].

По концентрации никеля межвидовые различия у моллюсков выражены в еще меньшей степени (рис. 1). Живородка отличается наибольшим уровнем содержания металла (0,46 мг/кг), который превышает наименьший показатель, определенный у перловицы, в 2,73 раза. Также заметно относительно более высокое содержание данного элемента у брюхоногих по сравнению с двустворчатыми моллюсками (в 1,74 раза), однако различие не столь существенно, как для меди.

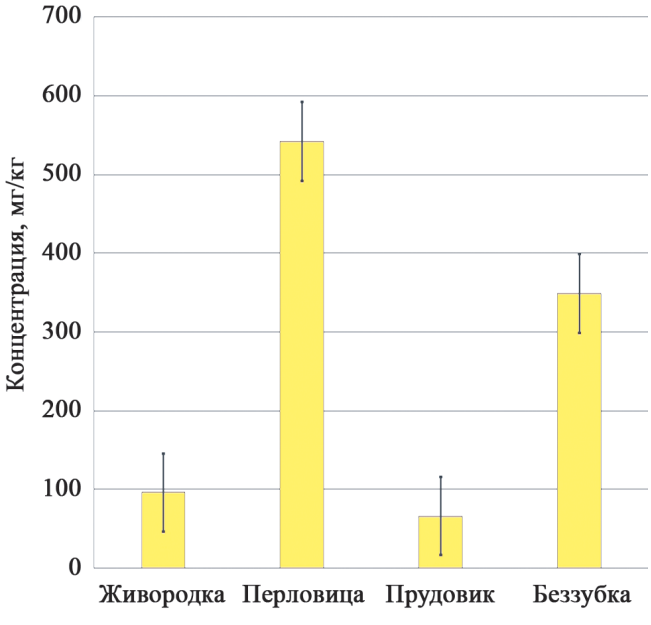


Рис. 3. Содержание марганца (мг/кг сухой массы) в мягких тканях различных видов моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля

Fig. 3. The content of manganese (mg/kg dry weight) in the soft tissues of various species of mollusks inhabiting the water bodies of Gomel

Наиболее значимые биогенные элементы (цинк, марганец и кобальт) максимально концентрируются в тканях перловицы (рис. 2, 3). Так, в отношении цинка следует отметить, что его содержание у перловицы в 2,01 раза выше по сравнению с другими видами, тогда как у живородки, беззубки и прудовика отличается незначительно. В этой связи именно перловицу можно считать индикаторным видом по данному элементу (рис. 2). В исследованиях, проводимых ранее, активным аккумулятором цинка была определена живородка[6]. Пути поступления металлов в ткани брюхоногих и двустворчатых моллюсков различны, и изменения аккумулятивной активности у моллюсков, вероятнее всего, связаны не столько с изменением уровня загрязнения компонентов водных экосистем, как с изменением форм нахождения изучаемых металлов в компонентах водоемов, так и с разной доступностью соединений металлов в абиотических компонентах водоемов. Как известно, в организм двустворчатых моллюсков пища поступает при фильтровании придонных слоев воды, содержащих органоминеральные комплексы тяжелых металлов.

В отношении марганца необходимо отметить весьма значимое превышение его содержания у двустворчатых моллюсков, которое в 5,68 раза выше по сравнению с брюхоногими (табл. 2). При этом, содержание марганца в тканях перловицы (542,00 мг/кг) в 1,55 раза выше показателя другого двустворчатого моллюска – беззубки (349,00 мг/кг), что в 8,12 раза превышает значение, полученное для прудовика, у которого содержание марганца минимально. Полученные данные согласуются с литературными [12], где указано, что содержание марганца у пресноводных двустворок может достигать 5 537,00 мг/кг сухой массы. Аналогичная закономерность была отмечена и в исследованиях, проводимых ранее на данных водоемах: максимальная концентрация элемента зафиксирована для двустворчатых моллюсков, которая

[5]Макаренко Т. В. Распределение тяжелых металлов в биотических и абиотических компонентах водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий: дис. … канд. биол. наук: 03.02.08. Минск, 2010.
[6]Там же.

практически на порядок выше, чем у брюхоногих[7]. Некоторые исследователи [12; 13] объясняют значительное накопление марганца в тканях высокой фильтрующей способностью двустворчатых моллюсков и значительным загрязнением воды водоемов данным элементом.

Содержание кобальта у различных видов моллюсков варьирует незначительно: различия между наибольшей концентрацией (у перловицы) и наименьшей (у живородки) составляет 1,44 раза (рис. 1). Для кобальта в изучаемых водоемах и ранее отмечалось незначительное варьирование содержания в тканях рассматриваемых видов.

В отношении содержания хрома можно четко выделить прудовика как вида-индикатора загрязнения водоемов данным элементом. Концентрация хрома в мягких тканях прудовика, в среднем, в 9 раз выше, чем у других видов моллюсков (рис. 1). В то же время, у других моллюсков варьирование содержания данного металла незначительно: от 0,13 мг/кг у живородки до 0,19 мг/кг у беззубки. Высокий уровень содержания металла в тканях прудовика отмечался в данных водных экосистемах и ранее[8], однако таких различий для концентраций хрома у представленных видов моллюсков зафиксировано не было.

На рис. 4–5 представлены результаты определения меди, марганца и никеля в раковинах моллюсков, обитающих в городских водоемах. Содержание свинца, цинка, кобальта и хрома в раковинах было ниже предела их обнаружения. В исследованиях, проводимых сотрудниками Кубанского госуниверситета с морскими мидиями, получены похожие результаты: содержание свинца, кобальта, никеля и хрома в раковинах было ниже предела обнаружения [14]. Однако цинк, медь и марганец были обнаружены в створках устриц в концентрациях, составляющих 0,61; 0,69 и 6,01 мг/кг соответственно. Содержание меди и цинка в раковинах морских двустворок на порядок, а марганца – на два порядка ниже, чем у пресноводных двустворчатых моллюсков изучаемых водоемов. Возможно, на аккумуляцию металлов в раковинах оказывает влияние ионный состав воды.

Установлено, что наибольшая концентрация меди и марганца характерна для раковин прудовика 6,36 и 1036,00 мг/кг (рис. 4, 5).

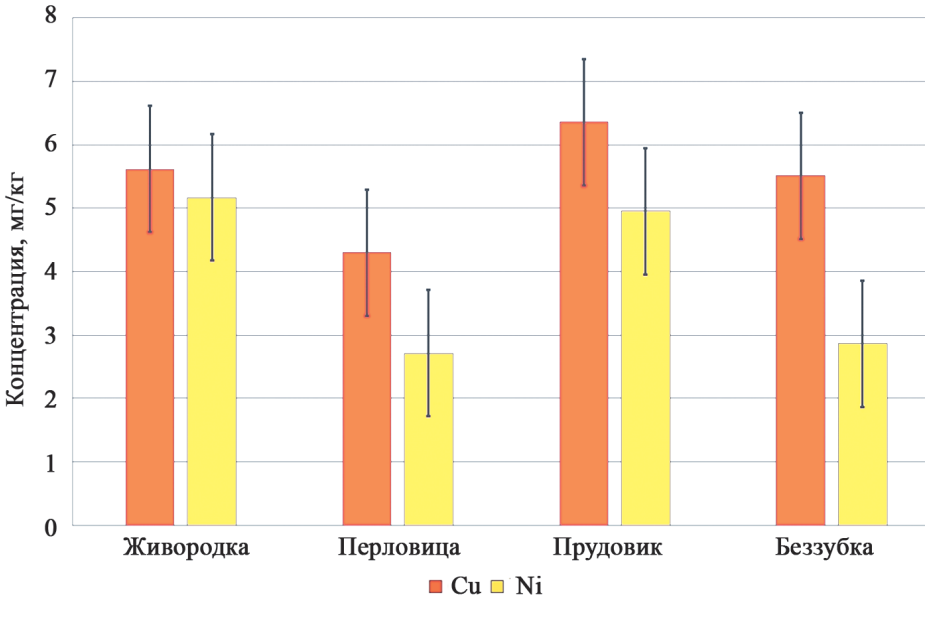


Рис. 4. Содержание меди и никеля (мг/кг сухой массы) в раковинах различных видов моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля

Fig. 4. The content of copper and nickel (mg/kg dry weight) in the shells of various species of mollusks inhabiting the water bodies of the city of Gomel

Из рис. 4 следует, что в раковинах прудовика выявлена достаточно высокая концентрация никеля (4,95 мг/кг), но максимальный уровень содержания данного металла обнаружен у живородки (5,17 мг/кг).

Анализ соотношения концентраций «мягкие ткани/раковины» свидетельствует, что имеются значительные различия как между металлами, так и между видами моллюсков по данному показателю (табл. 3).

[7]Макаренко Т. В. Распределение тяжелых металлов в биотических и абиотических компонентах водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий: дис. … канд. биол. наук: 03.02.08. Минск, 2010.
[8]Там же.

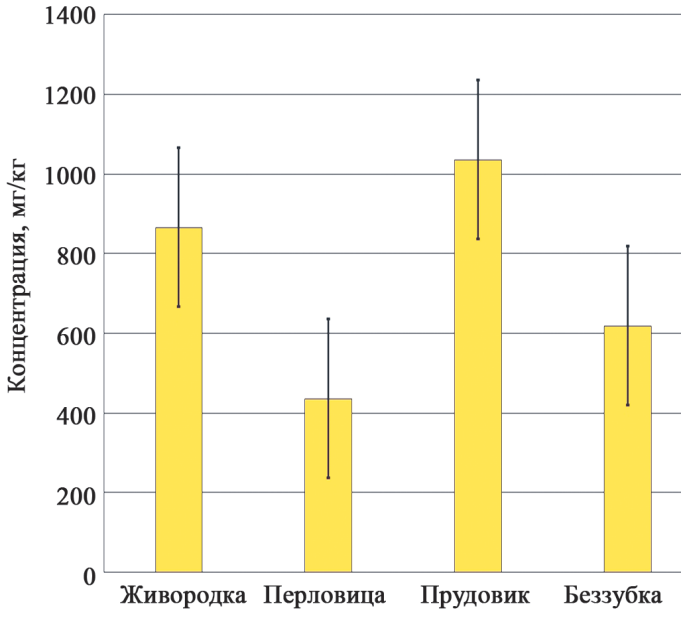


Рис. 5. Содержание марганца (мг/кг сухой массы) в раковинах различных видов моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля

Fig. 5. The content of manganese (mg/kg dry weight) in the shells of various species of mollusks inhabiting the water bodies of Gomel

Таблица 3

Соотношение концентрации тяжелых металлов в тканях и раковинах моллюсков водоемов г. Гомеля

Table 3

The ratio of the concentration of heavy metals in tissues and shells of mollusks of water bodies in Gomel

Вид моллюска	Отношение «ткань/раковина»		
	Cu	Mn	Ni
Живородка	8,66	0,26	0,54
Прудовик	2,50	0,42	1,80
Брюхоногие, среднее	5,58	0,34	1,17
Беззубка	1,75	3,93	1,25
Перловица	2,58	5,78	0,59
Двустворчатые, среднее	2,17	4,90	0,92
Среднее по всем видам	3,87	2,61	1,05

Таким образом, установлено, что медь преимущественно концентрируется в мягких тканях, где ее концентрация в среднем 3,87 раза выше по сравнению с раковинами. Напротив, никель равномерно распределяется между мягкими тканями и раковинами моллюсков (среднее отношение «ткань/раковина» близко к единице). Противоречивые данные получены для марганца: его содержание в тканях двустворчатых моллюсков превышает концентрацию в раковинах в среднем в 4,95 раза, а у брюхоногих моллюсков количество марганца в тканях в 3,11 раза ниже относительно концентрации марганца в раковине.

Для наиболее полного представления об уровне загрязненности водоема тяжелыми металлами необходима оценка интенсивности поступления тяжелых металлов в ткани моллюсков из воды и донных отложениий, которая производится с помощью вычисления отношения между содержание металлов в живых организмах и в абиотических компонентах водоема – донных отложениях и воде.

Уровень поглощения поллютантов водными организмами принято характеризовать «коэффициентом биологического поглощения (КБП)» или «коэффициентом накопления (КН)». Величина коэффициента накопления рассчитывается как отношение содержания элемента в живом организме к таковому в пище, субстрате (среде обитания) [1]. В табл. 4 приведены результаты расчетов коэффициентов биологического поглощения наблюдаемых металлов тканями брюхоногих и двустворчатых моллюсков из воды и донных отложений.

Таблица 4

Коэффициенты накопления тяжелых металлов тканями моллюсков по донным отложениям

Table 4

Coefficients of accumulation of heavy metals in mollusc tissues on bottom sediments

Водоем	Коэффициенты накопления						
	Pb	Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Ni
Брюхоногие							
Оз. У-образное	0,040	0,155	0,033	0,109	0,053	0,109	0,025
Оз, Волотовское	0,007	0,058	0,148	0,189	0,009	0,001	0,018
Оз. Шапор	0,010	0,337	0,334	0,505	0,033	0,007	0,031
Оз. Дедно	0,082	0,630	0,344	0,331	0,120	0,074	0,052
Оз. Володькино	0,019	2,521	0,084	0,092	0,019	0,007	0,055
Р. Сож, ниже города	0,013	0,064	0,126	0,034	0,010	0,003	0,014
Р. Сож, выше города	0,070	0,375	0,275	0,171	0,083	0,028	0,033
Среднее по городским водоемам	0,032	0,740	0,189	0,245	0,047	0,040	0,036
Фоновый водоем (старичный комплекс р. Сож)	0,012	0,281	0,367	0,053	0,029	0,008	0,009
Двустворчатые							
Оз. Шапор	0,012	0,069	0,301	1,502	0,037	0,004	0,023
Оз. Дедно	0,036	0,047	0,477	2,869	0,073	0,004	0,007
Оз. Володькино	0,172	0,595	0,233	0,594	0,038	0,020	0,031
Р. Сож, ниже города	0,236	0,190	0,259	0,626	0,054	0,010	0,042
Р. Сож, выше города	0,018	0,068	0,246	2,364	0,067	0,004	0,007
Среднее по городским водоемам	0,073	0,237	0,337	1,655	0,049	0,009	0,020
Фоновый водоем (старичный комплекс р. Сож)	0,008	0,061	0,147	0,752	0,029	0,005	0,006

Ряд накопления металлов у брюхоногих моллюсков имеет вид: Zn > Cu > Mn > Co > Pb >Ni >Cr и существенно отличается от ряда, составленного по содержанию металлов, представленному в статье ранее. Как и в ряду содержания, так и в ряду накопления биогенные металлы (цинк, медь и марганец) опережают металлы с невыясненной биологической функцией.

У двустворчатых моллюсков получены иные закономерности концентрирования тяжелых металлов из донных отложений: самый высокий коэффициент накопления определен для марганца, он является максимальным среди всех полученных значений (1,655). Изучаемые металлы составляют следующий ряд накопления в порядке убывания: Mn > Zn > Cu > Ni > Pb > Cr > Co.

У брюхоногих моллюсков накопление изучаемых металлов в старичном комплексе превышает таковые величины, рассчитанные для городских водоемов, за исключением никеля. Полученные данные подчеркивают необходимость изучения водных экосистем без видимых антропогенных нагрузок и расположенных на значительном удалении от городских агломераций.

В отличие от брюхоногих моллюсков, у двустворчатых определены более высокие $K_н$ всех тяжелых металлов в городских водоемах относительно старичного комплекса.

Выделить водоем с максимальным или минимальным уровнем накопления всех изучаемых металлов даже для одного вида моллюсков сложно. Так, у брюхоногих моллюсков в оз. У-образное рассчитано минимальное значение коэффициента накопления цинка и максимальная величина для накопления хрома. Только в оз. Волотовское у брюхоногих моллюсков наблюдается минимальное накопление свинца, меди, кобальта и хрома. В оз. Дедно, принимающем загрязненный поверхностный сток, рассчитаны максимальные значения коэффициента накопления у брюхоногих моллюсков для свинца и цинка, у двустворчатых моллюсков – для цинка, никеля и кобальта. Высокий уровень накопления в тканях брюхоногих моллюсков меди и никеля, а у двустворчатых моллюсков – меди и хрома отмечен в оз. Володькино, хотя водоем не испытывает значительной антропогенной нагрузки. Высокий уровень накопления металлов в тканях моллюсков в отдельных водоемах может быть следствием нахождения их соединений в компонентах водоема в биологически доступной форме.

В целом, сравнение величины коэффициента накопления тяжелых металлов у брюхоногих и двустворчатых моллюсков показало отсутствие значимых отличий только по кобальту. Существенно выше у брюхоногих значение коэффициента накопления хрома, никеля и меди. Накопление свинца, марганца и цинка, наоборот, выше у двустворчатых моллюсков.

По полученным средним значениям коэффициента накопления тяжелых металлов из донных отложений брюхоногие моллюски являются деконцентраторами всех элементов ($K_н < 1$). Двустворчатые моллюски являются концентраторами марганца ($K_н > 1$) и деконцентраторами всех остальных элементов ($K_н < 1$).

Заключение

Подводя итог вышесказанному, следует отметить, что для тяжелых металлов установлены значительные различия между их содержанием и накоплением у двустворчатых и брюхоногих моллюсков, так как представители этих классов отличаются друг от друга по ряду физиологических особенностей и типу питания. В частности, установлено более высокое содержание меди, хрома и никеля в тканях брюхоногих моллюсков. При этом наиболее четкие отличия характерны для меди. У хрома определена особая динамика концентрирования в тканях: максимальное содержание характерно для тканей прудовика, у живородки – минимальное. Содержание свинца, цинка, марганца и кобальта выше у двустворчатых моллюсков. Однако, четкие различия можно определить лишь в концентрации марганца и менее выраженные – для кобальта. Таким образом, содержание тяжелых металлов в значительной степени зависит от вида моллюсков. В раковинах моллюсков концентрация свинца, кобальта, хрома и цинка была ниже предела обнаружения.

Наибольшее варьирование концентрации тяжелых металлов от максимального к минимальному определено для хрома. Также значительные колебания показателей установлены для марганца, концентрация которого значительно выше у двустворчатых моллюсков. Существенные отличия в содержании определены для свинца, что, очевидно, говорит о наличии источника загрязнения данным тяжелым металлом отдельных водоемов г. Гомеля. Наименьшее межвидовое варьирование концентраций выявлено для кобальта и цинка.

Медь преимущественно концентрируется в мягких тканях моллюсков, никель равномерно распределяется между мягкими тканями и раковинами. Содержание марганца в тканях двустворчатых моллюсков превышает концентрацию в раковинах, у брюхоногих моллюсков отмечена обратная тенденция.

Достаточно сложно выявить среди изученных моллюсков вид, который бы отличался наименьшим накоплением изучаемых тяжелых металлов.

Ряды накопления изучаемых металлов, составленные для брюхоногих и двустворчатых моллюсков, имеют значительные различия, что может определяться различной доступностью металлов в абиотических компонентах водоема для особей разных классов моллюсков.

Выявить наиболее чистый и загрязненный водоемы, используя только содержание металлов в мягких тканях моллюсков и величины коэффициентов накопления металлов в тканях по донным отложениям, сложно, необходимо использовать для этого специальные интегральные показатели загрязнения, учитывающие вклад каждого металла в состояние водной экосистемы. Уровень накопления отдельных металлов в тканях брюхоногих моллюсков в старичном комплексе (контрольный водоем) превышал величины, рассчитанные для городских водоемов, чего не наблюдалось у двустворчатых моллюсков.

Для определения степени загрязнения абиотических компонентов водоемов медью и никелем можно рекомендовать живородку, для определения загрязнения цинком, марганцем и кобальтом – перловицу, для загрязнения хромом – прудовика, свинцом – беззубку.

Библиографические ссылки

1. Никаноров АМ, Жулидов АВ, Покаржевский АД. *Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах*. Ленинград: Гидрометеоиздат; 1991. 311 с.

2. Мур ДжВ, Рамамурти С. *Тяжелые металлы в природных водах*. Москва: Мир; 1987. 288 с.

3. Христофорова НК, Гнетецкий АВ. Содержание тяжелых металлов в долгоживущих митилидах Уссурийского залива Японского моря. *Биология моря*. 2022;1(48):30–37.

4. Добровольский ВВ. *Основы биогеохимии*. Москва: Высшая школа; 1998. 413 с.

5. Донец ММ, Цыганков ВЮ, Кульшова ВИ, Элхури Ж, Боярова МД, Гумовский АН, Гумовская ЮП, Богатов ВВ, Прозорова ЛА, Чернова ЕН, Лысенко ЕВ, Нго КК. Пищевая безопасность двустворчатых моллюсков Южного Вьетнама: хлорорганические соединения и тяжелые металлы как факторы риска для здоровья человека. *Медицинский академический журнал*. 2020;20(2):45–58.

6. Поспелова НВ, Приймак АС, Рябушко В.И. Содержание микроэлементов в мягких тканях и раковинах мидии *Mytilus galloprovincialis*, культивируемой на взморье г. Севастополя. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2021;4:67–80.

7. Ершова ТС, Зайцев ВФ, Чаплыгин ВА. Особенности миграции свинца в экосистеме Каспийского моря. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2021; 4(7):3–22.

8. Холодкевич СВ, Шаров АН, Чуйко ГМ, Кузнецова ТВ, Гапеева МВ, Ложкина РА. Оценка качества пресноводных экосистем по функциональному состоянию двустворчатых моллюсков. *Водные ресурсы*. 2019;2(46):214–224.

9. Силкин ЮА, Силкина ЕН, Силкин МЮ, Столбов АЯ, Силкина АЮ. Особенности накопления тяжелых металлов в мягких тканях средиземноморской мидии и гигантской устрицы, выращенных в прибрежной зоне юго-восточного Крыма. *Водное хозяйство России*. 2017;4:99–109.

10. Хомич ВС, Какарека СВ, Кухарчик ТИ. *Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси*. Минск: РУП «Минсктиппроект»; 2004. 260 с.

11. Волкова ВИ, Чыонг ВТ. Накопление свинца (Pb) и кадмия (Cd) моллюсками corbicula sp. в устьях рек города Хайфона (Вьетнам). *Современные проблемы науки и образования*. 2017;5:356.

12. Брень НВ. Биологический мониторинг и общие закономерности накопления тяжелых металлов пресноводными донными беспозвоночными. *Гидробиологический журнал*. 2008;44(2):96–115.

13. Столяр ОБ, Грубико ВВ, Мыхайлив РЛ, Мищук ЕВ. Влияние условий существования на связывание тяжелых металлов и окислительную деструкцию биомолекул в тканях пресноводного двустворчатого моллюска *Anodonta cygnea*. *Гидробиологический журнал*. 2003;39(6):73–82.

14. Темердашев ЗА, Елецкий ИЮ, Каунова АА, Корпакова ИГ. Определение тяжелых металлов в мидии *Mytilus galloprovincialis Lamarck* методом ИСП-АЭС. *Аналитика и контроль*. 2017;2(21):116–124.

References

1. Nikanorov AM, Zhulidov AV, Pokarzhevskij AD. *Biomonitoring metallov v presnovodnyh ekosistemah* [Biomonitoring of heavy metals in freshwater ecosystems]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 311 p. Russian.

2. Mur DzhV, Ramamurti S. *Tyazhelye metally v prirodnyh vodah* [Heavy metals in natural waters]. Moscow: Mir; 1987. 288 p. Russian.

3. Hristoforova NK, Gneteckij AV *Soderzhanie tyazhelyh metallov v dolgozhivushchih mitilidah ussurijskogo zaliva Yaponskogo morya* [The content of heavy metals in long-living mytilids from Ussuriisky bay] *Biologiya morya*. 2022;1(48):30–37. Russian.

4. Dobrovol'skij V.V. *Osnovy biogeohimii* [Fundamentals of biogeochemistry]. Moscow: Vysshaya shkola; 1998. 413 p. Russian.

5. Donec MM, Cygankov VYu, Kul'shova VI, Elhuri Zh, Boyarova MD, Gumovskij AN, Gumovskaya YuP, Bogatov VV, Prozorova LA, Chernova EN, Lysenko EV, Ngo KK. *Pishchevaya bezopasnost' dvustvorchatyh mollyuskov Yuzhnogo V'etnama: hlororganicheskie soedineniya i tyazhelye metally kak faktory riska dlya zdorov'ya cheloveka* [Food safety of bivalves from the south vietnam: organochlorine compounds and heavy metals as risk factors for human health]. *Medicinskij akademicheskij zhurnal*. 2020;20(2):45–58. Russian.

6. Pospelova NV, Prijmak AS, Ryabushko V.I. *Soderzhanie mikroelementov v myagkih tkanyah i rakovinah midii Mytilus galloprovincialis, kul'tiviruemoj na vzmor'e g. Sevastopolya* [Chemical Composition of Mussel Mytilus galloprovincialis Cultivated at the Seashore of Sevastopol (Black Sea)]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon morya*. 2021;4:67–80. Russian.

7. Ershova TS, Zajcev VF, Chaplygin VA. *Osobennosti migracii svinca v ekosisteme Kaspijskogo morya* [Features of lead migration in the ecosystem of the Caspian Sea] *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Himiya*. 2021; 4(7):3–22. Russian.

8. Holodkevich SV, Sharov AN, Chujko GM, Kuznecova TV, Gapeeva MV, Lozhkina RA. *Ocenka kachestva presnovodnyh ekosistem po funkcional'nomu sostoyaniyu dvustvorchatyh mollyuskov* [Assessment of the quality of freshwater ecosystems based on the functional condition of bivalved mollusks]. *Vodnye resursy*. 2019;2(46):214–224. Russian.

9. Silkin YuA, Silkina EN, Silkin MYu, Stolbov AYa, Silkina AYu. *Osobennosti nakopleniya tyazhelyh metallov v myagkih tkanyah sredizemnomorskoj midii i gigantskoj ustricy, vyrashchennyh v pribrezhnoj zone yugo-vostochnogo Kryma* [Features of the accumulation of heavy metals in the soft tissues of Mediterranean mussels and giant oysters grown in the coastal zone of southeastern Crimea]. *Vodnoe hozyajstvo Rossii*. 2017;4:99–109. Russian.

10. Homich VS, Kakareka SV, Kuharchik TI. *Ekogeohimiya gorodskih landshaftov Belarusi* [Ecogeochemistry of urban landscapes of Belarus]. Minsk: RUP «Minsktipproekt»; 2004. 260 p. Russian.

11. Volkova VI, Chyong VT. *Nakoplenie svinca (Pb) i kadmiya (Cd) mollyuskami corbicula sp. v ust'yah rek goroda Hajfona (V'etnam)* [accumulation of cadmium (Cd) and lead (Pb) in the mollusc *Corbicula sp* at estuary of Hai Phong city (Vietnam)] *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2017;5:356. Russian.

12. Bren' NV. *Biologicheskij monitoring i obshchie zakonomernosti nakopleniya tyazhelyh metallov presnovodnymi donnymi bespozvonochnymi* [Biological monitoring and general patterns of accumulation of heavy metals by freshwater benthic invertebrates]. *Hydrobiological Journal.* 2008;44(2): 96–115. Russian.

13. Stoljar OB, Grubinko VV, Myhajliv RL, et al. *Vliyanie uslovij sushchestvovaniya na svyazyvanie tyazhelyh metallov i okislitel'nuyu destrukciyu biomolekul v tkanyah presnovodnogo dvustvorchatogo mollyuska Anodonta cygnea* [Influence of living conditions on the binding of heavy metals and oxidative destruction of biomolecules in the tissues of the freshwater bivalve mollusk *Anodonta cygnea*]. *Hydrobiological Journal.* 2003;39(6): 73–82. Russian.

14. Temerdashev ZA, Eleckij IYu, Kaunova AA, Korpakova IG. *Opredelenie tyazhelyh metallov v midii Mytilus galloprovincialis Lamarck metodom ISP-AES* [Determination of heavy metals in Mytilus galloprovincialis Lamarck mussels using the ICP-AES method]. *Analitika i kontrol'*. 2017;2(21):116–124. Russian.

Статья поступила в редколлегию 11.05.2024.
Received by editorial board 11.05.2024.

УДК 502:628.4.047

РОЛЬ МИКРООРГАНИЗМОВ ОСНОВНЫХ ЭКОЛОГО-ТРОФИЧЕСКИХ ГРУПП В ПОСТУПЛЕНИИ ^{137}CS ИЗ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ В БИОМАССУ *AVENA SATIVA* L.

Е. А. ТАНКЕВИЧ[1)], ***А. Н. НИКИТИН***[2)], ***Ю. К. СИМОНЧИК***[1)], ***И. И. КОНЦЕВАЯ***[3)]

[1)]*Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Беларусь*
[2)]*Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, ул. Академика В. Ф. Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь*
[3)]*Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель, Беларусь*

В исследовании рассматривается влияние почвенных микроорганизмов основных эколого-трофических групп на переход ^{137}Cs из дерново-подзолистой супесчаной почвы зоны отчуждения Чернобыльской АЭС в биомассу овса посевного (*Avena sativa* L.). Кроме того, оценено воздействие данных микроорганизмов на содержание в исследуемой почве стабильных изотопов K, Ca, Sr, Cs в биодоступных формах.

Образец цитирования:
Танкевич ЕА, Никитин АН, Симончик ЮК, Концевая ИИ. Роль микроорганизмов основных эколого-трофических групп в поступлении ^{137}Cs из дерново-подзолистой супесчаной почвы в биомассу *Avena sativa* L. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;2:46–56.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-46-56

For citation:
Tankevich EA, Nikitin AN, Simonchyk YuK, Kantsavaya II. The role of microorganisms of the main ecological and trophic groups in the transfer of 137Cs from soddy-podzolic sandy loam soil into the biomass of *Avena sativa* L. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;2:46–56. Russian.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-46-56

Авторы:
Елена Александровна Танкевич – научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.
Александр Николаевич Никитин – кандидат сельскохозяйственных наук; заместитель директора по научной работе.
Юлия Константиновна Симончик – научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.
Ирина Ильинична Концевая – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии биологического факультета.

Authors:
Elena A. Tankevich, researcher at the laboratory of radioecology.
elena.karpova1991@mail.ru
Aleksander N. Nikitin, PhD (agriculture); deputy director for research.
nikitinale@gmail.com
Yuliya K. Simonchyk, researcher at the laboratory of radioecology.
simonagomel@gmail.com
Irina I. Kantsavaya, PhD (biology), associate professor at the department of biology, faculty of biology.
ikantsavaya@mail.ru

Установлено, что внесение в дерново-подзолистую супесчаную почву амилолитических бактерий и спорообразующих аммонификаторов усиливает транслокацию ^{137}Cs из подземных органов овса в надземные в 1,8–4,3 раза. При этом содержание радионуклида в его подземных органах уменьшается на 29,5 % при внесении в почву спорообразующих аммонификаторов. Внесение в дерново-подзолистую супесчаную почву консорциума микроорганизмов ЕМ-1 снизило накопление ^{137}Cs в надземных органах овса на 71,8 %, сохраненяя при этом уровень содержания радионуклида в корневой системе. В экспериментальной системе, включающей дерново-подзолистую супесчаную почву, растения овса посевного и такие физиологические группы микроорганизмов, как амилолитические микроорганизмы или спорообразующие аммонификаторы, происходит существенное увеличение содержания ^{137}Cs в водорастворимой форме в 1,5 и 3,5 раза соответственно, что может объяснить рост накопления радионуклида в надземных органах растения. Внесение в дерново-подзолистую почву консорциума микроорганизмов ЕМ-1 снизило содержание ^{137}Cs в водорастворимой форме на 32,6 %. Аналогичные по направленности изменения наблюдаются и в отношении водорастворимой формы К: амилолитические микроорганизмы и спорообразующие аммонификаторы увеличивают данный показатель на 49,9 и 67,5 % соответственно, а микробиологический препарат ЕМ-1 снижает на 52,9 %.

***Ключевые слова*:** почвенные ассоциации микроорганизмов; радиоактивное загрязнение; зона отчуждения Чернобыльской АЭС; биологическая доступность техногенных радионуклидов; цезий-137; макроэлементы; микроэлементы.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках гранта для выполнения научно-исследовательских работ среди докторантов, аспирантов и соискателей Национальной академии наук Беларуси «Значение основных физиологических групп почвенных микроорганизмов в изменении биологической доступности техногенных радионуклидов».

THE ROLE OF MICROORGANISMS OF THE MAIN ECOLOGICAL AND TROPHIC GROUPS IN THE TRANSFER OF ^{137}CS FROM SODDY-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL INTO THE BIOMASS OF *AVENA SATIVA* L.

***E. A. TANKEVICH*[a], *A. N. NIKITIN*[b], *Yu. K. SIMONCHYK*[a], *I. I. KANTSAVAYA*[c]**

[a]*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus,*
4 Fiadzyuninskaga Street, Gomel 246007, Belarus
[b]*Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus,*
2 Academician V. F. Kupreviča Street, Minsk 220084, Belarus
[c]*Francyisk Skorina Gomel State University,*
104 Saveckaja Street, Gomel 246019, Belarus

Corresponding author: E. A. Tankevich (elena.karpova1991@mail.ru)

In this work, we investigated the influence of soil microorganisms of the main ecological-trophic groups on the transition of cesium-137 from the soddy-podzolic sandy loam soil of the Chernobyl nuclear power plant exclusion zone into the biomass of oats (Avena sativa L.). Changes of K, Ca, Sr, Cs bioavailable forms, concentration in the soil under impact of these microorganisms investigated also. It has been established that the introduction of amylolytic bacteria and spore-forming ammonifiers into soddy-podzolic sandy loam soil enhances the translocation of ^{137}Cs from the underground organs of oats to the aboveground ones by 1,8–4,3 times. At the same time, the radionuclide content in the underground organs of oats decreases by 29.5 % when spore-forming ammonifiers are added to the soil. The introduction of the consortium of microorganisms EM-1 into the soddy-podzolic sandy loam soil reduced the accumulation of ^{137}Cs in the above-ground organs of oats by 71,8 %, while maintaining the level of radionuclide content in the root system. In an experimental system including soddy-podzolic sandy loam soil, oat plants and such physiological groups of microorganisms as amylolytic microorganisms or spore-forming ammonifiers, there is a significant increase in the content of ^{137}Cs in water-soluble form by 1,5 and 3,5 times, respectively, which can explain the increase in accumulation radionuclide in above-ground plant organs.

The introduction of the consortium of microorganisms EM-1 into the soddy-podzolic soil reduced the content of ^{137}Cs in water-soluble form by 32,6 %. Changes similar in direction are observed in relation to the water-soluble form of K: amylolytic microorganisms and spore-forming ammonifiers increase its concentration by 49,9 and 67,5 %, respectively, and the microbiological preparation EM-1 reduces it by 52,9 %.

Keywords: associations of soil microorganisms; radioactive contamination; exclusion zone of Chernobyl NPP; bioavailability of technogenic radionuclides; caesium-137; macroelements; microelements.

Acknowledgments. The research was carried out within the framework of a grant to carry out research work among doctoral students, graduate students and applicants of the National Academy of Sciences of Belarus «The importance of the main physiological groups of soil microorganisms in changing the bioavailability of technogenic radionuclides».

Введение

В условиях напряженной экологической ситуации, складывающейся в мире, одной из наиболее актуальных проблем является загрязнение наземных экосистем техногенными радионуклидами [1].

Радиоэкологическая ситуация в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС в основном определяется загрязнением окружающей среды ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238,239,240}Pu и ^{241}Am, изменяясь не только с естественным распадом радионуклидов, но и с переходом их в другие физико-химические состояния [2].

Почвенные микроорганизмы являются источниками большого разнообразия физико-химических и биологических механизмов, осуществляющих превращения между растворимыми и нерастворимыми фазами радионуклидов. Чувствительность и высокая индикационная способность микроорганизмов позволяют выбрать их в качестве инструмента мониторинга антропогенных изменений биосферы [3]. Воздействие ассоциаций микроорганизмов на доступность радионуклидов для корневого поступления в растения тесно связано с биогеохимическими процессами, протекающими в почве. Можно выделить два основных направления протекания данных процессов. Во-первых, благодаря деятельности почвенных микроорганизмов нерастворимые соединения радионуклидов переходят в растворимую форму, таким образом увеличивается их потенциальная токсичность. Во-вторых, растворимые радионуклиды закрепляются микроорганизмами и становятся недоступными для корневого поглощения. Отношение между иммобилизацией и мобилизацией непосредственно зависит от радионуклида, вида, физико-химических условий среды и состава микробиоценоза почвы [4].

Проблема перехода техногенных радиоизотопов из почв с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения в растения остается достаточно серьезной и в настоящее время. Изучение роли почвенных ассоциаций микроорганизмов позволит предложить новые методы реабилитации земель, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

Цель работы: исследовать влияние основных эколого-трофических групп почвенных микроорганизмов на изменение физико-химических форм ^{137}Cs и содержание в биодоступных формах стабильных изотопов K, Ca, Sr, Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве зоны отчуждения Чернобыльской АЭС (в условиях вегетационного эксперимента), а также на переход радиоизотопов ^{137}Cs из почвы в биомассу овса посевного (*Avena sativa* L.).

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись основные эколого-трофические группы почвенных микроорганизмов, оказывающие существенное влияние на биологическую доступность техногенных радионуклидов и содержание макро- и микроэлементов в дерново-подзолистой супесчаной почве с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

Дерново-подзолистую супесчаную почву отбирали с глубины 10–15 см в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС в частном подворье бывшего населенного пункта Борщевка (Гомельская обл., Беларусь, Полесский государственный радиационно-экологический заповедник). Почву предварительно очищали от надземных частей растений и просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм, тщательно перемешивали, затем помещали в специальные пластиковые сосуды для выращивания растений объемом 1 л, которые размещали на пластиковых поддонах согласно схеме эксперимента.

Для вегетационного эксперимента были отобраны наиболее значимые физиологические группы почвенных микроорганизмов, оказавшие существенное влияние на изменение физико-химических форм техногенных радионуклидов по результатам предыдущего эксперимента [5].

В результате посевов на элективные агаризованные питательные среды были получены следующие накопительные культуры:

1) амилолитические микроорганизмы;

2) спорообразующие аммонификаторы.

Также в эксперименте было исследовано влияние микробиологического удобрения EM-1, которое разработано профессором Теруо Хига (University of the Ryukyus, Япония) и включает в себя три основные группы микроорганизмов: молочнокислые бактерии (*Lactobacillus plantarum*, *L. casei*, *Streptococcus lactis*), фотосинтезирующие бактерии (*Rhodopseudomonas palustris* и *Rhodobacter sphaeroides*), дрожжи (*Saccharomyces cerevisiae* и *Candida utilis*). Кроме того, в небольших количествах препарат включает актиномицеты (*Streptomyces albus* и *S. griseus*) и ферментирующие грибы (*Aspergillus oryzae*, *Mucor hiemalis*).

В экспериментальных работах использовали семена овса посевного производства ОАО «МинскСортСемОвощ». Все работы по отбору посадочного материала, подготовке к посадке семян проводили согласно ГОСТу 12308-84[1]. В каждый горшок высевали по 15 семян выбранной культуры на глубину 1 см, затем в почву при закладке эксперимента и через 15 дней после высева растений вносили по 340 мл суспензий каждой из исследуемых эколого-трофических групп почвенных микроорганизмов (содержащих приблизительно $1{,}5\times10^8$ КОЕ/мл). Оценку титра микроорганизмов выполняли согласно [6]. В контрольные образцы вносили по 340 мл мясо-пептонного бульона без инокуляции микроорганизмов.

[1]ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Москва: Стандартинформ, 2011. 28 с.

Суспензии почвенных микроорганизмов готовили на основе мясо-пептонного бульона (МПБ). Для этого в МПБ вносили из чашек Петри стерильной микробиологической петлей инокулянт, представляющий одну из выделенных групп почвенных микроорганизмов. Полученные бактериальные культуры помещали в термостат и инкубировали при температуре 37,0 ± 0,1 °С в течение суток до появления визуальной мутности. Перед внесением в почву мутность жидких сред доводили до стандарта BBL (стандарта мутности № 0.5, по МакФарланду) – при длине волны 625 нм оптическая плотность бактериальных суспензий составляла 0,08–0,10 [6]. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре *ПЭ-5300 ВИ.* По мере необходимости на протяжении всего эксперимента в субстраты с растениями вносили дистиллированную воду для поддержания влажности 70 % от полной влагоемкости. Каждый из вариантов опыта выполняли в пятикратной повторности. Продолжительность вегетационного эксперимента составила 30 суток.

Для постановки вегетационного эксперимента была использована фитокомната с регулируемым климатом (рис. 1). В рабочем пространстве фитокомнаты постоянно поддерживалась температура воздуха 24 ± 1 °С, влажность воздуха 55 ± 5 %. Продолжительность искусственного светового дня составила 16 ч при потоке ФАР 100 мкмоль/(м^2·сек). Для освещения использовались светодиодные лампы *ЛД-27-25W-1200-УХЛ4.*

Рис. 1. Вегетационный эксперимент в фитокомнате

Fig. 1. Vegetation experiment in the phytoroom

По окончанию вегетационного эксперимента срезали надземные части растений. Фитомассу высушивали до абсолютно сухого состояния, измельчали и взвешивали. Образцы помещали в 100 мл сосуды для последующих измерений на гамма-спектрометрическом комплексе *CANBERRA Packard.*

Образцы подземной части растений аккуратно отряхивали от почвенной смеси, корни промывали до отделения комочков почвы, высушивали до абсолютно сухого веса, а затем помещали в сосуды для последующих измерений.

Для характеристики уровня накопления ^{137}Cs в образцах растений и содержания радионуклида в почве использовали величину удельной активности (УА, Бк/кг). При изучении влияния каждой из физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение биодоступных форм ^{137}Cs определяли содержание водорастворимой и ионообменной форм радионуклида методом последовательной экстракции [7; 8].

Последовательная экстракция включала следующие этапы:

1. *Водорастворимую форму* выделяли посредством экстракции в дистиллированной воде. Образец почвы 20 г помещали в 200 мл дистиллированной воды. Суспензию взбалтывали при комнатной температуре на протяжении 24 ч. Экстракт отделяли от почвы фильтрованием. Почву промывали на фильтровальной бумаге 200 мл дистиллированной воды. Жидкую фазу помещали в сосуд емкостью 100 мл для измерения на γ-спектрометре и ICP-MS.

2. *Ионообменную форму* выделяли посредством экстракции в растворе ацетата аммония. Твердую фазу с предыдущего шага помещали в 200 мл 1 М раствора ацетата аммония с pH доведенной до 7,0. Суспензию взбалтывали при комнатной температуре на протяжении 24 ч. Экстракт отделяли от почвы фильтрованием. Почву промывали 200 мл дистиллированной воды. Жидкую фазу помещали в сосуд емкостью 100 мл для измерения на γ-спектрометре и ICP-MS.

Измерения на гамма-спектрометрическом комплексе *CANBERRA Packard* с коаксиальным полупроводниковым детектором *Ge(Li)* расширенного энергетического диапазона проводили в соответствии

с принятыми методическими рекомендациями[2]. Относительная ошибка измерения удельной активности ^{137}Cs в пробах составляла от 5 до 10 % в зависимости от активности образца. Измерение концентрации макро- и микроэлементов в каждом опытном варианте проводили в пятикратной повторности на *ICP-MS Elan-DRCe (Perkin Elmer)* согласно СТБ ISO17294-1-2007 и СТБ ISO 17294-2-2007[3,4]. Микробиологическую индикацию почвы выполняли согласно общепринятым в почвенной микробиологии методам [9; 10]. Агрохимический анализ почвенного образца выполняли согласно ГОСТ[5–10].

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследований установлено, что удельная активность исследуемой дерново-подзолистой супесчаной почвы составила 13949 ± 837 Бк/кг.

Агрохимические показатели данной почвы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Агрохимические показатели использованной в эксперименте дерново-подзолистой супесчаной почвы

Table 1

Agrochemical indicators of sod-podzolic sandy loam soil used in the experiment

Агрохимические показатели почвы, единицы измерения	
pH (в KCl), ед.	6,4
Ca (обм), мг/кг	2430
Mg (обм, подв.), мг/кг	83,6
P_2O_5 (подв), мг/кг	3021
Органическое вещество (гумус), %	3,5
S, сумма поглощенных оснований, ммоль/100г	42,0
Hr, гидролитическая кислотность, ммоль/100г	0,99
T, емкость поглощения, ммоль/100г	42.99
V, степень насыщенности почв основаниями, %	97,7
K_2O (обм), мг/кг	617

Уровень pH близок к нейтральному. В модельной почве наблюдалось очень высокое содержание обменного кальция, низкое содержание обменного магния. Содержание подвижного фосфора (P_2O_5) в дерново-подзолистой почве соответствует очень высокому значению. Обеспеченность дерново-подзолистой почвы обменным калием (K_2O) соответствует также очень высоким показателям. Значительное содержание калия в почве позволило исключить влияние механизмов усиления корневого потребления Cs из почвы в условиях дефицита данного макроэлемента. Содержание гумуса соответствует очень высокому уровню. Сумма поглощенных оснований (S) в дерново-подзолистой почве очень высокая.

[2]МВИ. МН 3421-2010: МВИ объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами: утв. БелГИМ 28.05.10. Минск: БелГИМ, 2010. 35 с.
[3]СТБ ISO 17294-1-2007 Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Ч. 1. Общие требования. Введ. 01.05.2008. Минск: Госстандарт, 2008. 32 с.
[4]СТБ ISO 17294-2-2007 Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Ч. 2. Определение 62 элементов. Минск: Госстандарт, 2007. 21 с.
[5]ГОСТ 26483-85. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. Введ. 1986-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1985. 6 с.
[6]ГОСТ 26212-2021. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. Введ. 2022-08-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.
[7]ГОСТ 27821-2020. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. Введ. 2022-01-01. Москва: Стандартинформ, 2020. 9 с.
[8]ГОСТ 26487-85. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. Введ. 1986-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1985. 14 с.
[9]ГОСТ 26207-91. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Введ. 1993-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1992. 7 с.
[10]ГОСТ 26213-2021. Методы определения органического вещества. Взамен ГОСТ 26213-91. Введ. 2022-08-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.

В табл. 2 представлены данные по оценке влияния почвенных микроорганизмов исследуемых эколого-трофических групп на биологическую доступность ^{137}Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве.

Таблица 2

Оценка влияния почвенных микроорганизмов основных эколого-трофических групп на накопление ^{137}Cs овсом посевным

Table 2

Assessment of the influence of soil microorganisms of the main ecological-trophic groups on the accumulation of ^{137}Cs by oats

Варианты опыта	Удельная активность, Бк/кг	
	Подземная часть	Надземная часть
Контроль	9539,6 ± 1471,0	1334,8 ± 216,5
Амилолитические	11071 ± 2334,2	2769,8 ± 1522,8*
Спорообразующие аммонификаторы	6730 ± 1797,5**	4081,4 ± 2017,2**
ЕМ-1	10225,6 ± 1594,7	376,3 ± 140,4**

Примечание. Различия достоверны по отношению к контролю *$p < 0,05$; **$p < 0,01$.

Внесение в почву спорообразующих аммонификаторов привело к снижению удельной активности ^{137}Cs в подземных органах растения на 29,5 %, а в надземных – практически к трехкратному увеличению. Данные результаты свидетельствует об усилении транслокации радионуклида в надземные органы под воздействием спорообразующих аммонификаторов.

Эффект внесения амилолитических бактерий в почву на накопление ^{137}Cs в корнях овса оказался несущественным. Однако данная группа микроорганизмов привела к повышению содержания радионуклида ^{137}Cs в надземных частях растения. Следовательно, как амилолитические микроорганизмы, так и спорообразующие аммонификаторы существенно увеличивают транслокацию цезия из подземных органов растения в надземные. Данное явление может быть связано с выделением микроорганизмами данных эколого-трофических групп биологически активных соединений, усиливающих активность калиевых каналов выходящего выпрямления (SKOR), обеспечивающих выброс K, а вместе с ним и Cs, из клеток паренхимы корня в ксилему стебля. Микробиологическое удобрение ЕМ-1 не оказало значимого влияния на накопление ^{137}Cs подземными частями растениями. Хотя среднеарифметическое значение оказалось в этом варианте на 7,2 % выше, чем в контроле, статистическая значимость этого изменения невысока вследствие высокой вариабельности показателя.

Более выраженный эффект оказал консорциум микроорганизмов ЕМ-1 на переход ^{137}Cs в надземные органы овса посевного. Снижение накопления радионуклида в этом варианте опыта составило 71,8 % относительно контроля. Таким образом, данный комплекс микроорганизмов не столько привел к снижению корневого поступления радионуклида, сколько снизил его транслокацию из подземных органов в надземные.

В результате оценки содержания ^{137}Cs в биодоступных формах в дерново-подзолистой супесчаной почве после завершения вегетационного эксперимента установлено, что спорообразующие аммонификаторы увеличили концентрацию радионуклида в водорастворимой форме в 3,5 раза (табл. 3).

Таблица 3

Влияние почвенных микроорганизмов основных эколого-трофических групп на содержание водорастворимой и ионообменной формы ^{137}Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве

Table 3

The influence of soil microorganisms of the main ecological-trophic groups on the content of water-soluble and ion-exchange forms of ^{137}Cs in soddy-podzolic sandy loam soil

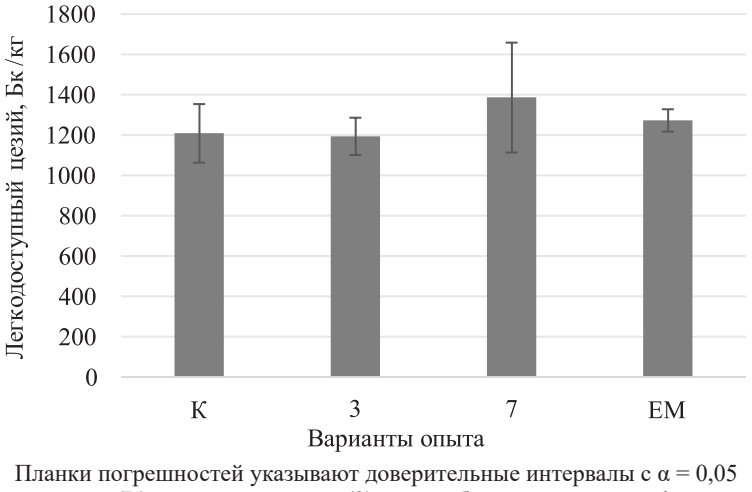
Варианты опыта	Водорастворимая форма ^{137}Cs, Бк/кг	Ионообменная форма ^{137}Cs, Бк/кг
Контроль	27,8 ± 4,5	1180,5 ± 145,6
Амилолитические	42,2 ± 9,7**	1151,2 ± 94,0
Спорообразующие аммонификаторы	126,6 ± 67,9**	1259,1 ± 322,9
ЕМ-1	18,7 ± 4,3**	1253,8 ± 53,0

Примечание. Различия достоверны по отношению к контролю * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

Следует отметить, что в модельном эксперименте спорообразующие аммонификаторы несколько уменьшили содержание ^{137}Cs в водорастворимой форме [5]. Однако в более естественной системе, включающей полный комплекс почвенных микроорганизмов и высшее растение, увеличение в почвенном образце количества микроорганизмов, относящихся к данной группе, наоборот, способствует повышению концентрации радионуклида в биодоступной форме по сравнению с контрольным вариантом. Данный результат согласуется с максимальным увеличением накопления радиоактивного изотопа цезия в надземных органах овса при внесении рассматриваемой группы микроорганизмов в почву. При этом среднеарифметическое значение активности ^{137}Cs в ионообменной форме при внесении спорообразующих аммонификаторов увеличилось на 6,7 %, но различия с контролем статистически недостоверны.

Амилолитические микроорганизмы также повлияли на увеличение удельной активности ^{137}Cs в водорастворимой форме. Данный показатель увеличился на 51,6 % относительно контроля. При этом содержание радионуклида в ионообменной форме осталось на контрольном уровне. Повышение активности ^{137}Cs в водорастворимой форме при внесении амилолитических бактерий в дерново-подзолистую супесчаную почву отразилось на усилении перехода радионуклида в надземные органы. Среди групп микроорганизмов, включенных в схему эксперимента, только комплекс, входящий в ЕМ-1, снизил активность ^{137}Cs в водорастворимой форме. Снижение составило 32,6 % относительно контрольного варианта опыта. Падение активности радионуклида в водорастворимой форме отразилось на существенном уменьшении его перехода в надземные органы овса посевного. Таким образом, в условиях высокой обеспеченности растений на дерново-подзолистой супесчаной почве калием, накопление ^{137}Cs в надземных органах овса соответствует его содержанию в водорастворимой форме. Поскольку содержание радионуклида в данной форме можно рассматривать в качестве показателя его концентрации в почвенном растворе, наблюдаемый эффект согласуется с известными закономерностями корневого поступления радиоизотопов цезия растениями.

На рис. 2 показано влияние исследуемых эколого-трофических групп микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный) ^{137}Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве.



Планки погрешностей указывают доверительные интервалы с α = 0,05
Варианты опыта: контроль (К), амилолитические (3), спорообразующие аммонификаторы (7), ЕМ-1 (ЕМ)
Error bars indicate confidence intervals with α = 0.05
Experiment options: control (K), amylolytic (3), spore-forming ammonifiers (7), EM-1 (EM)

Рис. 2. Содержание легкодоступного ^{137}Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве

Fig. 2. The concentration of readily available ^{137}Cs in soddy-podzolic sandy loam soil

Среднее значение содержания легкодоступного ^{137}Cs при внесении в почву различных физиологических групп микроорганизмов увеличилось в следующих вариантах опыта: спорообразующие аммонификаторы – на 14,7 %, микробиологический препарат ЕМ-1 – на 5,3 %. Амилолитическая группа микроорганизмов оказала влияние на снижение содержания легкодоступного цезия-137 на 2,2 % по сравнению с контрольным вариантом опыта. Однако данные изменения не являются статистически значимыми.

Влияние почвенных микроорганизмов различных эколого-трофических групп на содержание в биодоступных формах таких макроэлементов, как Са и К в дерново-подзолистой супесчаной почве, представлено в табл. 4.

В условиях высокого содержания калия в дерново-подзолистой супесчаной почве внесение микробиологического удобрения ЕМ-1 снизило содержание обсуждаемого макроэлемента в водорастворимой форме на 52,9 %., что демонстрирует тенденцию к его уменьшению в этом варианте опыта. Однако это не привело к повышению уровня накопления ^{137}Cs в надземной биомассе овса посевного.

Таблица 4

Содержание Ca и K в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Table 4

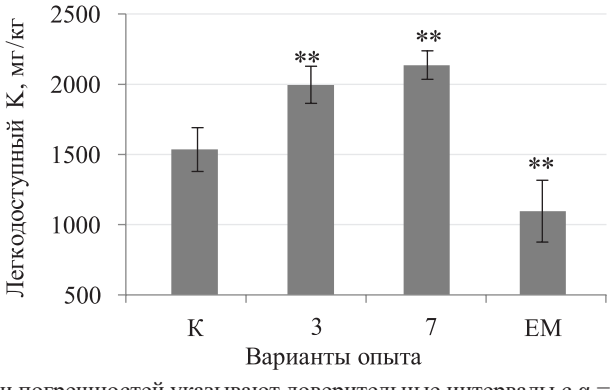
Concentration of Ca and K in the samples of soddy-podzolic soil

Варианты опыта	Ca		K	
	Водорастворимая форма, мг/кг	Ионообменная форма, мг/кг	Водорастворимая форма, мг/кг	Ионообменная форма, мг/кг
Контроль	1167,6 ± 282,0	8406,7 ± 561,6	696,9 ± 53,8	837,9 ± 127,3
Амилолитические	1120,4 ± 307,3	9300,9 ± 943,0*	1044,5 ± 137,8**	951,3 ± 120,1
Спорообразующие аммонификаторы	1083,1 ± 162,6	9427,6 ± 1025,2*	1167,0 ± 164,7**	969,1 ± 256,7
ЕМ-1	522,8 ± 54,2**	8917,3 ± 332,9*	328,3 ± 75,8**	768,2 ± 157,8

Примечание. Различия достоверны по отношению к контролю * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$.

В водорастворимой форме концентрация К увеличилась в варианте опыта с амилолитическими микроорганизмами – на 49,9 % и спорообразующими аммонификаторами на 67,5 %. Тенденция к сходному эффекту имеет место и в отношении ионообменной формы калия.

На рис. 3 показано влияние исследуемых эколого-трофических групп микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный) К в дерново-подзолистой супесчаной почве.



Планки погрешностей указывают доверительные интервалы с α = 0,05.
Значимые отличия от контроля отмечены звездочками (** $p < 0,01$)
Варианты опыта: контроль (К), амилолитические (3), спорообразующие аммонификаторы (7), ЕМ-1 (ЕМ)
Error bars indicate confidence intervals with α = 0.05.
Significant differences from the control are marked with asterisks (** $p < 0.01$)
Experiment options: control (K), amylolytic (3), spore-forming ammonifiers (7), EM-1 (EM)

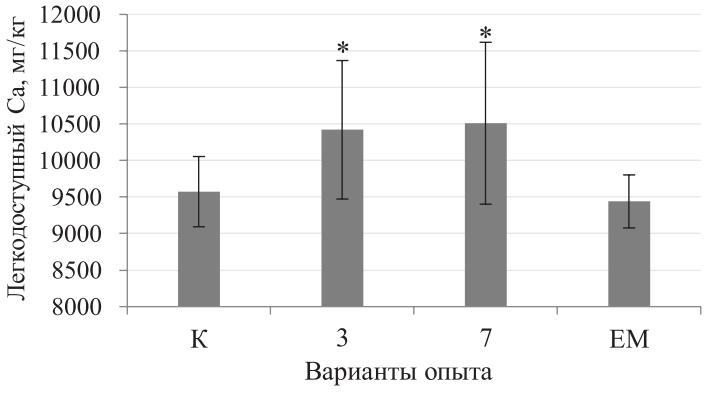
Рис. 3. Содержание легкодоступного К в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Fig. 3. The concentration of readily available K in samples of soddy-podzolic sandy loam soil

Увеличение легкодоступного К наблюдали в варианте с амилолитическими микроорганизмами на 30,0 %, спорообразующими аммонификаторами на 39,2 %, снижение содержания К отмечали в варианте опыта ЕМ – на 28,6 %. Во всех исследуемых группах определены достоверные различия относительно контрольного образца. Наиболее существенное снижение Ca в водорастворимой форме наблюдали в варианте опыта ЕМ-1 – на 55,2 %. Для ионообменной формы характерно же увеличение исследуемого макроэлемента во всех вариантах опыта. Значительно возросло содержание Ca в ионообменной форме под влиянием спорообразующих аммонификаторов – на 12,1 % относительно контрольного варианта.

На рис. 4 показано влияние исследуемых эколого-трофических групп микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный) Ca в дерново-подзолистой супесчаной почве.

Содержание легкодоступного Ca повысилось в варианте с амилолитическими микроорганизмами на 8,8 % и в варианте опыта со спорообразующими аммонификаторами на 9,8 % по сравнению с контрольным образцом.



Планки погрешностей указывают доверительные интервалы с α = 0,05.
Значимые отличия от контроля отмечены звездочками (*p < 0,05)
Варианты опыта: контроль (К), амилолитические (3), спорообразующие аммонификаторы (7), ЕМ-1 (ЕМ)
Error bars indicate confidence intervals with α = 0.05.
Significant differences from the control are marked with asterisks (*p < 0.05)
Experiment options: control (K), amylolytic (3), spore-forming ammonifiers (7), EM-1 (EM)

Рис. 4. Содержание легкодоступного Ca в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Fig. 4. The concentration of readily available Ca in samples of soddy-podzolic sandy loam soil

В табл. 5 представлены данные о содержании стабильных изотопов ^{133}Cs и ^{88}Sr в вегетационном эксперименте с внесением различных эколого-трофических групп микроорганизмов в дерново-подзолистую супесчаную почву.

Таблица 5

Содержание Cs и Sr в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Table 5

Concentration of Cs and Sr in the samples of soddy-podzolic soil

Варианты опыта	Cs		Sr	
	Водорастворимая форма, мкг/кг	Ионообменная форма, мкг/кг	Водорастворимая форма, мкг/кг	Ионообменная форма, мкг/кг
Контроль	0,4 ± 0,1	59,4 ± 5,3	9428 ± 1959,4	59595,5 ± 3730,6
Амилолитические	0,4 ± 0,1	55,5 ± 4,7	10117,2 ± 1519,2	60272,5 ± 3296,7
Спорообразующие аммонификаторы	0,5 ± 0,1	51,8 ± 7,9*	8815,8 ± 1087,6	56004,6 ± 7636,5
ЕМ-1	0,2 ± 0,1*	53,0 ± 1,0**	4698,9 ± 581,6**	48963,4 ± 694,9**

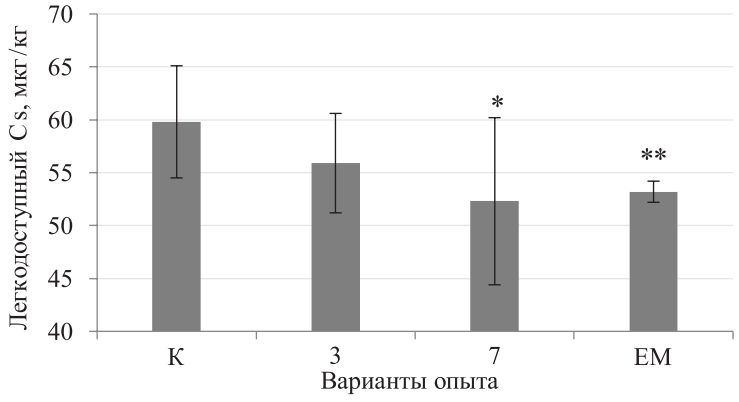
Примечание. Различия достоверны по отношению к контролю *p < 0,05; **p < 0,01.

Снижение содержания Cs в водорастворимой форме отмечали в варианте опыта ЕМ-1 – на 42,8 %, при этом наблюдаемые различия являются достоверными. Сходный эффект установлен и в отношении радиоактивного изотопа ^{137}Cs при внесении в дерново-подзолистую супесчаную почву данного консорциума микроорганизмов. В ионообменной форме отмечали снижение количества Cs при внесении спорообразующих аммонификаторов – на 12,7 %, ЕМ-1 – на 10,8 %.

На рис. 5 показано влияние исследуемых эколого-трофических групп микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный) Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве.

Во всех опытных вариантах отмечали снижение содержания легкодоступного Cs: амилолитические микроорганизмы – на 6,5 %, спорообразующие аммонификаторы – на 12,6, ЕМ – на 11,0 %.

На уменьшение содержания Sr в водорастворимой форме оказали влияние спорообразующие аммонификаторы – на 6,5 % и микробиологический препарат ЕМ-1 – на 50,2 %. Амилолитические же микроорганизмы способствовали увеличению концентрации данного микроэлемента в водорастворимой форме на 7,3 % относительно контрольного варианта опыта. Аналогичное действие оказали исследуемые группы и на содержание данного микроэлемента в ионообменной форме: спорообразующие аммонификаторы и микробиологический препарат ЕМ-1 повлияли на уменьшение содержания Sr – на 6,0 и 17,8 % соответственно. Статистически значимые различия наблюдались только в варианте опыта при внесении ЕМ-1 как в водорастворимой форме, так и в ионообменной.

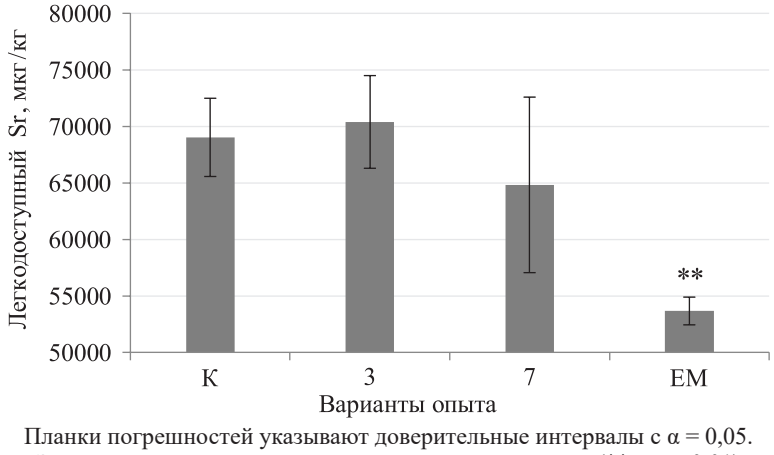


Планки погрешностей указывают доверительные интервалы с α = 0,05.
Значимые отличия от контроля отмечены звездочками (* – $p < 0{,}05$; ** – $p < 0{,}01$)
Варианты опыта: контроль (К), амилолитические (3), спорообразующие аммонификаторы (7), ЕМ-1 (ЕМ)
Error bars indicate confidence intervals with α = 0.05.
Significant differences from the control are marked with asterisks (* – $p < 0.05$; ** – $p < 0.01$)
Experiment options: control (K), amylolytic (3), spore-forming ammonifiers (7), EM-1 (EM)

Рис. 5. Содержание легкодоступного Cs в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Fig. 5. The concentration of readily available Cs in samples of soddy-podzolic sandy loam soil

На рис. 6 показано влияние исследуемых эколого-трофических групп микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный) Sr в дерново-подзолистой супесчаной почве.



Планки погрешностей указывают доверительные интервалы с α = 0,05.
Значимые отличия от контроля отмечены звездочками (** – $p < 0{,}01$)
Варианты опыта: контроль (К), амилолитические (3), спорообразующие аммонификаторы (7), ЕМ-1 (ЕМ)
Error bars indicate confidence intervals with α = 0.05.
Significant differences from the control are marked with asterisks (** – $p < 0.01$)
Experiment options: control (K), amylolytic (3), spore-forming ammonifiers (7), EM-1 (EM)

Рис. 6. Содержание легкодоступного Sr в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Fig. 6. The concentration of readily available Sr in samples of soddy-podzolic sandy loam soil

Наибольшему снижению содержания легкодоступного Sr способствовал консорциум микроорганизмов микробиологического препарата ЕМ-1 – на 22,3 % по сравнению с контрольным вариантом опыта.

Заключение

Исследовано влияние основных эколого-трофических групп микроорганизмов на биологическую доступность ^{137}Cs для корневого поглощения растениями, а также содержание в биодоступных формах некоторых макро- и микроэлементов в дерново-подзолистой супесчаной почве.

В вегетационном эксперименте внесение в дерново-подзолистую супесчаную почву амилолитических бактерий и спорообразующих аммонификаторов усиливает транслокацию ^{137}Cs из подземных органов овса в надземные в 1,8–4,3 раза. При этом содержание радионуклида в корнях овса даже уменьшается на

29,5 % при внесении в почву спорообразующих аммонификаторов. Внесение в дерново-подзолистую супесчаную почву консорциума микроорганизмов ЕМ-1 снизило накопление ^{137}Cs в надземных органах овса на 71,8 %, при сохранении уровня содержания радионуклида в корневой системе.

В экспериментальной системе, включающей дерново-подзолистую супесчаную почву, растения овса посевного и такие группы микроорганизмов, как амилолитические микроорганизмы или спорообразующие аммонификаторы, происходит существенное возрастание содержания ^{137}Cs в водорастворимой форме в 1,5 и 3,5 раза соответственно, что может объяснить увеличение накопления радионуклида в надземных органах растения. Внесение в дерново-подзолистую почву консорциума микроорганизмов ЕМ-1 снизило содержание ^{137}Cs в водорастворимой форме на 32,6 %. Аналогичные по направленности изменения наблюдаются и в отношении водорастворимой формы К: амилолитические микроорганизмы и спорообразующие аммонификаторы увеличивают данный показатель на 49,9 и 67,5 % соответственно, а микробиологический препарат ЕМ-1 снижает на 52,9 %.

Полученные результаты показывают возможность регулирования поведения ^{137}Cs в системе «почва – растение» за счет воздействия на состав почвенного микробиома. Они могут служить основой для разработки новых приемов фиторемедиации почв, загрязненных долгоживущими продуктами деления урана, а также должны учитываться при ведении растениеводства на загрязненных техногенными радионуклидами территориях.

Библиографические ссылки

1. Zhang P, Brady PV, editors. Geochemistry of Soil Radionuclides. Madison: [publisher unknown]; 2002. 263 p.
2. Паренюк ЕЮ, Шаванова ЕЕ, Ильенко ВВ, и др. Влияние почвенной микрофлоры на переход ^{137}Cs в растения. *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2015;55(1):51–56.
3. Никитина ЗИ. *Микробиологический мониторинг наземных экосистем*. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение; 1991. 222 с.
4. Панов АВ, Фесенко СВ, Санжарова НИ, Алексахин РМ. Реабилитация зон локальных радиоактивных загрязнений. *Атомная энергия.* 2006;100(2):125–134.
5. Танкевич ЕА, Никитин АН, Концевая ИИ, Симончик ЮК. Значение основных физиологических групп микроорганизмов в изменении физико-химических форм техногенных радионуклидов в дерново-подзолистой почве зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;1:4–11.
6. *Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам.* Москва: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России; 2004. 91 с.
7. Ure AM, Davidson CM. Chemical speciation in the environment. Second edition. Malden, MA: Wiley-Blackwell; 2002. 452 p.
8. Hou X. Iodine-129 and caesium-137 in chernobyl contaminated soil and their chemical fractionation. *Science of The Total Environment*. 2003;308(1–3):97–109.
9. Возняковская ЮМ. *Основные микробиологические и биохимические методы исследования почв.* Ленинград: ВНИИСХМ; 1987. 47 с.
10. Теппер ЕЗ. *Практикум по микробиологии.* Москва: Агропромиздат; 1987. 239 с.

References

1. Zhang P, Brady PV, editors. Geochemistry of Soil Radionuclides. Madison: [publisher unknown]; 2002. 263 p.
2. Parenyuk EYu, Shavanova EE, Il'enko VV, et al. *Vliyanie pochvennoi mikroflory na perekhod ^{137}Cs v rasteniya* [Influence of soil microflora on the transfer of ^{137}Cs to plants]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology]. 2015;55(1):51–56. Russian.
3. Nikitina ZI. *Mikrobiologicheskii monitoring nazemnykh ekosistem* [Microbiological monitoring of terrestrial ecosystems]. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoje otdelenie; 1991. 222 p. Russian.
4. Panov ÀV, Fesenko SV, Sanzharova NI, Aleksakhin RM. *Reabilitatsiya zon lokal'nykh radioaktivnykh zagryaznenii* [Rehabilitation of areas of local radioactive contamination]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 2006;100(2):125–134. Russian.
5. Tankevich EA, Nikitin AN, Kontsevaya II, Simonchik YuK. *Znachenie osnovnykh fiziologicheskikh grupp mikroorganizmov v izmenenii fiziko-khimicheskikh form tekhnogennykh radionuklidov v dernovo-podzolistoi pochve zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [The significance of the main physiological groups of microorganisms in changes in the physicochemical forms of technogenic radionuclides in the soddy-podzolic soil of the Chernobyl Nuclear Power Plant exclusion zone]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya* [Journal of the Belarusian State University. Ecology]. 2024;1:4–11. Russian.
6. *Opredelenie chuvstvitel'nosti mikroorganizmov k antibakterial'nym preparatam* [Determination of the sensitivity of microorganisms to antibacterial drugs]. Moscow: Federal'nyi tsentr gossanepidnadzora Minzdrava Rossii; 2004. 91 p. Russian.
7. Ure AM, Davidson CM. Chemical speciation in the environment. Second edition. Malden, MA: Wiley-Blackwell; 2002. 452 p.
8. Hou X. Iodine-129 and caesium-137 in chernobyl contaminated soil and their chemical fractionation. *Science of The Total Environment*. 2003;308(1–3):97–109.
9. Voznyakovskaya YuM. *Osnovnye mikrobiologicheskie i biokhimicheskie metody issledovaniya pochv* [Basic microbiological and biochemical methods of soil research]. Leningrad: VNIISHM, 1987. 47 p. Russian.
10. Tepper EZ. *Praktikum po mikrobiologii* [Microbiology Workshop]. Moscow: Agropromizdat; 1987. 239 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 11.04.2024.
Received by editorial board 11.04.2024.

УДК 574.2:539.16.04

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ^{137}CS РАСТЕНИЯМИ ТРАВЯНИСТЫХ СООБЩЕСТВ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС НА ЭТАПЕ ОТДАЛЕННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ

А. Н. НИКИТИН[1), 2)], ***О. А. ШУРАНКОВА***[1)], ***С. А. КАЛИНИЧЕНКО***[3)], ***Е. В. МИЩЕНКО***[1)], ***Г. А. ЛЕФЕРД***[1)]

[1)]*Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси,*
ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Беларусь
[2)]*Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси,*
ул. Академика В. Ф. Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь
[3)]*Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,*
ул. Терешковой, 7, 247618, Хойники, Гомельская обл., Беларусь

Радиоактивные изотопы Cs в значительной степени определяют тяжесть радиационных аварий с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду. Поэтому актуальным является выявление закономерностей их поведения в различных экосистемах, переход по пищевым цепям, а также поиск эффективных методов воздействия на эти процессы. Цель исследования – поиск закономерностей накопления ^{137}Cs травянистыми растениями естественных экосистем на этапе отдаленных последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Работы проводились на трех экспериментальных полигонах, расположенных на расстоянии 13–16 км от эпицентра аварии. На каждом полигоне заложены пробные площадки, на которых изучена характеристика растительного покрова и почвы. Для подтверждения влияния режима увлажнения на накопление ^{137}Cs растениями также был поставлен микровегетационный опыт. Анализ результатов наблюдений в травянистых экосистемах не позволил выявить непосредственную связь между показателями валового загрязнения почвы ^{137}Cs, содержанием его растворимой, ионообменной и лабильной форм нахождения в почве с накоплением радионуклида надземными частями *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth, *Poa pratensis* L. и *Carex brizoides* L. Среди комплекса эдафических факторов наиболее тесную связь с удельной активностью ^{137}Cs в надземных частях злаковых растений имеют объемная доля воды в почве, содержание в ней подвижного K_2O и лабильной, извлекаемой тетрафенилборатом, формы радионуклида. Обратный экспоненциальный характер связи этих параметров с накоплением ^{137}Cs опосредован K-зависимыми механизмами поглощения Cs и снижением эффективной диффузии K из почвенного раствора к поверхности корня при уменьшении влажности почвы. Для *Carex brizoides* K-зависимый механизм регуляции корневого поглощения Cs не подтвержден. Эксперимент в контролируемых условиях подтвердил существенное увеличение накопления ^{137}Cs злаковыми растениями при снижении влагообеспеченности, обусловленное активацией переносчиков K с высокой аффинностью как к этому элементу, так и к Cs.

Образец цитирования:
Никитин АН, Шуранкова ОА, Калиниченко СА, Мищенко ЕВ, Леферд ГА. Особенности накопления ^{137}Cs растениями травянистых сообществ в ближней зоне Чернобыльской АЭС на этапе отдаленных последствий радиационной аварии. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;2:57–67.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-57-67

For citation:
Nikitin AN, Shurankova OA, Kalinichenko SA, Mishchanka EV, Leferd GA. Patterns of ^{137}Cs accumulation in herbaceous plant communities near the Chernobyl nuclear power plant in the aftermath of the accident. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;2:57–67. Russian.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-57-67

Авторы:
Александр Николаевич Никитин – кандидат сельскохозяйственных наук; заместитель директора по научной работе.
Ольга Александровна Шуранкова – научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.
Сергей Александрович Калиниченко – кандидат биологических наук, доцент; заведующий лабораторией спектрометрии и радиохимии.
Мищенко Егор Викторович – заведующий лабораторией радиоэкологии.
Леферд Галина Аркадьевна – научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.

Authors:
Aleksander N. Nikitin, PhD (agriculture); deputy director for research.
nikitinale@gmail.com
Olga A. Shurankova, researcher at the laboratory of radioecology.
shurankova@list.ru
Sergey A. Kalinichenko, PhD (biology), docent; head of the laboratory of spectrometry and radiochemistry.
s-a-k@list.ru
Egor V. Mishchanka, head of the laboratory of radioecology.
egormischenko@gmail.com
Galina A. Leferd, researcher at the laboratory of radioecology.
ikantsavaya@mail.ru

Ключевые слова: цезий-137; почва; влажность почвы; формы нахождения радионуклида; калий; злак; осока.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований «Природопользование и экология» на 2016–2020 годы.

PATTERNS OF ^{137}CS ACCUMULATION IN HERBACEOUS PLANT COMMUNITIES NEAR THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT IN THE AFTERMATH OF THE ACCIDENT

A. N. NIKITIN[a,b], ***O. A. SHURANKOVA***[a], ***S. A. KALINICHENKO***[c], ***E. V. MISHCHANKA***[a], ***G. A. LEFERD***[a]

[a]*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus,*
4 Fiadzyuninskaga Street, Gomel 246007, Belarus
[b]*Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus,*
2 Academician V. F. Kupreviča Street, Minsk 220084, Belarus
[c]*Polessie State Radioecological Reserve,*
7 Tserashkovai Street, Khoiniki 247618, Gomel region, Belarus
Corresponding author: A. N. Nikitin (nikitinale@gmail.com)

Radioactive cesium isotopes often significantly determine the severity of nuclear accidents with the release of radioactive substances into the environment. Therefore, identifying the patterns of their behavior in various ecosystems, their transfer in food chains, and design effective methods for regulation of these processes are of current interest. The aim of this work was to find the patterns of ^{137}Cs accumulation by herbaceous plants in natural ecosystems at the stage of the remote consequences of the Chernobyl NPP disaster. Three experimental sites were selected at a distance of 13–16 km from the accident epicenter. At each site, sample plots were established to study the characteristics of the vegetation cover and soil. To confirm the impact of the moisture regime on the accumulation of ^{137}Cs by plants, a vegetation experiment was also conducted. The analysis did not reveal a direct link between the gross soil contamination indicators with ^{137}Cs, its soluble, ion-exchange, and labile forms in the soil with the accumulation of the radionuclide by the above-ground parts of *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth, *Poa pratensis* L. and *Carex brizoides* L. Among the complex of edaphic factors, the closest relationship with the specific activity of ^{137}Cs in the aboveground parts of cereal plants is associated with the volumetric water content in the soil, the content of mobile K_2O, and the labile form of the radionuclide extractable with tetraphenylborate. The inverse exponential character of the relationship between these parameters and the accumulation of ^{137}Cs is mediated by K-dependent mechanisms of Cs absorption and a decrease in the effective diffusion of K from the soil solution to the root surface as soil moisture decreases. For the sedge, the K-dependent mechanism of regulating the root absorption of Cs was not confirmed.

An experiment under controlled conditions confirmed a significant increase in the accumulation of ^{137}Cs by grass plants with a decrease in moisture availability, caused by the activation of K transporters with high affinity for both this element and Cs.

Keywords: cesium-137; soil; soil moisture; radionuclide speciation; potassium; cereal plants; sedge

Acknowledgments. This work was supported by the State Program of Scientific Research «Environmental Management and Ecology» for 2016–2020.

Введение

Радиоактивные изотопы Cs (^{134}Cs, ^{135}Cs, ^{137}Cs) имеют техногенное происхождение и могут попадать в окружающую среду при штатном функционировании и аварийных ситуациях на объектах ядерного топливного цикла, а также при испытаниях ядерного оружия. ^{137}Cs [1] часто становится основным дозообразующим радионуклидом для человека и биоты на протяжении продолжительного периода отдаленных последствий радиационных аварий. В наземных экосистемах он сосредотачивается преимущественно в почве, откуда может поступать в пищевые цепи, ведущие к человеку. Одной из наиболее эффективных мер снижения доз внутреннего облучения населения от ^{137}Cs является ограничение его перехода в системе «почва – растение» [2].

Для разработки и эффективного применения мер радиационной защиты необходима информация о влиянии различных факторов на поведении RCs в системе «почва – растение». Поэтому естественно, что большое внимание исследователей уделяется этому вопросу [3–10]. Было установлено, что далеко не весь запас RCs в почве доступен для корневого поглощения, поскольку он поступает в растения преимущественно из почвенного раствора [11; 12]. Соотношение между сорбцией Cs в твердой фазе и концентрацией его

в почвенном растворе выражается коэффициентом распределения, составляющим порядка 10^1–10^5 [13], и постепенно увеличивающимся со временем после попадания радионуклидов в почву. В твердой фазе почвы Cs также может находится в различных состояниях: в почвенном поглощающем комплексе, на участках селективной сорбции (FES) и на участках высокоселективной сорбции [14; 15]. С течением времени происходит перераспределение RCs между этими формами, приводящее к снижению его биологической доступности («закреплению»). Важную роль в этих процессах играют такие факторы, как содержание в почве глинистых минералов, качественные и количественные характеристики органического вещества почвы, pH, концентрация K^+ и NH_4^+ в почвенном растворе [6; 16]. В случае выпадений RCs в составе топливных частиц, следует также учитывать динамику их распада и выхода RCs из их состава [14].

Гидратированные ионы Cs^+ близки по своим характеристикам к гидратированным ионам K^+ и могут проходить через каналы и некоторые трансмембранные переносчики последнего, поэтому метаболизм калия у растений влияет на поглощение ионов Cs и их перераспредление по органам и тканям [11; 12; 17].

В связи с особенностями поведения в почве и корневого поглощения RCs, зависимость их накопления в растениях от факторов окружающей среды имеет сложный характер, изменяющийся во времени. Вместе с тем выявление данных закономерностей важно для оценки и прогноза радиоэкологических последствий аварий с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду и эффективного применения мер радиационной защиты.

Было подобрано три экспериментальных полигона. На каждом из них заложены пробные площадки, на которых изучена характеристика растительного покрова и почвы. Для подтверждения влияния режима увлажнения на накопление ^{137}Cs растениями был поставлен микровегетационный опыт. Собранный набор данных послужил основой для анализа зависимости накопления ^{137}Cs надземными частями растений от эдафических факторов и форм нахождения радионуклида в почве.

Результаты выполненного анализа раскрывают видоспецифическую реакцию накопления RCs надземными частями растений на действие таких факторов, как обеспеченность K, влагообеспеченность, содержание обменных Ca, Mg в почве, содержание органического вещества, доля глинистой фракции.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные полигоны. Для проведения исследования было заложено три экспериментальные полигона (ЛП-1, ЛП-2 и ЛП-3) в естественных экосистемах суходольных лугов, расположенных на расстоянии 13–16 км от четвертого энергоблока Чернобыльской атомной электростанции, в окрестностях бывшей деревни Масаны. Почва на всех экспериментальных участках дерново-подзолистая супесчаная. На каждом экспериментальном полигоне было выделено 20 пробных площадок 2×2 м. Полевые исследования проводились весной–летом 2020 г., непосредственно отбор образцов растений и почвы осуществлялся в июне.

Среднее проективное покрытие растительного покрова на экспериментальных полигонах составляло 100 %, 75 и 60 % на ЛП-1, ЛП-2 и ЛП-3 соответственно. Для выявления закономерностей накопления ^{137}Cs были выбраны наиболее распространенные на полигонах виды растений: пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), вейник наземный (*Calamagrostis epigejos* (L.) Roth), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.) и осока трясунковидная (*Carex brizoides* L.). Кроме этих видов, растительность на экспериментальных полигонах была представлена *Agrostis canina* L., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, *Deschapsia cespitosa* (L.) Beauv., *Corynephorus canescens* (L.) P. Beauv, *Trifolium hybridum* L., *Artemisia vulgaris* L., *Polygonum orientale* L., *Rumex acetosa* L., *Asarum europaeum* L., *Melandrium album* (Mill.) Garcke, *Viola arvensis* Murr., *Ranunculus acris* L., *Lupinus polyphyllus* Lindl., *Veronica chamaedrys* L., *Equisetum arvense* L. и других травянистых растений. В состав очень разреженного древесного яруса входят такие виды, как береза повислая (*Betula pendula* Roth), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.).

Микровегетационный опыт. В качестве модельного растения использована пшеница яровая. Растения выращивались в контейнерах объемом 1 л, наполненных почвой, отобранной в частном подворье на территории бывшего населенного пункта Борщевка. Почва характеризовалась очень высоким содержанием органического вещества (4,27–6,33 %) и нейтральной кислотностью (6,6–6,7). Содержание подвижного фосфора (P_2O_5) очень высокое (1552–3245 мг/кг), подвижного калия (K_2O) – высокое (224–372 мг/кг). Содержание обменного магния и кальция повышенное. Почва характеризуется средними значениями гидролитической кислотности (0,89–1,20 мМ/100 г), емкости поглощения (41,2–68,9 мМ/100 г), степени насыщенности основаниями (97,1–98,7 %) и суммой поглощенных оснований (40,0–69,2 мМ/100 г).

Для исследования влияния режима увлажнения в опыте было предусмотрено 3 варианта: 1) оптимальное увлажнение – выращивание растений при влажности почвы 70 % от полной влагоемкости (ПВ); 2) пониженная влагообеспеченность – выращивание растений при влажности почвы 40 % от ПВ; 3) переменное увлажнение – выращивание растений при влажности почвы 40 % от ПВ в первые

21 сутки и последующее доведение влажности до 70 % от ПВ. Опыт выполнялся в 4-кратной повторности в фитокомнате с постоянной температурой воздуха 18 °C и освещением на протяжении 18 ч в сутки с ФАР 100 мМ·$с^{-1}$·$м^{-2}$. Влажность почвы контролировалась весовым методом.

Отбор образцов и измерения. Образцы почвы на пробных площадках отбирались стандартным пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см. С каждого пробного участка отбиралось по пять проб методом конверта, которые смешивались в одну и упаковывались в полиэтиленовые пакеты. Одновременно с почвой отбирались образцы надземных частей выбранных видов растений путем срезания секатором на высоте 3 см от поверхности почвы. В микровегетационном опыте растения срезались на высоте 0,5–1 см, почва для анализа отбиралась из каждого сосуда. Образцы растений упаковывались в полиэтиленовые пакеты.

Пробы растений и почвы взвешивались на электронных весах в день отбора проб (сырая масса) и после высушивания при комнатной температуре (воздушно-сухая масса). Содержание влаги в почве и растительных пробах рассчитывалось по разнице между сырой и воздушной массой. Высушенные пробы почвы просеивались через 2-милиметровое сито и перемешивались.

Удельная активность ^{137}Cs определялась с использованием гамма-спектрометра *Canberra Packard* с *Ge детектором GX2018*. Относительная ошибка измерений составляла 5–10 %. Стандартными методами в образцах почвы определялись такие показатели, как содержание глины в механическом составе; pH (в KCl); содержание обменного NH_4^+; содержание органического вещества; содержание подвижных P_2O_5 и K_2O; содержание ионообменных калия, кальция, магния, цезия (смеси изотопов и ^{137}Cs); содержание растворимых калия, кальция, магния, цезия (смеси изотопов и ^{137}Cs); содержание лабильных (извлекаемых тетрафенилборатом натрия при экспозиции 24 ч) калия и цезия (смеси изотопов и ^{137}Cs); объемная доля воды в почве.

Анализ данных. Анализ данных и представление результатов осуществлялись с помощью библиотеки *Python Pandas, Geopandas, numpy, Sklearn, Pyplot* и *Seaborn.* При описании исследуемых показателей находили среднеарифметическое значение, среднеквадратичное отклонение, медиану, межквартильный размах. Оценку связи между показателями определяли по коэффициентам ранговой корреляции Спирмена (R_S). Для анализа влияния отдельных факторов на накопление радионуклида растениями использовали критерий Краскела – Уоллиса (H), а значимость различий между вариантами опыта устанавливали по *t*-критерию Стьюдента. Выявленные связи и различия между показателями считали значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Характер загрязнения экспериментальных полигонов ^{137}Cs. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs (ПЗ) на пробных площадках варьирует в широких пределах: от 980 до 5327 кБк/$м^2$ со средним значением 2973 кБк/$м^2$. В пределах экспериментальных полигонов загрязнение ^{137}Cs характеризуется высоким уровнем мозаичности. Объяснением этому является существенный вклад топливных частиц, выпадения которых носили дискретный вероятностный характер, в отличие от более равномерного выпадения конденсационной компоненты загрязнения [18]. Различия в средних показателях ПЗ ^{137}Cs между исследовательскими полигонами не проявляются.

Содержание ^{137}Cs в водорастворимой форме в почве пробных площадок не превышает 0,55 % от валового запаса. В ионообменной форме находится 1,9–15,5 % валового запаса радионуклида. Извлекаемые тетрафенилборатом Cs и K обычно обозначают как лабильные формы и рассматривают их в качестве показателя запаса, доступного для активного корневого поглощения на протяжении вегетационного периода [19–21]. Спустя 35 лет после аварии на Чернобыльской АЭС в ближней зоне загрязнения содержание данной формы радионуклида в почве составляет от 6,7 до 83,8 % от валового запаса со средним значением 41,6 % и межквартильным размахом 32,8–48,4 %.

Различия в содержании водорастворимой и ионообменной форм ^{137}Cs между экспериментальными полигонами не выражены на фоне сильной вариабельности этих показателей (рис. 1). Содержание лабильной формы ^{137}Cs в почве экспериментального полигона ЛП-1 (наиболее близко расположенного к 4 энергоблоку Чернобыльской АЭС) имеет существенно более высокий размах и медианное значение по сравнению с ЛП-2 и ЛП-3.

Накопление ^{137}Cs растениями на экспериментальных полигонах. Удельная активность ^{137}Cs в надземных органах исследуемых видов травянистых растений на пробных площадках составляла от 130 до 2294 Бк/кг (рис. 2). Средние значения данного показателя составляют 997,1, 735,3, 691,6 и 469,8 для осоки трясунковидной, мятлика лугового, пырея ползучего и вейника наземного соответственно. Результаты анализа с использованием критерия Краскела – Уоллиса свидетельствуют, что в накоплении ^{137}Cs видами растений отсутствуют значимые различия между экспериментальными полигонами (H = 0,43–5,98; p = 0,050–0,513).

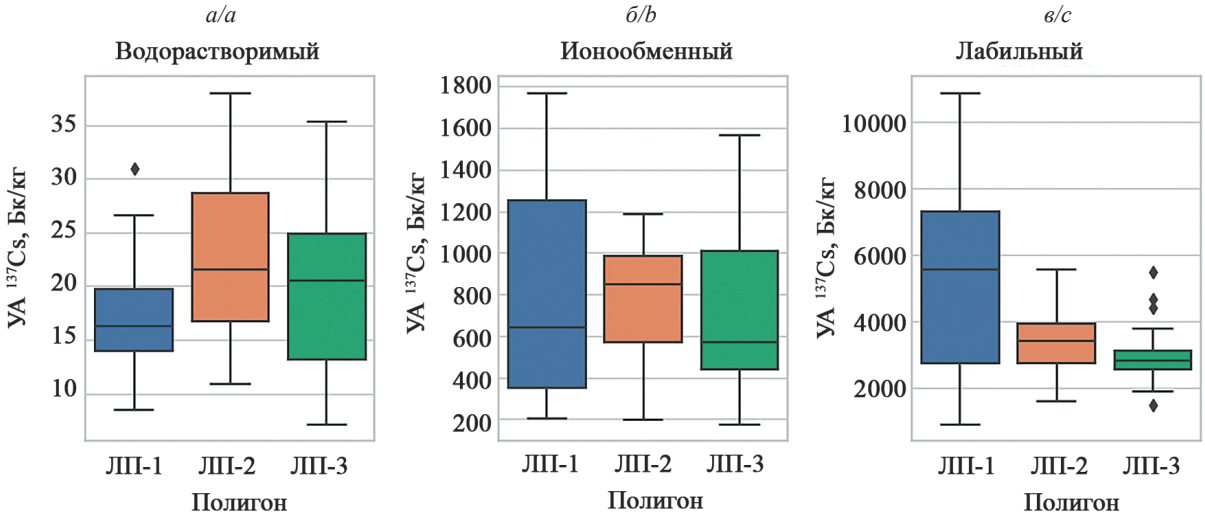


Рис. 1. Оценка содержания ^{137}Cs в биодоступных формах в почве экспериментальных полигонов

Fig. 1. Speciation of ^{137}Cs by bio-available forms in soils of experimental polygons

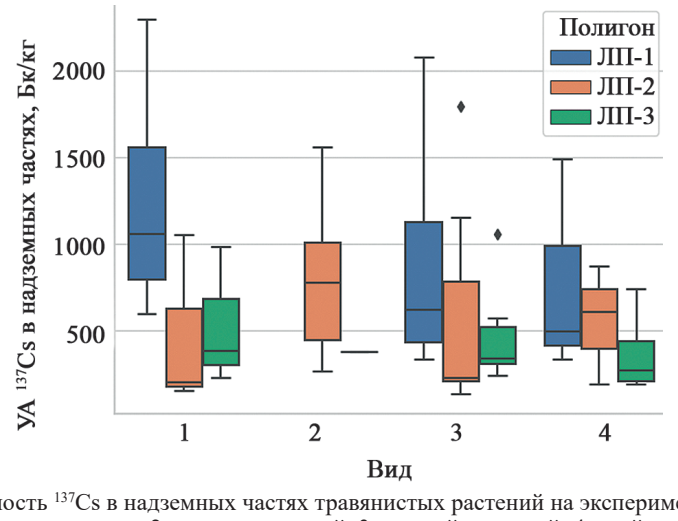


Рис. 2. Удельная активность ^{137}Cs в надземных частях травянистых растений на экспериментальных полигонах: 1 – осока трясунковидная; 2 – мятлик луговой; 3 – пырей ползучий; 4 – вейник наземный

Fig. 2. Activity concentration of ^{137}Cs in aboveground parts of the herbaceous plants on the experimental polygons: 1 – *C. Brizoides*; 2 – *P. pratensis;* 3 – *E. repens;* 4 – *C. epigejos*

Анализ с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена (табл.) показал, что накопление ^{137}Cs в надземных органах осоки трясунковидной имеет положительную связь высокой и средней силы с концентрацией в почве обменных кальция, магния и аммония, подвижного фосфора, а также с содержанием гумуса и емкостью поглощения. Увеличение доли глинистых частиц в механическом составе почвы сопровождается снижением накопления ^{137}Cs в надземных частях осоки трясунковидной.

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена удельной активности ^{137}Cs в надземных частях видов травянистых растений с показателями загрязнения, свойствами почвы и некоторыми другими факторами

Spearman's Rank correlation coefficients of activity concentration of ^{137}Cs in aboveground parts of the herbaceous plants with indexes of contamination, soil properties, and other factors

	Осока трясунковидная	Пырей ползучий	Вейник наземный	Мятлик луговой
ПЗ ^{137}Cs, кБк/м^2	−0,090	0,021	0,056	0,190
A_y ^{137}Cs почвы, Бк/кг	0,168	0,098	0,062	−0,048
Расстояние до ЧАС, км	−0,450	−0,456*	−0,247	0,619

Окончание табл.

Ending table

	Осока трясунковидная	Пырей ползучий	Вейник наземный	Мятлик луговой
Растворимый ^{137}Cs, Бк/кг	−0,106	−0,219	0,124	0,524
Ионообменный ^{137}Cs, Бк/кг	0,071	−0,012	0,206	0,524
Лабильный ^{137}Cs, Бк/кг	0,387	0,215	0,112	0,071
pH солевой вытяжки	0,201	0,206	0,209	0,071
Ca обменный, ммоль/100г	0,661**	0,272	0,074	−0,429
Mg обменный, ммоль/100г	0,669**	−0,055	−0,316	−0,916**
P_2O_5 подвижный, мг/кг	0,657**	0,267	0,056	0,167
K_2O подвижный, мг/кг	−0,018	−0,213	−0,610*	−0,922**
NH_4^+ обменный, мг/кг	0,620**	0,043	−0,547*	−0,667
Гумус, %	0,636**	0,048	−0,350	−0,683
Емкость поглощения, мг/100 г	0,707**	0,142	−0,150	0,024
Степень насыщенности основаниями, %	0,352	0,178	0,001	0,071
Доля глинистых частиц	−0,568*	−0,365	−0,395	−0,247
Объемная доля воды	−0,084	−0,585**	−0,709**	−0,905**
Содержание K в растении, %	−0,094	−0,077	−0,350	0,098
Содержание воды в растении, %	0,209	0,207	0,182	0,119

Примечания. * – различия между вариантами достоверны на уроне значимости 0,05, ** – различия между вариантами достоверны на уровне значимости 0,01.

При объяснении наблюдаемых корреляций надо принять во внимание, что аммоний вытесняет Cs из участков сорбции высокой специфичности [22], Ca^{2+} и Mg^{2+} вытесняют данный элемент из почвенного поглощающего комплекса [6]. Органическое вещество почвы затрудняет фиксацию ^{137}Cs в почве [16]. Уменьшение доли глинистых частиц в механическом составе почвы снижает емкость специфической и неспецифической сорбции Cs. Совокупность выявленных взаимосвязей дает основание предположить, что основное влияние на накопление ^{137}Cs осокой трясунковидной оказывает содержание $^{137}Cs^+$ в почвенном растворе.

В отношении всех злаковых растений характерно падение удельной активности ^{137}Cs в надземных частях с ростом содержания воды в почве (на момент отбора образцов). В отношении мятлика лугового выявлены отрицательные корреляционные связи очень высокой силы между накоплением радионуклида и содержанием подвижного калия и магния в почве. Для вейника наземного установлена отрицательная корреляционная связь средней силы между накоплением радионуклида и подвижным калием.

Результаты настоящих наблюдений не позволили обнаружить существенную связь удельной активности ^{137}Cs в надземных частях исследованных видов растений с валовыми показателями загрязнения почвы данным радионуклидом и с содержанием его биодоступных форм. Выполненный анализ свидетельствует, что для осоки не характерен K-зависимый механизм регуляции корневого поступления радиоактивных изотопов цезия, тогда как для злаков данный механизм маскируется влиянием влажности почвы. Согласно [23], снижение влажности почвы приводит к дефициту K^+ в ризосфере за счет снижения скорости диффузии элемента в почве. Поэтому механизм усиления накопления ^{137}Cs при дефиците влаги в почве может быть аналогичен механизму, ответственному за усиление накопления радионуклида при дефиците калия.

Для оценки совместного влияния влажности почвы (объемная доля) и содержания в ней калия (подвижный K_2O, мг/кг) мы допустили возможность использования произведения этих двух показателей в качестве параметра для прогноза накопления ^{137}Cs в надземных органах злаковых растений. Результаты показали, что данный параметр имеет более тесную экспоненциальную связь с накоплением радионуклида растениями (рис. 3, *б*), чем содержание в почве подвижного калия (рис. 3, *а*). Среди всех показателей загрязнения почвы ^{137}Cs, наибольшего улучшения модели удалось достичь за счет включения в нее содержания радионуклида в лабильной (извлекаемой тетрафенилборатом натрия) форме (рис. 3, *в*).

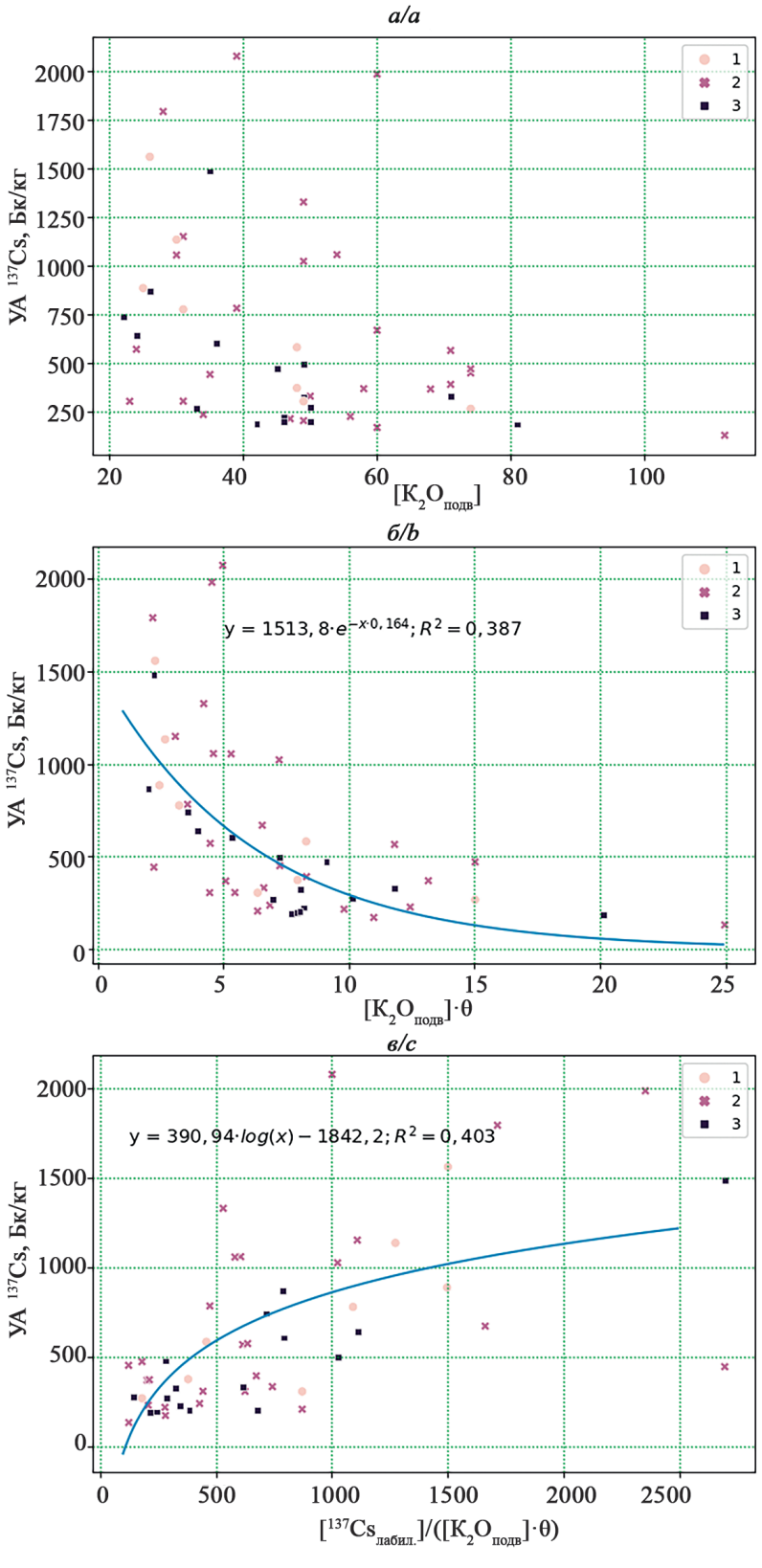


Рис. 3. Зависимость удельной активности ^{137}Cs в надземных органах злаковых растений от подвижного калия (*а*), произведения содержания подвижного калия и объемной доли воды в почве (*б*), отношения концентрации лабильной формы ^{137}Cs к произведению содержания подвижного калия и объемной доли воды в почве (*в*):
1 – мятлик луговой; 2 – пырей ползучий; 3 – вейник наземный

Fig. 3. Dependence of ^{137}Cs activity concentration in aboverground parts of cereal plants on mobile potassium (*a*), product of mobile potassium and volumetric soil moisture (*b*), and ratio of labil ^{137}Cs to product of mobile potassium and volumetric soil moisture (*c*):
1 – *P. pratensis*; 2 – *E. repens*; 3 – *C. epigejos*

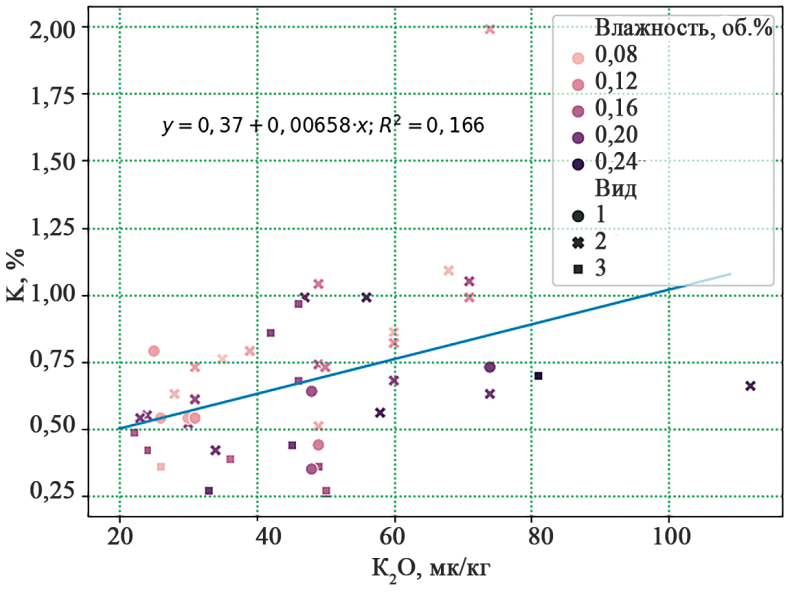


Рис. 4. Зависимость содержания калия в надземных органах злаковых растений от содержания подвижного калия и влаги в почве: 1 – мятлик луговой; 2 – пырей ползучий; 3 – вейник наземный

Fig. 4. Dependence of potassium concentration in aboveground parts of cereal plants on mobile potassium and soil moisture: 1 – *P. pratensis*; 2 – *E. repens*; 3 – *C. epigejos*

Мятлик луговой и вейник наземный имеют единообразную связь между накоплением радионуклида и анализируемыми параметрами. Реакция пырея ползучего несколько другая, что связано с его более высокой потребностью в калии (средняя концентрация элемента в надземных органах данного вида равняется 0,79 %, у вейника наземного и мятлика лугового – 0,50 и 0,57 % соответственно).

Анализ полученных данных не выявил зависимость накопления K надземными органами растений от влажности почвы. Вместе с тем проявляется тенденция к увеличению концентрации данного макроэлемента в растениях от его содержания в почве (рис. 4). При этом положительные отклонения от линии тренда более характерны для площадок с более низкой влажностью. Данный результат указывает на сходное с ^{137}Cs совместное влияние содержания подвижного калия и воды в почве на накопление K надземными органами злаковых растений.

Накопление ^{137}Cs и K пшеницей яровой при различной влажности почвы в микровегетационном опыте. Для подтверждения роли режима увлажнения почвы в изменении накопления ^{137}Cs злаковыми растениями был заложен микровегетационный опыт. При оптимальном режиме увлажнения (70 % от ПВ) накопление ^{137}Cs в надземных органах пшеницы яровой на 26-е сутки после появления всходов составило 76,2 ± 28,0 Бк/кг, а на 33-и сутки – увеличилось до 133,1 ± 39,1 Бк/кг (рис. 5). При пониженном содержании влаги в почве (40 % от ПВ) накопление радионуклида на 26-е сутки возрастает на 106 %. К 33-м суткам эта разница несколько снижается и составляет 66,9 %.

Дополнительно в эксперимент включен вариант с изменяющейся влажностью почвы: 40 % от ПВ до 26 сут. после появления всходов с резким увеличением до 70 % от ПВ после. Среднее содержание ^{137}Cs в надземных органах растений в этом варианте как на 26-е сутки, так и на 33-е имеет промежуточные значения между вариантами с оптимальным и пониженным содержанием влаги в почве.

Оценка содержания K в листовом аппарате пшеницы яровой показала, что пониженное содержание влаги в почве приводит к существенному увеличению накопления этого элемента (с 3,09–4,64 % до 6,18–8,09 %). Известно, что калий является одним из основных осмопротекторов у высших растений [24]. Поэтому пшеница в ответ на недостаточную влагообеспеченность активирует накопление данного катиона. Поскольку используемый в эксперименте субстрат содержал достаточно высокие концентрации подвижного K_2O, то происходило интенсивное накопление элемента в надземных органах пшеницы. Имея высокую аффинность к Cs^+, высокоаффинные переносчики калия (HAK) также обусловили и более высокую интенсивность накопления ^{137}Cs растением. В естественных травянистых сообществах на фоне дефицита калия в почве снижение влагообеспеченности активирует HAK-переносчики, что повышает интенсивность поглощения ^{137}Cs растениями, но о заметном увеличении накопления K растениями утверждать нельзя.

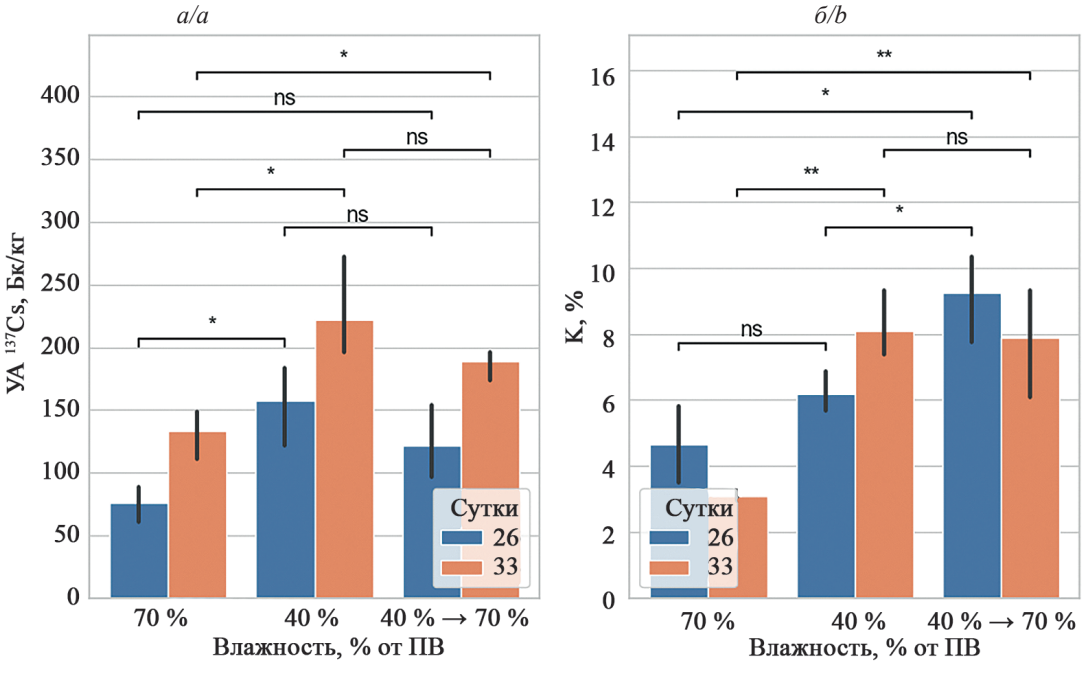


Рис. 5. Содержание ^{137}Cs и K в надземных органах пшеницы яровой в микровегетационном опыте с различными условиями увлажнения: * – различия между вариантами достоверны на уроне значимости 0,05, ** – различия между вариантами достоверны на уровне значимости 0,01; ns – гипотеза о наличии различий между вариантами не подтверждена

Fig. 5. Accumulation of ^{137}Cs and K in aboverground parts of spring wheat in the experiment with different soil moisture: * – difference betwen options is significant on significance level 0.05, ** – difference betwen options is significant on significance level 0.01; ns – difference betwen options is insignificant

Заключение

Выполненные на отдаленном этапе радиоактивных выпадений наблюдения в травянистых экосистемах, расположенных в пределах 13–16 км от 4 энергоблока Чернобыльской АЭС, не позволили выявить непосредственную связь между показателями валового загрязнения почвы ^{137}Cs, а также его содержанием в растворимой, ионообменной и лабильной формах с накоплением радионуклида надземными частями растений на фоне широкой вариабельности данных показателей.

Среди комплекса эдафических факторов наиболее тесную связь с удельной активностью ^{137}Cs в надземных частях злаковых растений имеет влажность почвы, а также произведение объемной доли воды в почве и содержание в ней подвижного K_2O. Обратный экспоненциальный характер связи этих параметров с накоплением ^{137}Cs опосредован K-зависимыми механизмами поглощения Cs растениями и снижением эффективной диффузии K из почвенного раствора к поверхности корня при уменьшении влажности почвы. Содержание ^{137}Cs в лабильной форме является показателем загрязнения, наиболее тесно связанным с накоплением радионуклида растением при учете влажности почвы и содержания в ней доступного калия.

Для осоки трясунковидной K-зависимый механизм регуляции корневого поглощения Cs не подтвержден. Накопление ^{137}Cs в надземных частях данного вида возрастает при воздействии эдафических факторов, обусловливающих вытеснение радионуклида в почвенный раствор из различных участков его сорбции в твердой фазе почвы.

Эксперимент в контролируемых условиях подтвердил существенное увеличение накопления ^{137}Cs злаковыми растениями при снижении влагообеспеченности, обусловленное активацией переносчиков K с высокой аффинностью как к этому элементу, так и к Cs.

Библиографические ссылки

1. Steinhauser G, Brandl A, Johnson TE. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Science of the total environment.* 2014;470(471):800–817. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.029.

2. Санжарова НИ, Сысоева АА, Исамов НН (мл.), и др. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению. *Российский химический журнал.* 2005;XLIX(3):26–34.

3. Fesenko SV, Spiridonov SI, Sanzharova NI, et al. Simulation of ^{137}Cs migration over the soil–plant system of peat soils contaminated after the chernobyl accident. *Russian journal of ecology.* 2002;33(3):170–177. DOI: 10.1023/a:1015475406815.

4. Цыбулько НН, Путятин ЮВ. Биологическая доступность ^{137}Cs и ^{90}Sr в дерново-подзолистых почвах в отдаленный период аварии на Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:108–117. DOI: 10.46646/2521-683X/2022-4-108-117.

5. Frissel M, Deb DL, Fathony M. et al. Generic values for soil-to-plant transfer factors of radiocesium. *Journal of environmental radioactivity.* 2002;58(2–3):113–128. DOI: 10.1016/s0265-931x(01)00061-3.

6. Absalom JP, Young SD, Crout NMJ, et al. Predicting soil to plant transfer of radiocesium using soil characteristics. *Environmental science & technology*. 1999;33(8). P. 1218–1223. DOI: 10.1021/es9808853.

7. Tarsitano D, Young S, Crout N. Evaluating and reducing a model of radiocaesium soil-plant uptake. *Journal of environmental radioactivity.* 2011;102(3):262–269. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2010.11.017.

8. Rai H, Kawabata M. The dynamics of radio-cesium in soils and mechanism of cesium uptake into higher plants: Newly elucidated mechanism of cesium uptake into rice plants. *Frontiers in plant science.* 2020;11:528. DOI: 10.3389/fpls.2020.00528.

9. Путятин ЮВ. Влияние гумусового состояния дерново-подзолистых супесчаных почв на накопление радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr кормовыми культурами. *Почвоведение и агрохимия.* 2019;1:203–211.

10. Подоляк АГ, Тимофеев СФ, Гребенщикова НВ, и др. Прогнозирование накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr в травостоях основных типов лугов Белорусского Полесья по агрохимическим свойствам почв. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2005;45(1):100–111.

11. Smolders E, den Brande KV, Merckx R. Concentrations of ^{137}Cs and K in soil solution predict the plant availability of ^{137}Cs in soils. *Environmental science & technology.* 1997;31(12):3432–3438. DOI: 10.1021/es970113r.

12. Zhu Y-G, Smolders E. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. *Journal of experimental botany.* 2000;51(351):1635–1645. DOI: 10.1093/jexbot/51.351.1635.

13. Ramírez-Guinart O, Kaplan D, Rigol A, et al. Deriving probabilistic soil distribution coefficients (Kd). part 2: Reducing caesium Kd uncertainty by accounting for experimental approach and soil properties. *Journal of environmental radioactivity.* 2020;223-224:106407. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106407.

14. Konoplev A. Mobility and Bioavailability of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Soil-Water Environment: Review. In: Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl. Singapore: Springer; 2020. p. 157–193. DOI: 10.1007/978-981-15-3568-0_3.

15. Park S-M, Alessi DS, Baek K. Selective adsorption and irreversible fixation behavior of cesium onto 2:1 layered clay mineral: A mini review. *Journal of hazardous materials*. 2019;369:569–576. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.061.

16. Prister B. Behavior of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Agricultural Ecosystems. In: Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl. Singapore: Springer; 2020. p. 229–282. DOI: 10.1007/978-981-15-3568-0_5.

17. White PJ, Broadley M.R. Mechanisms of caesium uptake by plants. *New phytologist.* 2000;147(2):241–256. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2000.00704.x.

18. Kashparov V, Levchuk S, Zhurba M, et al. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl exclusion zone. *Earth system science data*. 2018;10(1):339–353. DOI: 10.5194/essd-10-339-2018.

19. Delvaux B, Kruyts N, Cremers A. Rhizospheric mobilization of radiocesium in soils. *Environmental science & technology*. 2000;34(8):1489–1493. DOI: 10.1021/es990658g.

20. Ogasawara S, Nakao A, Eguchi T. et al. The extractability of potassium and radiocaesium in soils developed from granite and sedimentary rock in Fukushima, Japan. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry.* 2019;323(1):633–640. DOI: 10.1007/s10967-019-06971-2.

21. Wakabayashi S, Eguchi T, Nakao A, et al. Effectiveness of non-exchangeable potassium quantified by mild tetraphenylboron extraction in estimating radiocesium transfer to soybean in fukushima. *Science of the total environment.* 2022;820:153119. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153119.

22. Wauters J, Elsen A, Cremers A, et al. Prediction of solid/liquid distribution coefficients of radiocaesium in soils and sediments. Part one: a simplified procedure for the solid phase characterisation. *Applied geochemistry*. 1996;11(4):589–594. DOI: 10.1016/0883-2927(96)00027-3.

23. Kuchenbuch R, Claassen N, Jungk A. Potassium availability in relation to soil moisture. I. Effect of soil moisture on potassium diffusion, root growth and potassium uptake of onion plants. *Plant and soil.* 1986;95(2):221–231. DOI: 10.1007/bf02375074.

24. Kumar P, Kumar T, Singh S, et al. Potassium: a key modulator for cell homeostasis. *Journal of biotechnology.* 2020;324:198–210. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2020.10.018.

References

1. Steinhauser G, Brandl A, Johnson TE. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Science of the total environment*. 2014;470(471):800–817. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.029.

2. Sanzharova NI, Sysoeva AA, Isamov NN (ml.), Aleksahin RM, Kuznetsov VK, Zhigareva TL. *Rol khimii v reabilitatsii sel'skokhozyaistvennykh ugodii, podvergshikhsya radioaktivnomu zagryazneniyu* [The role of chemistry in the rehabilitation of agricultural land exposed to radioactive contamination]. *Russian Chemistry Journal.* 2005;XLIX(3):26–34. Russian.

3. Fesenko SV, Spiridonov SI, Sanzharova NI, Anisimov VS, Aleksakhin RM. Simulation of ^{137}Cs migration over the soil–plant system of peat soils contaminated after the chernobyl accident. *Russian journal of ecology.* 2002;33(3):170–177. DOI: 10.1023/a:1015475406815.

4. Tsybulka MM, Putyatin YuV. *Biologicheskaya dostupnost' 137Cs i 90Sr v dernovo-podzolistykh pochvakh v otdalennyi period avarii na Chernobyl'skoi AES* [Biological availability of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soddy-podzolic soils in the long period of the accident at the Chernobyl NPP]. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;4:108–117. DOI: 10.46646/2521-683X/2022-4-108-117. Russian.

5. Frissel M, Deb DL, Fathony M, Lin YM, Mollah AS, Ngo NT, Othman I, Robison WL, Skarlou-Alexiou V, Topcuoğlu S, Twining JR, Uchida S, Wasserman MA. Generic values for soil-to-plant transfer factors of radiocesium. *Journal of environmental radioactivity*. 2002;58(2–3):113–128. DOI: 10.1016/s0265-931x(01)00061-3.

6. Absalom JP, Young SD, Crout NMJ, Nisbet AF, Woodman RFM, Smolders E, Gillett AG. Predicting soil to plant transfer of radiocesium using soil characteristics. *Environmental science & technology*. 1999;33(8):1218–1223. DOI: 10.1021/es9808853.

7. Tarsitano D, Young S, Crout N. Evaluating and reducing a model of radiocaesium soil-plant uptake. *Journal of environmental radioactivity*. 2011;102(3):262–269. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2010.11.017.

8. Rai H, Kawabata M. The dynamics of radio-cesium in soils and mechanism of cesium uptake into higher plants: Newly elucidated mechanism of cesium uptake into rice plants. *Frontiers in plant science.* 2020;11:528. DOI: 10.3389/fpls.2020.00528.

9. Putyatin YV. *Vliyanie gumusovogo sostoyaniya dernovo-podzolistykh supeschanykh pochv na nakoplenie radionuklidov 137Cs i 90Sr kormovymi kul'turami* [Influence of humus status of sod-podzolic loamy sand soils on the accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides by forage crops]. *Soil Science and Agrochemistry*. 2019;1:203–211. Russian.

10. Podoljak AG, Timofeev SF, Grebenshhikova NV, Arastovich TV, Zhdanovich VP. *Prognozirovanie nakopleniya 137Cs i 90Sr v travostoyakh osnovnykh tipov lugov Belorusskogo Poles'ya po agrokhimicheskim svoistvam pochv* [Prognosis of accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the herbage of main types in the Belarus Polessje meadows using agrochemical soil properties]. *Radiation biology. Radioecology*. 2005;45(1):100–111. Russian.

11. Smolders E, den Brande KV, Merckx R. Concentrations of ^{137}Cs and K in soil solution predict the plant availability of ^{137}Cs in soils. *Environmental science & technology*. 1997;31(12):3432–3438. DOI: 10.1021/es970113r.

12. Zhu Y-G, Smolders E. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. *Journal of experimental botany.* 2000;51(351):1635–1645. DOI: 10.1093/jexbot/51.351.1635.

13. Ramírez-Guinart O, Kaplan D, Rigol A, et al. Deriving probabilistic soil distribution coefficients (Kd). part 2: Reducing caesium Kd uncertainty by accounting for experimental approach and soil properties. *Journal of environmental radioactivity.* 2020;223-224:106407. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106407.

14. Konoplev A. Mobility and Bioavailability of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Soil-Water Environment: Review. In: Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl. Singapore: Springer; 2020. p. 157–193. DOI: 10.1007/978-981-15-3568-0_3.

15. Park S-M, Alessi DS, Baek K. Selective adsorption and irreversible fixation behavior of cesium onto 2:1 layered clay mineral: A mini review. *Journal of hazardous materials*. 2019;369:569–576. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.061.

16. Prister B. Behavior of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Agricultural Ecosystems. In: Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl. Singapore: Springer; 2020. p. 229–282. DOI: 10.1007/978-981-15-3568-0_5.

17. White PJ, Broadley M.R. Mechanisms of caesium uptake by plants. *New phytologist.* 2000;147(2):241–256. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2000.00704.x.

18. Kashparov V, Levchuk S, Zhurba M, et al. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl exclusion zone. *Earth system science data*. 2018;10(1):339–353. DOI: 10.5194/essd-10-339-2018.

19. Delvaux B, Kruyts N, Cremers A. Rhizospheric mobilization of radiocesium in soils. *Environmental science & technology*. 2000;34(8):1489–1493. DOI: 10.1021/es990658g.

20. Ogasawara S, Nakao A, Eguchi T. et al. The extractability of potassium and radiocaesium in soils developed from granite and sedimentary rock in Fukushima, Japan. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry.* 2019;323(1):633–640. DOI: 10.1007/s10967-019-06971-2.

21. Wakabayashi S, Eguchi T, Nakao A, et al. Effectiveness of non-exchangeable potassium quantified by mild tetraphenylboron extraction in estimating radiocesium transfer to soybean in fukushima. *Science of the total environment.* 2022;820:153119. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153119.

22. Wauters J, Elsen A, Cremers A, et al. Prediction of solid/liquid distribution coefficients of radiocaesium in soils and sediments. Part one: a simplified procedure for the solid phase characterisation. *Applied geochemistry*. 1996;11(4):589–594. DOI: 10.1016/0883-2927(96)00027-3.

23. Kuchenbuch R, Claassen N, Jungk A. Potassium availability in relation to soil moisture. I. Effect of soil moisture on potassium diffusion, root growth and potassium uptake of onion plants. *Plant and soil.* 1986;95(2):221–231. DOI: 10.1007/bf02375074.

24. Kumar P, Kumar T, Singh S, et al. Potassium: a key modulator for cell homeostasis. *Journal of biotechnology.* 2020;324:198–210. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2020.10.018.

Статья поступила в редколлегию 15.03.2024.
Received by editorial board 15.03.2024.

УДК 616.34-002-078.083.2

ИММУНОПАТОГЕНЕЗ И СЕРОЛОГИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ПРИ ВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЯХ КИШЕЧНИКА

ЧЖАНЬ ВЕНЦАНЬ[1)], ***Д. Б. НИЖЕГОРОДОВА***[1)], ***М. М. ЗАФРАНСКАЯ***[1)]

[1)]*Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь*

Воспалительные заболевания кишечника (ВЗК), к которым относятся болезнь Крона (БК) и язвенный колит (ЯК), представляют значительные диагностические и терапевтические сложности. Патогенез ВЗК включает в себя наличие таких патогенных факторов, как аномальная микрофлора кишечника, нарушение регуляции иммунного ответа, изменения окружающей среды и вариабельность определенных генов. Несмотря на усилия исследователей в выявлении новых этиологических факторов, которые связаны с факторами окружающей среды, генетическими, микробиологическими и иммунными реакциями, полное понимание патогенеза ВЗК остается неясным. Цитокины играют решающую роль в патогенезе ВЗК, поскольку они контролируют множество аспектов воспалительной реакции. Роль цитокинов, вырабатываемых клетками врожденного и адаптивного иммунитета, а также их значение для будущей терапии ВЗК очень важны. Благодаря всестороннему анализу литературы подчеркиваются важность антител против Saccharomyces cerevisiae (ASCA) и перинуклеарные антинейтрофильные цитоплазматические антитела (pANCA) для различения БК и ЯК, прогнозирования течения заболевания и принятия решений о лечении. Несмотря на достигнутый прогресс, потребность в маркерах с повышенной специфичностью и чувствительностью очевидна. В статье рассматривается иммунопатогенез и роль серологических маркеров в лечении ВЗК, обсуждаются текущие проблемы

Образец цитирования:
Венцань Чжань, Нижегородова ДБ, Зафранская ММ. Иммунопатогенез и серологические маркеры при воспалительных заболеваниях кишечника. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;2:68–78 (на англ.).
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-68-78

For citation:
Wencan Zhang, Nizheharodava DB, Zafranskaya MM. Immunopathogenesis and serological markers in inflammatory bowel diseases. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;2:68–78.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-68-78

Авторы:
Чжань Венцань – магистрантка кафедры иммунологии.
Дарья Борисовна Нижегородова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры иммунологии.
Марина Михайловна Зафранская – доктор медицинских наук, профессор; заведующий кафедрой иммунологии.

Authors:
Zhang Wencan, master's degree student at the department of immunology.
Zhangwencan9@gmail.com
Darya B. Nizheharodava, PhD (biology), docent; associate professor at the department of immunology.
nzh@tut.by
Marina M. Zafranskaya, doctor of science (medicine), docent; head of the department of immunology.
zafranskaya@gmail.com

и намечаются направления будущих исследований. Обзор завершается акцентом на роли микробиоты и цитокинов в патогенезе ВЗК, потенциале новых биомаркеров, персонализированной медицине и интеграции передовых технологий для усовершенствования методов лечения ВЗК.

Ключевые слова: воспалительные заболевания кишечника (ВЗК), болезнь Крона (БК); язвенный колит (ЯК); иммунопатогенез; микробиота; цитокины; антитела против *Saccharomyces cerevisiae*; перинуклеарные антинейтрофильные цитоплазматические антитела; биомаркеры.

IMMUNOPATHOGENESIS AND SEROLOGICAL MARKERS ININFLAMMATORY BOWEL DISEASES

ZHANG WENCAN[a], ***D. B. NIZHEHARODAVA***[a], ***M. M. ZAFRANSKAYA***[a]

[a]*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,*
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: M. M. Zafranskaya (zafranskaya@gmail.com)

Inflammatory Bowel Diseases (IBDs), encompassing Crohn's Disease (CD) and Ulcerative Colitis (UC), presents significant diagnostic and therapeutic challenges. The pathogenesis of IBDs, including CD and UC, involves the presence of pathogenic factors such as abnormal gut microbiota, immune response dysregulation, environmental changes, and gene variants. Although many investigations have tried to identify novel pathogenic factors associated with IBDs that are related to environmental, genetic, microbial, and immune response factors, a full understanding of IBDs pathogenesis is unclear. Cytokines have a crucial role in the pathogenesis of IBDs, where they control multiple aspects of the inflammatory response. The role of cytokines produced by innate and adaptive immune cells, as well as their relevance to the future therapy of IBDs are very important. Through a comprehensive analysis of the literature, we highlight the importance of antibodies such as Anti-Saccharomyces cerevisiae Antibodies (ASCA) and Perinuclear Anti-Neutrophil Cytoplasmic Antibodies (pANCA) in distinguishing between CD and UC, predicting disease behavior, and guiding treatment decisions. Despite the progress, the need for markers with improved specificity and sensitivity is evident. This review explores immunopathogenesis and the role of serological markers in IBDs management, discusses current challenges, and anticipates future research directions. The review concludes with an optimistic outlook on the role of microbiota and cytokine in pathogenesis of IBDs, potential of novel biomarkers, personalized medicine, and the integration of advanced technologies to transform IBDs management.

Keywords: Inflammatory Bowel Diseases (IBDs); Crohn's Disease (CD); Ulcerative Colitis (UC); Immunopathogenesis; Microbiota; Cytokines; Anti-Saccharomyces cerevisiae Antibodies; Perinuclear Anti-Neutrophil Cytoplasmic Antibodies; Biomarkers.

Introduction

The inflammatory bowel diseases (IBDs), represented mainly by ulcerative colitis (UC) and Crohn's disease (CD) but also including noninfectious inflammations of the bowel. IBD is thought to be the result of a disorder in the immune system of genetically susceptible individuals. IBD has become a global disease, with the highest prevalence in Westernized countries and the fastest growing incidence in newly industrialized countries [1].

In recent years, the focus of IBDs research has shifted towards. An ideal biomarker should be non-invasive, sensitive, disease specific, easy to perform, and cost-effective [2]. To date, there is no ideal biomarker that possesses all of the above qualities to accurately diagnose IBDs, differentiate between IBDs subtypes, or monitor disease activity. IBDs biomarkers have been found in colon tissue, blood, stool, urine and breath. Blood-based biomarkers are non-invasive, can be easily obtained, are not susceptible to contamination, and are the most widely used. Serological markers are mainly related to antimicrobial antibodies, antinuclear antibodies, and anticarbohydrate antibodies [3; 4].

Despite the increasing number of treatment options for IBDs in recent years, the quality of life of patients declines due to nonresponse to or loss of response to existing therapies. Thus, the understanding of the disease etiology and the exploration of its pathogenesis can provide new insights into the treatment strategies for IBDs. A large amount of evidence shows that IBDs are the result of the interaction of genetic/epigenetic, environmental, immune and microbial aspects (Fig. 1). Large-scale genetic study provides important insights into the pathogenesis of IBDs and highlights shared and unique genetic risk factors for CD and UC [5]. The common phenotypes of UC and CD include chronic inflammation and immunoinflammatory dysregulation. Therefore, most of the current studies on the pathogenesis of IBDs focus on the immune system, which may involve genetic factors, changes in the gut microbiome, and immune response cells, including cytokines and immune cells.

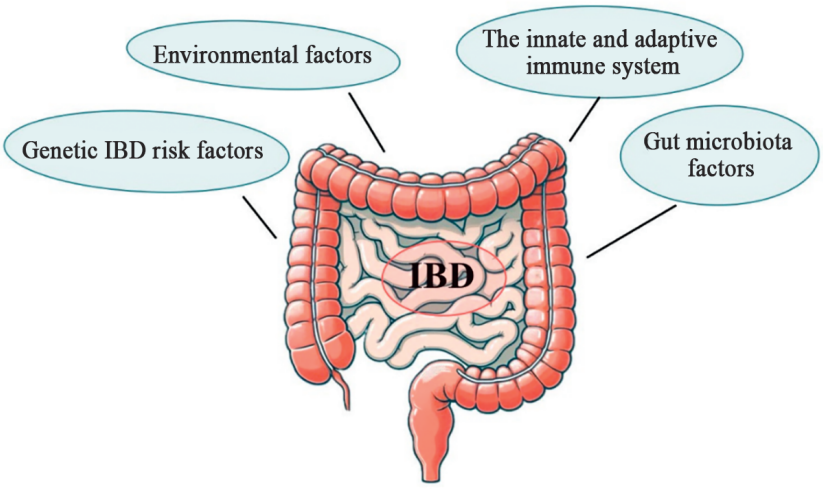


Fig. 1. Pathogenesis of inflammatory bowel disease

Here, we aim to review the immunological pathogenesis, diagnostic and serological markers of IBDs, with a view to providing new ideas for the diagnosis and treatment of IBDs.

Background of Inflammatory Bowel Disease. IBDs is a group of intestinal disorders of unknown etiology characterized by inflammation and caused by complex interactions between genetics, environmental factors, and immune responses. Current paradigms for classifying patients with Crohn's disease and ulcerative colitis classify them as having mild, moderate, or severe active disease [6]. These classifications are most typically based on a moment in time, with attributes describing recent disease symptoms and objective findings. This is very helpful for tracking a patient's disease course and clinical trials. However, it does not tell us about the severity of the disease or the patient's prognosis. Current assessments of disease activity would be more instructive if past disease complications and surgeries were included, as they are undoubtedly powerful reflections of disease burden and may influence future outcomes. A scoring system has been developed to assess the overall severity of disease [7].

Since 2011, the concept of precision medicine has become increasingly popular and attracted much attention. Xin-Yu Liu discusses strategies for classifying IBDs patients and biomarkers for identifying these subgroups at World J Gastroenterol 2023 January. Suggested application of multi-omics and artificial intelligence approaches can facilitate precise management of IBDs patients [8]. In the study of Xin-Yu Liu, it was shown that ASCA biomarkers and pANCA biomarkers in serum samples may be specific for the diagnosis of CD and UC (Table 1).

Table 1

Biomarkers of inflammatory bowel diseases

Sample	Biomarker	Outcome	Characteristic
Serum	ASCA	More aggressive fibro stenosing and internal penetrating disease behaviors	CD specificity
	pANCA	UC disease activity	UC specificity
	G-CSF, IL-1Ra	Endoscopically active disease	–
	Vitamin D	Vitamin	–
Feces	FC	Monitor disease activity and mucosal healing; early prediction of relapse risk	Higher sensitivity than CRP; confounding of non-IBD gut inflammation

Note. ASCA: Anti-Saccharomyces cerevisiae antibody; CD: Crohn's disease; CRP: C-reactive protein; FC: Fecal calprotectin; G-CSF: Granulocyte colony-stimulating factor; IL-1Ra: Interleukin 1 receptor antagonist; IBD: Inflammatory bowel disease; UC: Ulcerative colitis.

Pathogenesis of IBDs. IBDs is the result of a complex series of interactions between susceptibility genes, the environment, and the immune system. Multiple components of the mucosal immune system are involved in the pathogenesis of IBDs, including intestinal epithelial cells, innate lymphoid cells, cells of the innate immune system (macrophages/monocytes, neutrophils, and dendritic cells), and the acquired immune system (T cells and B cells), as well as their secretory mediators (cytokines and chemokines).

Genetic IBDs risk factors. Over the past few years, genome-wide searches for IBDs susceptibility loci have been very successful in identifying genes that contribute to disease susceptibility. In an initial screening effort, two groups used positional cloning and candidate gene approaches to identify NOD2 (also designated CARD15 and IBD1) as a CD susceptibility gene. Since then, several more susceptibility genes have been linked to inflammatory bowel disease and confirmed by replication: IBD5, IL23R, and ATG16L1. The identified genetic variants associated with CD risk demonstrate the importance of innate immunity, autophagy, and phagocytosis in the pathogenesis of CD. In particular, some genes associated with CD (IL23R, PTPN2) are also associated with other autoimmune diseases, suggesting that a subset of CD patients share common triggers with these diseases. Additionally, multiple disease-associated intergenic segments have been identified and replicated in genome-wide association studies [9]. These intergenic regions hint at novel genes and pathways - possibly including genes expressed within these regions and others that are remotely regulated to alter disease phenotypes. Further understanding of regulatory elements and gene-gene interactions within non-coding genomic regions will lead to a better understanding of the underlying mechanisms leading to disease. Genome-wide association studies (GWASs) have identified approximately 240 genetic loci associated with IBDs susceptibility [10]. Some studies use genetic profiling of blood samples to identify gene panels that may help differentiate IBDs from healthy controls [11], active from inactive CD [12], and CD from UC [13]. A different gene panel was also found in peripheral blood samples from pediatric IBDs patients in clinical remission compared with healthy controls. Other studies performed gene expression analysis on mucosal biopsies from IBDs patients, and identified distinct gene panels for IBDs versus healthy controls [14] and UC versus healthy controls. The use of genetics to identify loci associated with IBDs can potentially define causal disease mechanisms, which could, in turn, advance the biomarker discovery process.

Gut microbiota and IBDs. Bacteria associated with IBDs include *Escherichia coli*, bacillus fragile, ruminococcus, prevotella and rosetta. *E. coli* is a Gram-negative facultative anaerobic bacterium that is a normal inhabitant of the human gut. The bacteria found to be associated with IBDs include *Escherichia coli, Bacteroides fragilis, Ruminococcus gnavus, Faecalibacterium prausnitzii*, and *Roseburia* (Fig. 2). The gut microbiota of patients with IBDs showed an increased number of adhesive invasive *Escherichia coli* (AIEC) [15]. It can adhere to and pass through the intestinal mucosa of patients with IBDs, induce inflammation, and increase the permeability of the intestinal epithelium. After AIEC is engulfed by macrophages, it can survive and replicate, leading to the secretion of tumor necrosis factor (TNF), which leads to inflammation [16]. *Bacteroides fragilis* is an opportunistic pathogen with proinflammatory properties and is closely related to the development of IBDs. It can express zinc-dependent metalloproteinase called *Bacillus fragilis* toxin (BFT) [17].

BFT can affect WNT, NF-κB, STAT3 and MAPK signaling pathways, leading to the production of pro-inflammatory mediators. And it can activate STAT3 transcription factor, increasing Th17 and T regulatory cells (Treg), promoting the increase of mucosal permeability [19]. BFT can also induce the production of reactive oxygen species (ROS) and DNA damage by inducing the expression of spermine oxidase in colon cells. *Ruminococcus gnavus* is also associated with IBD. A. B. Hall, et al. found that in patients with severe CD, the content of *R. navus* is very high. *R. navus* can produce glucorhamnanol, and then induce dendritic cells (DC) to secrete inflammatory cytokines, such as TNF-α [20; 21]. *Faecalibacterium prausnitzii* is one of the most important butyric acid-producing bacteria found in the gastrointestinal tract and has played an important role in the prognosis of IBDs patients [22]. *F. prausnitzii* mediates anti-inflammatory effects by inhibiting the NF-κB pathway in intestinal epithelial cells and producing butyrate, which maintains Th17/Treg cell balanceIn addition, *F. prausnitzii* also stimulates the production of anti-inflammatory cytokines (such as IL-10) and inhibits the production of inflammatory cytokines (such as IL-12 and interferon-γ), to affecting the balance of inflammatory response and immunosuppression [23]. *Candida albicans* is a disease-causing fungus, and studies have reported increased numbers of Candida in IBDs patients, with the same results in animal models. There is growing evidence that *Candida albicans* can enhance inflammation by increasing the production of IL-17 and IL-23, leading to an increase in IBDs [24; 25].

IBDs-related immune cell and cytokines/chemokines. Immune cells secrete products that are actively involved in the initiation and preservation of inflammation, leading to gut tissue damage. In IBDs patients, colonic lesions show excessive immune cell infiltration and tissue devastation. Many cytokines and chemokines are associated with IBDs development [26].

In experimental colitis and IBDs, IL-6 production by lamina propria macrophages and $CD4^+$T cells is increased. In particular, $CD14^+CD33^+CD68^+CD163^{lo}$ myeloid cells that express some macrophage-associated and DC-associated markers were found to produce high amounts of IL-6 and IL-23. IL-6 binds to soluble IL-6R (sIL-6R), and the complex activates intestinal target cells by binding to gp 130 surface molecules. Therefore, IL-6 can exert its pro-inflammatory function by activating multiple target cells, including APC and T cells. In addition, IL-6 may also play a role in homeostasis by stimulating the proliferation and expansion of intestinal epithelial cells (IEC).

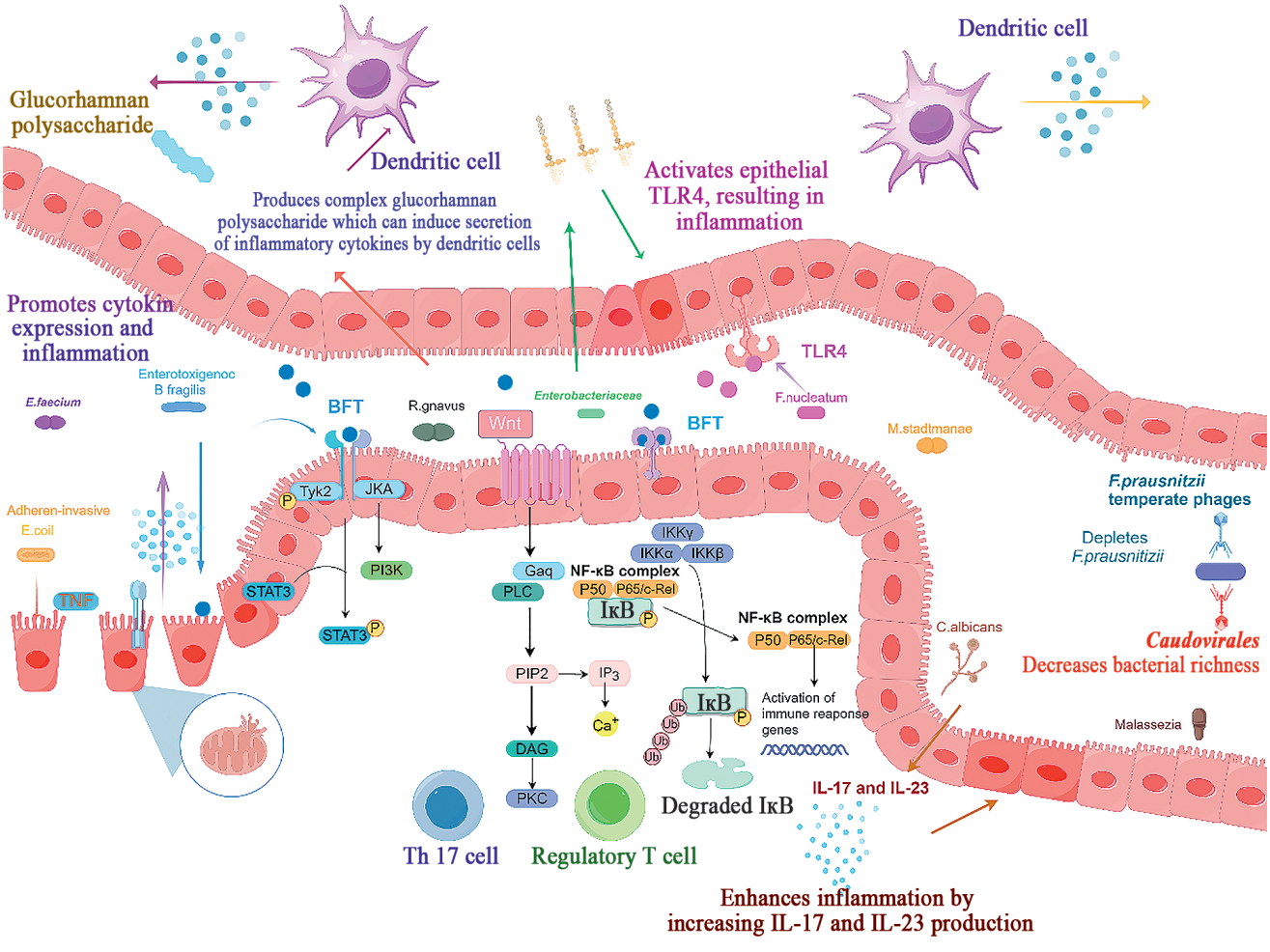


Fig. 2. Microbes involved in inflammatory bowel disease and their molecular mechanisms

Note. Figure created with BioRender: *B. fragilis*, *Bacteroides fragilis*; *E. faecium, Enterococcus faecium*; *E. coli, Escherichia coli*; *F. nucleatum, Fusobacterium nucleatum*; *F. prausnitzii, Faecalibacterium prausnitzii*; *M. stadtmanae, Methanosphaera stadtmanae*; *R. gnavus*, *Ruminococcus gnavus*; TLR4, Toll-like receptor 4; BFT, *B. fragilis* toxin; TNF, tumor necrosis factor; ETBF, enterotoxigenic *B. fragilis*; AhR, aryl hydrocarbon receptor; IL, interleukin; PLC, phospholipase C; DAG, diacylglycerol; PKC, protein kinase C [18]

ILCs (intraepithelial lymphoid cells) are a recently discovered group of cells that control innate immunity at mucosal surfaces. These cells are now recognized as an important source of IFNγ and of IL-23-inducible pro-inflammatory cytokines, such as IL-17A and IL-17F, which mediate experimental innate immune-mediated colitis. In addition to IFNγ and IL-17, IL-22 is produced by mucosal ILCs via signaling events that involve the tyrosine-protein kinase LYN [27]. Moreover, IL-22 is produced by neutrophils, DCs, γδ T cells and effector αβ T cells in experimental colitis. IL-22 induces the production of antimicrobial peptides, such as defensins and regenerating islet-derived (REG) proteins, by IECs and thus influences the colitogenic potential of the microbiota and also affects intestinal barrier function. The functional relevance of IL-22 was shown by the finding that the administration of recombinant IL-22 protected mice from DSS-induced or trinitrobenzene sulphonic acid (TNBS)-induced colitis [28]. However, the pro-inflammatory effects of IL-22 were recently noted in innate immune-mediated colitis, which suggests that IL-22 may have multifaceted roles in mucosal inflammation.

T cells are implicated in the pathogenesis of IBDs because of the large number of T cells detected in the inflamed intestinal wall, the secretion of large amounts of T-cell-derived pro-inflammatory cytokines, and the need for T cells in various animal models of chronic intestinal inflammation. Interestingly, laminae propria T cells in IBDs respond poorly to T cell receptor stimulation and therefore rely heavily on costimulatory factors such as IL-6 and TNF signaling to prevent apoptosis. T_H1 cells are present in the intestinal lamina propria of patients with CD, and T-bet and STAT4 are key factors regulating T_H1 cell differentiation. STAT4 defects in T cells protect mice from experimentally induced colitis, while overexpression of STAT4 exacerbates colitis. In contrast to the lamina T cells in CD, lamina propria T cells from patients with ulcerative colitis produce the T_H2 cytokines IL-5 and IL-13 and express the T_H2-associated transcription factor GATA binding protein 3 (GATA3) [29]. Studies have shown that ulcerative colitis is associated with the presence of non-classical natural killer T (NKT) cells that have an atypical cytokine response and can secrete T_H2 cell-associated cytokines such as IL-13. IL-13 promotes

fibrosis and causes changes in IEC tight junction function and apoptosis, leading to mucosal ulceration. There are studies have shown that there is increased production of T_H17 cell-associated cytokines, such as IL-17A and IL-17F, by lamina propria T cells in both CD and UC [30]. Functionally, T_H17-type cytokines, such as IL-17 and IL-21, were found to mediate pro-inflammatory functions including the upregulation of TNF, IL-1β, IL-6 and IL-8, the recruitment of neutrophils and the secretion of matrix metalloproteinases by intestinal fibroblasts, which suggested that T_H17-type cytokines may induce tissue destruction in IBD. Consistent with this, the increased expression of the T_H17 cell-associated cytokine IL-26 has been noted in patients with Crohn's disease and this cytokine augmented pro-inflammatory cytokine production. T_H17 cells may also produce anti-inflammatory cytokines, such as IL-22, that control epithelial cell proliferation, wound healing and the production of antimicrobial proteins – such as defensins, mucins, and REG3β and REG3γ proteins by via STAT3 activation [31].

Studies using tissue from patients with IBDs and animal models of IBDs have identified cytokines as potential new targets for the therapy of intestinal inflammation. Relevant targets include pro-inflammatory cytokines, such as IL-6, IL-12, IL-23 and IL-21, as well as anti-inflammatory cytokines, such as IL-10 and transforming growth factor-β [32] (Fig. 3).

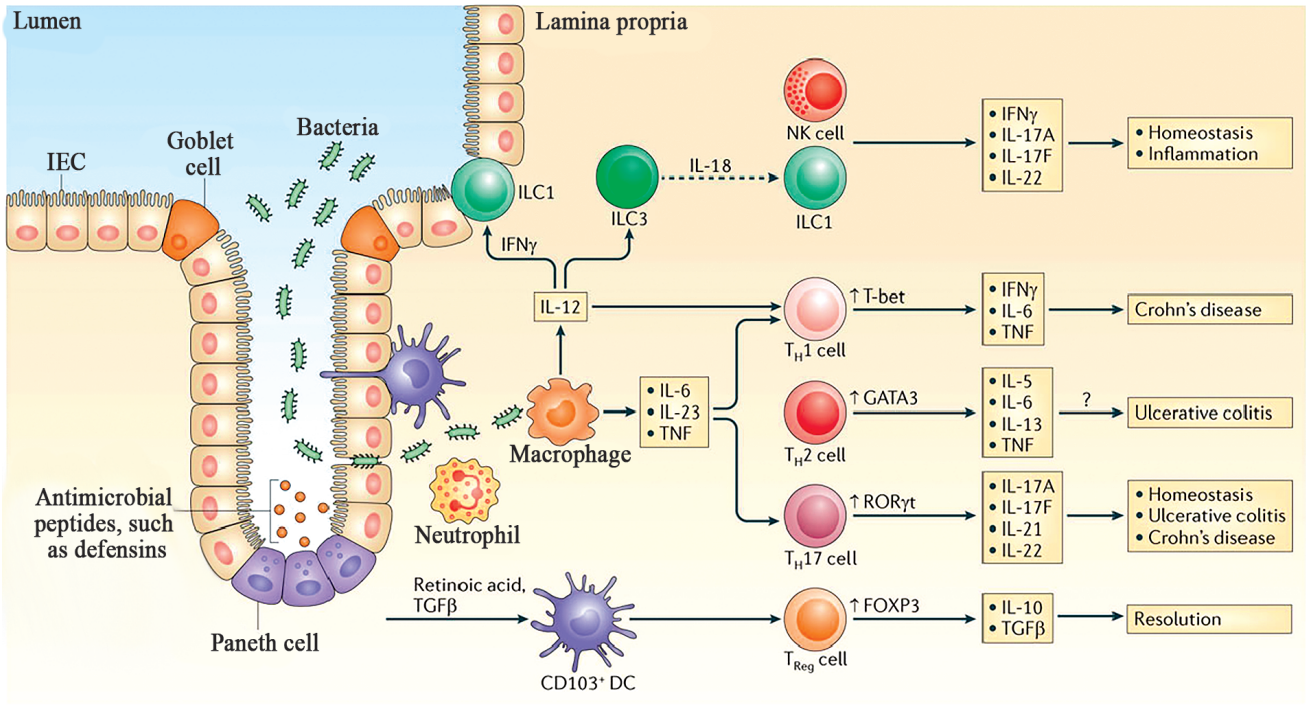


Fig. 3. Cytokines in inflammatory bowel disease [32]

The imbalance between pro-inflammatory and anti-inflammatory cytokines that occurs in IBDs impedes the resolution of inflammation and instead leads to disease perpetuation and tissue destruction.

Serological Profile of Antibodies in IBDs. In recent years, many studies have shown that fecal and serum biomarkers can be used in the diagnosis and treatment of inflammatory bowel disease. Doctors can treat patients with blood tests, radiology and endoscopy, and other tests. These diagnostic tests can be used to identify patients with IBD, determine prognosis, assess disease activity, and determine optimal treatment strategies.

A multitude of fecal markers can potentially be used to determine the likelihood that a patient has IBDs [33; 34]. In studies using a fecal calprotectin threshold concentration of 50 μg/g, the estimated sensitivity and specificity values for identifying IBD patients compared with non-IBDs patients were 89 and 81 %, respectively; in studies using a fecal calprotectin threshold concentration. In the 100 μg/g study, these values were 98 and 91 %, respectively. However, these estimates come from a combination of different studies rather than testing at different threshold levels in a single study. Lactoferrin is an iron-binding protein found in neutrophil granules and serum and secreted by the mucosa. It is resistant to degradation and proteolysis (although not as well as calprotectin), making it a useful marker of intestinal inflammation. Gisbert, et al. compiled data from multiple studies and 1001 patients. The lactoferrin test is estimated to have an average sensitivity of 80 % and specificity of 82 % in identifying patients with IBDs. Most but not all studies reported similar performance for calprotectin and lactoferrin tests [35].

Blood-based biomarkers may be superior to stool-based tests for several reasons. C-reactive protein (CRP) is one of several acute-phase proteins increased in the serum of patients with acute-phase IBDs. Studies dating back

decades found that nearly 100 % of patients with CD and approximately 50% of patients with UC have elevated CRP levels. The reason why patients with CD have higher rates of elevated CRP levels compared with UC is unclear. Furthermore, many patients with established CD do not have elevated CRP levels despite evidence of active disease, so these studies may have overestimated the sensitivity of this test in detecting CD [36].

Previous studies have found that the detection of several specific antibodies against well-defined antigens is a serologic signature of IBDs patients. Serological antibodies, including autoantibodies and microbial antibodies, arise as a result of excessive autoimmune responses, intestinal barrier damage, and loss of immune tolerance to bacterial antigens [37]. These antibodies have been shown to be useful biomarkers for the diagnosis and classification of IBDs. In recent years, some serological antibodies have been found to have clinical value in predicting disease activity or treatment response. These new findings will also be reviewed in this section.

Various serological tests have been used to try to improve the diagnosis of IBDs and differentiate between CD and UC, such as perinuclear antineutrophil cytoplasmic antibodies (pANCA) and anti-Saccharomyces cerevisiae antibodies (ASCA) tests. Perinuclear antineutrophil cytoplasmic antibodies (pANCA) are antibodies that react with lysosomal enzymes in the cytoplasm of neutrophils and monocytes. Serum pANCA has been extensively studied and is considered to be UC specific and thus can differentiate between UC and CD. Although pANCA is currently relatively consistent in UC patients, p ANCA titers in UC patients vary with disease activity (Table 2) [38]. However, the sensitivity of p ANCA in the evaluation of patients with suspected UC is rather low [39]. pANCA was significantly increased in UC patients and CD patients with «UC-like» features. Nearly 25 % of CD patients with left-sided colitis have symptoms similar to UC and elevated pANCA levels through endoscopic or histopathological examination, which limits the application of pANCA in IBD subclassification. Neutrophil protease 3 (PR3) autoantibodies, one of ANCA, may be a useful serological marker to differentiate IBDs subgroups. The positive rate of PR3-ANCA in UC patients is 15–40 %, and the positive rate of PR3-ANCA in CD patients is 0–10 % [40].

Table 2

Serological markers in inflammatory bowel diseases

Biomarker		Association
Antibodies	pANCA	IBD subclassification (UC-specificity), lower response rate to IFX therapy
	ASCA	IBD subclassification (CD-specificity), early disease onset, fibrostenosing behavior, internal-penetrating disease behavior
	Anti-GP2	IBD subclassification (CD patients with ileum involvement)
	Anti-CUZD1	CD patients with structuring behavior
	Anti-CHI3L1	IBD subclassification (CD patients)
	Anti-GM-CSF	IBD subclassification (CD patients), aggressive disease, ileal involvement
	Anti-ACA	Diagnostic potential
CRP		Surveillance of disease activity, indicator of active disease, predicting clinical response
LL-37		Surveillance of disease activity, stricture disease in CD patients
TFF3		Surveillance of disease activity
Cytokines	IL-1β, IL-6, IL-8, IL-9, IFN-γ, TNF, CCL2, IL-22	Prediction of the response to biologics therapy and mucosal healing
	IL-2, IL-6	Disease relapse

Note. IBD, inflammatory bowel disease; CD, Crohn's disease; UC, ulcerative colitis; pANCA, perinuclear anti-neutrophil cytoplasmic antibodies; ASCA, anti-Saccharomyces cerevisiae antibodies; anti-GP2, anti-glycoprotein 2 pancreatic antibodies; CUZD1, CUB and zona pellucida-like domains 1; anti-CHI3L1, anti-chitinase-3-like protein 1; anti-ACA, anti-cardiolipin; TFF3, trefoil factor 3; IL, interleukin; IFN-γ, interferon-γ; TNF, tumor necrosis factor

Serological markers in UC. Many serological markers have been tested for potential correlation with UC disease outcomes. These include perinuclear antineutrophil cytoplasmic antibodies (pANCA), which are considered to be associated with a moderate prognosis for frequent relapses and a more severe course. In contrast, interleukin (IL) 1β, IL6, IL15, and serum inflammatory marker c-reactive protein (CRP) have no correlation with prognosis. Subsequent studies challenged this assumption and showed that pANCA was not a reliable predictor of overall disease outcome[71], although high levels of pANCA seemed to indicate the development of chronic pouchitis after ileal pouch-anal anastomosis in postcolectomy patients. There are similar reports of elevated serum

anti-flagellin antibodies (anti-CBir1) [41]. Furthermore, serum granulocyte macrophage colony-stimulating factor autoantibody (GM-CSF Ab) may be a promising candidate for early identification of CD and UC patients at risk of disease recurrence [42]. Mucosal TNF-alpha expression combined with histological disease activity scores at the point of diagnosis have been reported to be predictive of a severe outcome in UC with a positive and negative predicate values of 0.89 and 0.87 respectively [43]. However, such parameters are very difficult to implement in routine clinical practice and results are still pending validation in larger, independent patient cohorts.

Serological markers in CD. Over the last decades, several attempts have been made to identify serological markers prognostic of more aggressive phenotypes. Among those one of the most promising have been antibodies against Saccharomyces cerevisiae antibody (ASCA) [44]. Since then, several studies have shown ASCA to be associated with a more complicated disease course (albeit definition of 'complicated' varies as outlined above). Anti-Saccharomyces cerevisiae antibodies (ASCA) are antibodies to the mannan protein of S. cerevisiae, which have high specificity but low sensitivity in identifying CD owing to a genetic susceptibility of CD patients. The expression of ASCA is relatively low in patients with isolated colonic CD [45]. Moreover, it should be noted that the expression of ASCA varies in different ethnic populations: the prevalence and titers of ASCA are significantly lower in Asian CD patients than Caucasian CD patients [46]. Another field entirely and by definition not a serological marker is the characterization of the microbiome in IBDs patients for disease prognosis. Whereas data is still rare compared to genomic, epigenomic, transcriptomic, proteomic, and metabolomic data, first results seem to be promising. In a recent study on 143 patients for example IBD phenotype and the risk of surgery could be predicted on the basis of 16S and 18S rRNA sequencing data [47].

Other functions of biomarkers. In patients with UC or CD, mucosal healing in response to medical therapy correlates with a less severe future course of disease. There is potential to use biomarkers to assess mucosal healing following medical therapy or surgery and to predict the likelihood of relapse.

Roseth, et. al. demonstrated that patients with CD or UC who had remission following medical therapy had large reductions in levels of fecal calprotectin, (to below 50 μg/g) [48]. Several additional studies have shown similar results in response to therapy. Sipponen et al. performed one study of patients treated with anti-tumor necrosis factor (TNF) agents and another study of patients treated with other therapies. Among 5 patients that had mucosal healing after treatment with reagents other than anti-TNF agents, 4 (80 %) also had normalized levels of fecal calprotectin and lactoferrin. Among 9 patients with no mucosal improvement after therapy, 8 (89 %) had increased levels of calprotectin and 6 (67 %) had increased levels of lactoferrin [49]. Eleven patients that responded to anti-TNF therapy (based on endoscopic appearance), had significant decreases in levels of fecal calprotectin and lactoferrin, whereas 3 non-responders did not have decreased levels of these markers [50]. Despite the consistency of these results, the studies were limited by small sample sizes and an inability to define an optimal cut point for predicting mucosal healing. However, within the range of cut points tested, there does not appear to be a difference between tests for calprotectin and lactoferrin in determining treatment response.

There are limited data regarding the use of biomarkers to assess CD recurrence following ileocolonic resection; and the results for fecal biomarkers demonstrated only modest sensitivity and specificity. A possible explanation for these observations is that the initial, asymptomatic recurrence of CD results in limited mucosal injury. This small amount of injury, particularly to the ileum, is not likely to increase biomarkers to levels that can be detected in fecal samples.

Existing and emerging serum markers have been studied extensively in IBDs, thus providing valuable information into the prediction of disease course. Different kinds of antibodies against microbial components, neutrophils, and exocrine pancreas such as anti-Saccharomyces cerevisiae (ASCA), anti-outer membrane protein C (anti-OmpC), anti-neutrophil cytoplasmic antibodies (ANCA) and anti-glycoprotein 2 (anti-GP2) have been found in the serum of IBD patients. They are more likely to be detected in IBD patients in comparison with healthy controls, suggesting a possibility of differentiating IBD and controls by them [51]. One of the major goals of treatment for CD is to prevent complications such as perforation and formation of abscesses, fistulas and strictures. Biomarkers might be used to identify patients who are at high risk for a complicated disease course. Approximately 50 % of the patients with CD would be expected to have a relatively uncomplicated course during a period of 10–20 years and might be candidates for less aggressive therapy, whereas the remaining 50 % would be candidates for more aggressive therapy. The challenge is to identify these populations before the complications have occurred and to find therapies that can effectively prevent these complications.

Biomarkers might also be developed to identify patients that are likely to experience disease recurrence after treatment. Several studies have shown that in patients with quiescent disease, increased concentrations of fecal calprotectin predict disease relapse within 12 months, particularly in patients with UC [52]. Early studies reported that increased concentrations of fecal calprotectin identified patients that underwent relapse within 12 months with approximately 90 % sensitivity and 82 % specificity [53]. Costa, et al. reported that increased levels of fecal

calprotectin had a positive-predictive value of 81 % and a negative-predictive value of 90 % for relapse of UC; in patients with CD, the positive predictive value was 87 % and the negative-predictive value was 43 %.

In addition to predicting disease relapse, biomarkers might be used to predict response to therapy. For example, ASCA, pANCA and other antibodies have also been tested for their association with responses to specific therapies. Taylor et al. demonstrated a lower response rate among patients with CD treated with infliximab who had positive results from a test for pANCA [54]. Most recently, in a study of children with either CD or UC, presence of a positive test for pANCA was again associated with a lower likelihood of responding to infliximab. Results of tests for anti-I2, but not ASCA, pANCA, or OmpC, were associated with response to fecal diversion (94% response among patients with anti-I2 antibodies vs. 18 % response among those without anti-I2 antibodies).

Medical therapy does play a critical role in the treatment of patients with IBDs, and biological drugs such as infliximab, adalimumab, vedolizumab and ustekinumab targeting different signaling pathways have brought a revolutionary influence on the treatment of IBDs. To achieve the goal of precision treatment, studies regarding new therapeutic agents, optimal therapeutic targets, different disease patterns, and patients' choices are in desperate need. With the increasing understanding of the pathogenesis of IBDs, new pathophysiology has been found. What's more, considering different healthcare systems and financial structures around the world, more multidimensional prediction and monitoring tools integrating multi-omics data should be developed. Thus, an interdisciplinary collaboration between medical scientists, bioinformaticians, economists and manufacturers is encouraged. By achieving these endeavors, we are getting closer and closer to the goal of precision medicine in IBDs.

Conclusion

IBDs encompassed a variety of phenotypes that affect individuals to varying degrees. Differences in gut microbiota composition between IBDs patients and healthy individuals have been found, with reduced biodiversity of commensal microbes and colonization of opportunistic microbes in IBDs patients. Beyond innate immunity, adaptive immunity also has a direct role in the pathogenesis of IBDs. An overwhelming number of effector cells, such as Th17 cells and ILCs, induce self-destructive immunity; therefore, a cure for IBDs would involve understanding how immunological balance is controlled. Because correct IBDs management is important for disease prognosis, non-invasive serum biomarkers have been extensively investigated to discover new features for disease diagnosis, subclassification, and disease prognosis. Markers useful for monitoring disease activity and predicting treatment outcome and complications. Despite extensive research, current IBDs biomarkers are far from ideal. Since individual biomarkers lack specificity or sensitivity, the combination of different biomarkers can improve the validity of assessing disease course. On the other hand, future directions in IBDs management may rely heavily on the development of multi-omics analyses. A large number of data processing workflows require the help of artificial intelligence. Further research is needed to identify new biomarkers with lower cost and better availability. Attention should be paid to predicting complications before disease progression and assessing the risk of readmission and postoperative recurrence. Of note, methods for identifying new biomarkers and clinical trial endpoints should be rigorous and standardized. Assessment of disease activity and treatment response needs to be objective. Newly discovered markers should be confirmed in multicenter international collaborations before being used in clinical practice.

References

1. Bunker JJ, Flynn TM, Koval JC, Shaw DG, Meisel M, McDonald BD, Ishizuka IE, Dent AL, Wilson PC, Jabri B, Antonopoulos DA, Bendelac A. Innate and Adaptive Humoral Responses Coat Distinct Commensal Bacteria with Immunoglobulin A. *Immunity.* 2015;43:541–553. DOI:10.1016/j.immuni.2015.08.007.

2. Vermeire S, Van Assche G, Rutgeerts P. Laboratory markers in IBD: useful, magic, or unnecessary toys? *Gut.* 2006;55:426–431. DOI:10.1136/gut.2005.069476.

3. Torres J, Bonovas S, Doherty G, Kucharzik T, Gisbert JP, Raine T, Adamina M, Armuzzi A, Bachmann O, Bager P, et al. ECCO Guidelines on Therapeutics in Crohn's Disease: Medical Treatment. *Journal of Crohn's & Colitis.* 2020;14(1):4–22. DOI:10.1093/ecco-jcc/jjz180.

4. Gisbert JP, Chaparro M. Clinical Usefulness of Proteomics in Inflammatory Bowel Disease: A Comprehensive Review. *Journal of Crohn's & Colitis.* 2019;13(3):374–384. DOI:10.1093/ecco-jcc/jjy158.

5. Nakov R, Velikova T, Nakov V, Ianiro G, Gerova V, Tankova L. Serum trefoil factor 3 predicts disease activity in patients with ulcerative colitis. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences.* 2019;23(2):788–794. DOI:10.26355/eurrev_201901_16893.

6. Lichtenstein GR, Loftus EV, Isaacs KL, Regueiro MD, Gerson LB, Sands BE. ACG Clinical Guideline: Management of Crohn's Disease in Adults. *The American Journal of Gastroenterology.* 2018;113(4):481–517. DOI:10.1038/ajg.2018.27.

7. Rubin DT, Ananthakrishnan AN, Siegel CA, Sauer BG, Long MD. ACG Clinical Guideline: Ulcerative Colitis in Adults. *The American Journal of Gastroenterology.* 2019;114(3):384–413. DOI:10.14309/ajg.0000000000000152.

8. Huang JY, Lee SM, Mazmanian SK. The human commensal Bacteroides fragilis binds intestinal mucin. *Anaerobe*. 2011;17(4):137–141. DOI:10.1016/j.anaerobe.2011.05.017.

9. Hampe J, Franke A, Rosenstiel P, Till A, Teuber M, Huse K, Albrecht M, Mayr G, De La Vega FM, Briggs J, et al. A genome-wide association scan of nonsynonymous SNPs identifies a susceptibility variant for Crohn disease in ATG16L1. *Nature Genetics* 2007;39(2):207–211. DOI:10.1038/ng1954.

10. de Lange KM, Moutsianas L, Lee JC, Lamb CA, Luo Y, Kennedy NA, Jostins L, Rice DL, Gutierrez-Achury J, Ji SG, Heap G, et al. Genome-wide association study implicates immune activation of multiple integrin genes in inflammatory bowel disease. *Nature genetics* 2017;49(2):256–261. DOI:10.1038/ng.3760.

11. Mesko B, Poliska S, Szegedi A, Szekanecz Z, Palatka K, Papp M, Nagy L. Peripheral blood gene expression patterns discriminate among chronic inflammatory diseases and healthy controls and identify novel targets. *BMC Medical genomics*. 2010:3(15):1–13. DOI:10.1186/1755-8794-3-15.

12. Burakoff R, Hande S, Ma J, Banks PA, Friedman S, Makrauer F, Liew CC. Differential Regulation of Peripheral Leukocyte Genes in Patients with Active Crohn's Disease and Crohn's Disease in Remission. *Journal of clinical gastroenterology.* 2010;44(2):120–126. DOI:10.1097/MCG.0b013e3181a9ef53.

13. Burakoff R, Pabby V, Onyewadume L, Odze R, Adackapara C, Wang W, Friedman S, Hamilton M, Korzenik J, Levine J, et al. Blood-based Biomarkers Used to Predict Disease Activity in Crohn's Disease and Ulcerative Colitis. *Inflammatory Bowel Diseases.* 2015;21(5):1132–1140. DOI:10.1097/MIB.0000000000000340.

14. van Lierop PP, Swagemakers SM, de Bie CI, Middendorp S, van Baarlen P, Samsom JN, van Ijcken WF, Escher JC, van der Spek PJ, Nieuwenhuis EE. Gene Expression Analysis of Peripheral Cells for Subclassification of Pediatric Inflammatory Bowel Disease in Remission. *PLoS ONE*. 2013;8(11):1–8. DOI:10.1371/journal.pone.0079549.

15. Palmela C, Chevarin C, Xu Z, Torres J, Sevrin G, Hirten R, Barnich N, Ng SC, Colombel JF. Adherent-invasive Escherichia coli in inflammatory bowel disease. *Gut.* 2018;67(3):574–587. DOI:10.1136/gutjnl-2017-314903.

16. Chervy M, Barnich N, Denizot J. Adherent-Invasive E. coli: Update on the Lifestyle of a Troublemaker in Crohn's Disease. *International Journal of Molecular Sciences.* 2020;21(10):1–34. DOI:10.3390/ijms21103734.

17. Boleij A, Hechenbleikner EM, Goodwin AC, Badani R, Stein EM, Lazarev MG, Ellis B, Carroll KC, Albesiano E, Wick EC, Platz EA, Pardoll DM, Sears CL. The Bacteroides fragilis toxin gene is prevalent in the colon mucosa of colorectal cancer patients. *Clinical Infectious Diseases : an Official Publication of the Infectious Diseases Society of America.* 2015;60(2):208–215. DOI:10.1093/cid/ciu787.

18. Pandey H, Jain D, Tang DWT, Wong SH, Lal D. Gut microbiota in pathophysiology, diagnosis, and therapeutics of inflammatory bowel disease. *Intestinal research.* 2024;22(1):15–43. DOI:10.5217/ir.2023.00080.

19. Chung L, Thiele Orberg E, Geis AL, Chan JL, Fu K, DeStefano Shields CE, Dejea CM, Fathi P, Chen J, Finard BB, Tam AJ, McAllister F, Fan H, Wu X, et al. Bacteroides fragilis Toxin Coordinates a Pro-carcinogenic Inflammatory Cascade via Targeting of Colonic Epithelial Cells. *Cell Host Microbe.* 2018;23(2):203–214. DOI:10.1016/j.chom.2018.01.007.

20. Henke MT, Kenny DJ, Cassilly CD, Vlamakis H, Xavier RJ, Clardy J. Ruminococcus gnavus, a member of the human gut microbiome associated with Crohn's disease, produces an inflammatory polysaccharide. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2019;116(26):12672–12677. DOI:10.1073/pnas.1904099116.

21. Hall AB, Yassour M, Sauk J, Garner A, Jiang X, Arthur T, Lagoudas GK, Vatanen T, Fornelos N, Wilson R, Bertha M, Cohen M, Garber J, Khalili H, Gevers D, et al. A novel Ruminococcus gnavus clade enriched in inflammatory bowel disease patients. *Genome Medicine.* 2017;9(1):103. DOI:10.1186/s13073-017-0490-5.

22. Pittayanon R, Lau JT, Leontiadis GI, Tse F, Yuan Y, Surette M, Moayyedi P. Differences in Gut Microbiota in Patients With vs Without Inflammatory Bowel Diseases: A Systematic Review. *Gastroenterology.* 2020;158(4):930–946. DOI:10.1053/j.gastro.2019.11.294.

23. Sokol H, Pigneur B, Watterlot L, Lakhdari O, Bermúdez-Humarán LG, Gratadoux JJ, Blugeon S, Bridonneau C, Furet JP, Corthier G, Grangette C, Vasquez N, et al. Faecalibacterium prausnitzii is an anti-inflammatory commensal bacterium identified by gut microbiota analysis of Crohn disease patients. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2008;105(43):16731–16736. DOI:10.1073/pnas.0804812105.

24. Saunus JM, Wagner SA, Matias MA, Hu Y, Zaini ZM, Farah CS. Early activation of the interleukin-23-17 axis in a murine model of oropharyngeal candidiasis. *Molecular Oral Microbiology.* 2010;25(5):343–356. DOI:10.1111/j.2041-1014.2010.00570.x.

25. Conti HR, Shen F, Nayyar N, Stocum E, Sun JN, Lindemann MJ, Ho AW, Hai JH, Yu JJ, Jung JW, Filler SG, Masso-Welch P, Edgerton M, Gaffen SL. Th17 cells and IL-17 receptor signaling are essential for mucosal host defense against oral candidiasis. *The Journal of Experimental Medicine.* 2009;206(2):299–311. DOI:10.1084/jem.20081463.

26. Lee SH, Kwon JE, Cho ML. Immunological pathogenesis of inflammatory bowel disease. *Intestinal Research.* 2018;16(1):26–42. DOI:10.5217/ir.2018.16.1.26.

27. Bishop JL, Roberts ME, Beer JL, Huang M, Chehal MK, Fan X, Fouser LA, Ma HL, Bacani JT, Harder KW. Lyn activity protects mice from DSS colitis and regulates the production of IL-22 from innate lymphoid cells. *Mucosal Immunology.* 2014;7(2):405–416. DOI:10.1038/mi.2013.60.

28. Zindl CL, Lai JF, Lee YK, Maynard CL, Harbour SN, Ouyang W, Chaplin DD, Weaver CT. IL-22-producing neutrophils contribute to antimicrobial defense and restitution of colonic epithelial integrity during colitis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2013;110(31):12768–12773. DOI:10.1073/pnas.1300318110.

29. Heller F, Florian P, Bojarski C, Richter J, Christ M, Hillenbrand B, Mankertz J, Gitter AH, Bürgel N, Fromm M, Zeitz M, Fuss I, Strober W, Schulzke JD. Interleukin-13 is the key effector Th2 cytokine in ulcerative colitis that affects epithelial tight junctions, apoptosis, and cell restitution. *Gastroenterology.* 2005;129(2):550–564. DOI:10.1016/j.gastro.2005.05.002.

30. Dambacher J, Beigel F, Zitzmann K, De Toni EN, Göke B, Diepolder HM, Auernhammer CJ, Brand S. The role of the novel Th17 cytokine IL-26 in intestinal inflammation. *Gut.* 2009;58(9):1207–1217. DOI:10.1136/gut.2007.130112.

31. Leung JM, Davenport M, Wolff MJ, Wiens KE, Abidi WM, Poles MA, Cho I, Ullman T, Mayer L, Loke P. IL-22-producing CD4+ cells are depleted in actively inflamed colitis tissue. *Mucosal Immunology.* 2014;7(1):124–133. DOI:10.1038/mi.2013.31.

32. Neurath MF. Neurath. Cytokines in inflammatory bowel disease. *Nature Reviews Immunology.* 2014;14(5):329–342. DOI:10.1038/nri3661.

33. Angriman I, Scarpa M, D'Incà R, Basso D, Ruffolo C, Polese L, Sturniolo GC, D'Amico DF, Plebani M. Enzymes in feces: useful markers of chronic inflammatory bowel disease. *Clinica Chimica Acta.* 2007;381(1):63–68. DOI:10.1016/j.cca.2007.02.025.

34. Gisbert JP, McNicholl AG, Gomollon F. Questions and answers on the role of fecal lactoferrin as a biological marker in inflammatory bowel disease. *Inflammatory Bowel Diseases.* 2009;15(11):1746–1754. DOI:10.1002/ibd.20920.

35. Joishy M, Davies I, Ahmed M, Wassel J, Davies K, Sayers A, Jenkins H. Fecal calprotectin and lactoferrin as noninvasive markers of pediatric inflammatory bowel disease. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 2009;48(1):48–54. DOI:10.1097/MPG.0b013e31816533d3.

36. Lewis JD. C-reactive protein: anti-placebo or predictor of response. *Gastroenterology.* 2005;129(3):1114–1116. DOI:10.1053/j.gastro.2005.07.041.

37. Mitsuyama K, Niwa M, Takedatsu H, Yamasaki H, Kuwaki K, Yoshioka S, Yamauchi R, Fukunaga S, Torimura T. Antibody markers in the diagnosis of inflammatory bowel disease. *World Journal of Gastroenterology*. 2016;22(3):1304–1310. DOI:10.3748/wjg.v22.i3.1304.

38. Smids C, Horjus Talabur Horje CS, Groenen MJM, van Koolwijk EHM, Wahab PJ, van Lochem EG. The value of serum antibodies in differentiating inflammatory bowel disease, predicting disease activity and disease course in the newly diagnosed patient. *Scandinavian Journal of Gastroenterology.* 2017;52(10):1104–1112. DOI:10.1080/00365521.2017.1344875.

39. Peeters M, Joossens S, Vermeire S, Vlietinck R, Bossuyt X, Rutgeerts P. Diagnostic value of anti-Saccharomyces cerevisiae and antineutrophil cytoplasmic autoantibodies in inflammatory bowel disease. *The American Journal of Gastroenterology*. 2001;96(3):730–734. DOI:10.1111/j.1572-0241.2001.03613.x.

40. Schulte-Pelkum J, Radice A, Norman GL, López Hoyos M, Lakos G, Buchner C, Musset L, Miyara M, Stinton L, Mahler M. Novel clinical and diagnostic aspects of antineutrophil cytoplasmic antibodies. *Journal of Immunology Research.* 2014;2014:185416. DOI:10.1155/2014/185416.

41. Fleshner P, Ippoliti A, Dubinsky M, Vasiliauskas E, Mei L, Papadakis KA, Rotter JI, Landers C, Targan S. Both preoperative perinuclear antineutrophil cytoplasmic antibody and anti-CBir1 expression in ulcerative colitis patients influence pouchitis development after ileal pouch-anal anastomosis. *Clinical Gastroenterology and Hepatology.* 2008;6(5):561–568. DOI:10.1016/j.cgh.2008.01.002.

42. Däbritz J, Bonkowski E, Chalk C, Trapnell BC, Langhorst J, Denson LA, Foell D. Granulocyte macrophage colony-stimulating factor auto-antibodies and disease relapse in inflammatory bowel disease. *The American Journal of Gastroenterology.* 2013;108(12):1901–1910. DOI:10.1038/ajg.2013.360.

43. Florholmen JR, Johnsen KM, Meyer R, Olsen T, Moe ØK, Tandberg P, Gundersen MD, Kvamme JM, Johnsen K, Løitegård T, Raschpichler G, Vold C, Sørbye SW, Goll R. Discovery and validation of mucosal TNF expression combined with histological score - a biomarker for personalized treatment in ulcerative colitis. *BMC Gastroenterology.* 2020;20(1):321. DOI:10.1186/s12876-020-01447-0.

44. Quinton JF, Sendid B, Reumaux D, Duthilleul P, Cortot A, Grandbastien B, Charrier G, Targan SR, Colombel JF, Poulain D. Anti-Saccharomyces cerevisiae mannan antibodies combined with antineutrophil cytoplasmic autoantibodies in inflammatory bowel disease: prevalence and diagnostic role. *Gut.* 1998;42(6):788–791. DOI:10.1136/gut.42.6.788.

45. Annese V, Piepoli A, Perri F, Lombardi G, Latiano A, Napolitano G, Corritore G, Vandewalle P, Poulain D, Colombel JF, Andriulli A. Anti-Saccharomyces cerevisiae mannan antibodies in inflammatory bowel disease: comparison of different assays and correlation with clinical features. *Alimentary Pharmacology & Therapeutics.* 2004;20(10):1143–1152. DOI:10.1111/j.1365-2036.2004.02258.x.

46. Prideaux L, Kamm MA, De Cruz P, van Langenberg DR, Ng SC, Dotan I. Inflammatory bowel disease serology in Asia and the West. *World Journal of Gastroenterology.* 2013;19(37):6207–6213. DOI:10.3748/wjg.v19.i37.6207.

47. Malham M, Lilje B, Houen G, Winther K, Andersen PS, Jakobsen C. The microbiome reflects diagnosis and predicts disease severity in paediatric onset inflammatory bowel disease. *Scandinavian Journal of Gastroenterology.* 2019;54(8):969–975. DOI:10.1080/00365521.2019.1644368.

48. Røseth AG, Aadland E, Grzyb K. Normalization of faecal calprotectin: a predictor of mucosal healing in patients with inflammatory bowel disease. *Scandinavian Journal of Gastroenterology.* 2004;39(10):1017–1020. DOI:10.1080/00365520410007971.

49. Ferrante M, Henckaerts L, Joossens M, Pierik M, Joossens S, Dotan N, Norman GL, Altstock RT, Van Steen K, Rutgeerts P, Van Assche G, Vermeire S. New serological markers in inflammatory bowel disease are associated with complicated disease behaviour. *Gut.* 2007;56(10):1394–1403. DOI:10.1136/gut.2006.108043.

50. Sipponen T, Björkesten CG, Färkkilä M, Nuutinen H, Savilahti E, Kolho KL. Faecal calprotectin and lactoferrin are reliable surrogate markers of endoscopic response during Crohn's disease treatment. *Scandinavian Journal of Gastroenterology.* 2010;45(3):325–331. DOI:10.3109/00365520903483650.

51. Zhang H, Zeng Z, Mukherjee A, Shen B. Molecular diagnosis and classification of inflammatory bowel disease. *Expert Review of Molecular Diagnostics.* 2018;18(10):867–886. DOI:10.1080/14737159.2018.1516549.

52. Walkiewicz D, Werlin SL, Fish D, Scanlon M, Hanaway P, Kugathasan S. Fecal calprotectin is useful in predicting disease relapse in pediatric inflammatory bowel disease. *Inflammatory Bowel Diseases.* 2008;14(5):669–673. DOI:10.1002/ibd.20376.

53. Tibble JA, Sigthorsson G, Bridger S, Fagerhol MK, Bjarnason I. Surrogate markers of intestinal inflammation are predictive of relapse in patients with inflammatory bowel disease. *Gastroenterology.* 2000;119(1):15–22. DOI:10.1053/gast.2000.8523.

54. Taylor KD, Plevy SE, Yang H, Landers CJ, Barry MJ, Rotter JI, Targan SR. ANCA pattern and LTA haplotype relationship to clinical responses to anti-TNF antibody treatment in Crohn's disease. *Gastroenterology.* 2001;120(6):1347–1355. DOI:10.1053/gast.2001.23966.

Статья поступила в редколлегию 28.05.2024.
Received by editorial board 28.05.2024.

УДК 330.15+502.173

ЭКОСИСТЕМНЫЙ УЧЕТ ЛЕСОВ В УСТОЙЧИВОМ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИИ: ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ И РАЗВИТИЕ

Х. А. БАХЕД[1)], ***В. М. ЯЦУХНО***[2)]

[1)] *Белорусский государственный технологический университет,*
ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь
[2)]*Белоруский государственный университет,*
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

В исследовании рассматриваются актуальные вопросы формирования экосистемного учета лесов в контексте становления и развития природно-экономического учета. Данной проблеме посвящены многочисленные научные работы как белорусских, так и зарубежных ученых. Однако экосистемный учет лесов с позиций природного и формирующего экологического учета исследуется не в полной мере. Предпринята попытка определить концептуальные и методологические основы построения экосистемного учета лесов как функции лесопользования и структурного элемента системы национальных счетов (СНС). Обращается внимание на аргументацию авторов в отношении рассмотрения содержания и отличительных черт экологического учета, объектом которого являются экологический капитал и экосистемные услуги. Различие между природным и экологическим учетом имеет принципиальное значение для раздельного

Образец цитирования:
Бахед ХА, Яцухно ВМ. Экосистемный учет лесов в устойчивом природопользовании: основное содержание и развитие. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;2:79–85 (на англ.).
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-79-85

For citation:
Bahedh HA, Yatsukhno VM. Ecosystem accounting of forests in sustainable environmental management: basic content and development. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;2:79–85.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-79-85

Авторы:
Бахед Хайдер Азиз Бахед – кандидат экономических наук, доцент; доцент кафедры менеджмента, технологий бизнеса и устойчивого развития.
Валентин Минович Яцухно – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий научно-исследовательской лабораторией экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики.

Authors:
Bahedh Hayder A. Bahedh, PhD (economy), docent; associate professor at the department of management, business technologies and sustainable development.
Bahtdh55@gmail.com
Valentin M. Yatsukhno, PhD (agriculte), docent; head of the landscape ecology laboratory, faculty of geography and geoinformation.
yatsukhno@bsu.by

выражения ценности природных ресурсов разных сфер (экономической и экологической), динамики жизненно важных и незаменимых экосистемных услуг и в целом экологического капитала. Отдельно изучено построение обобщенных счетов экосистемных услуг на основе принципов системы природно-экономического учета (СПЭУ) [1]. Авторами предлагается метод физического и стоимостного учета лесов. В качестве основного носителя экосистемных услуг лесов выступает древесный запас и его динамика во времени, а в основе стоимостного измерения лежит экологическая рента. Данный методический подход основан на теории воспроизводственной ренты и имеет свое практическое воплощение в ТКП 17.02-10-2013(02120) «Порядок проведения оценки экосистемных услуг и определения ценности биологического разнообразия», разработанном под научным руководством профессора А. В. Неверова.

Ключевые слова: экосистемные услуги; леса; природно-экономический учет; экологический капитал; лесные ресурсы; экологический актив.

ECOSYSTEM ACCOUNTING OF FORESTS IN SUSTAINABLE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT: BASIC CONTENT AND DEVELOPMENT

H. A. BAHEDH[a], ***V. M. YATSUKHNO***[b]

[a]*Belarusian State Technological University,*
13a Sverdlova Street, Minsk 220006, Belarus
[b]*Belarusian State University,*
4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus
Corresponding author: V. M. Yatsukhno (yatsukhno@bsu.by)

The presented article examines the topical issues of the formation of ecosystem accounting of forests in the context of the formation and development of environmental and economic accounting. Numerous scientific works by both Belarusian and foreign scientists are devoted to this problem. However, ecosystem accounting of forests, from the formative environmental accounting, is not fully investigated. In this paper, an attempt is made to define the conceptual and methodological foundations for building ecosystem accounting of forests as a function of forest management and a structural element of system national accounting (SNA). It is important to pay attention to the authors' arguments regarding the consideration of the content and distinctive features of environmental accounting, the object of which is environmental capital and ecosystem services. The difference between economic and environmental accounting is of fundamental importance for the separate expression of the value of natural resources using in different spheres and as well as dynamics of vital and irreplaceable ecosystem services and, in general, environmental capital. The construction of generalized accounts of ecosystem services based on the principles of the system environmental and economical accounting (SEEA) [1]. The authors propose a method of physical and cost accounting of forests. The main carrier of ecosystem services of forests is the wood stock and its dynamics over time and the cost measurement is based on environmental rent. This methodological approach is based on the theory of reproductive rent and has its practical output in the TCP 17.02-10-2013(02120) «Procedure for conducting valuation, ecosystem services and determining the value of biological diversity» developed under the scientific guidance of prof. A. V. Neverov.

Keywords: ecosystem services; forests; natural economic accounting; environmental capital; forest resources; environmental asset.

Introduction

Recently, with the emergence of new priorities to achieve sustainable development goals, such as green and circular economy, climate change mitigation, biodiversity conservation, and prevention of environmental degradation, research and practical recommendations on the assessment and use of resource and ecological potential, functions and services of ecosystems [2]. This is largely due to the negative consequences of the transformation and disappearance of the latter, primarily forest ecosystems. The economic assessment of forest ecosystems that has existed until now was determined only by the value removed from them and sold on the timber market. At the same time, the valuable ecosystem services provided by forest vegetation and its ecotopes, ensuring the conservation of biodiversity, climate regulation, soil protection from degradation, recreational, aesthetic values, and the maintenance of natural, cultural and sacred heritage, were completely ignored. Often these services significantly exceed the results of their production and operation. Thus, according to the UN FAO, the share of the forest sector in global GDP exceeds 1.52 trillion. US dollars, and taking into account the ecosystem services provided by forests, it is estimated at 7.5 trillion. US dollars [3].

The multifunctionality of forest ecosystems provides society with a variety of socio-economic and environmental benefits and benefits, which are an economic category called «natural capital». Typically, this term

refers to the economic value, including its value expression, of ecosystems, taking into account their resource and environmental potential. However, taking into account the importance and specificity of the ecosystem functions of forests, the authors of the article support the idea of the need for separate assessment of their natural and ecological ecosystem accounting. Natural accounting covers the timber stock, its territorial distribution and cost measurement, and environmental accounting records the values of the ecosystem, provisioning, regulating and cultural services provided by forests [4]. In this regard, it is advisable to distinguish, along with natural capital, environmental capital, which has an independent status. Thus, natural ecosystem accounting of forests reflects a purely economic (commercial) approach to forest management, and ecosystem accounting reflects its environmental and economic interest, which consists in determining the value of forest ecosystem services [5]. This methodological approach can be an effective tool for maintaining national accounts in the field of forestry and environmental activities.

Materials and research methods

The main sources of information in preparing the article were the results of an analytical review carried out by its authors of foreign and domestic literature on the methodological framework and assessment of ecosystem services of forest resources. To determine indicators of the physical measurement of ecosystem services of forests in Belarus, statistical information on the area, productivity and reserves of wood raw materials was used, as well as their cost expression indices of the value of the forest as an ecological object [6; 7]. In order to use the information and value of forest ecosystem services and their accounting in state statistics and forestry bodies, they were harmonized accordingly with the requirements and methodology approved by the UN Statistical Committee, the System of Natural and Economic Accounting (SEEA) in relation to all biological assets, including forest vegetation [1]. The calculation of the value of forest ecosystem services was carried out in accordance with the recently approved Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus «On the economic assessment of ecosystem services» [8]. The calculation is based on the rental approach to determining the value of forest resources, separating from the economic (differential) rent the value of the ecosystem services they provide [9; 10].

Results and its discussion

Among the priority measures to achieve the goals of sustainable development and the transition to a green economy, along with measures to stimulate socio-economic growth and improve human well-being, is the conservation and restoration of natural ecosystems, assessment, accounting and use of the ecosystem services they provide. The latter modern economic science and practice understand non-market material and intangible benefits and benefits that humanity receives from ecosystems to provide them with natural resources, a healthy and comfortable living environment, regulation of natural processes, maintaining sustainability and environmental protection, etc., which complement the economic the value of natural potential. In this regard, issues related to the management of ecosystem services are currently becoming very relevant and practically in demand, namely: their statistical accounting, functions performed, environmental and economic assessment, formation of a market for such services, identification of potential sellers and buyers, as well as implementation mechanisms and tools for their compensation.

The lack of indicators of the value of the entire complex of ecosystem services provided (providing, regulating, supporting, cultural) leads to an underestimated reflection of environmental damage and external costs in price. It is known that with adequate economic consideration of the environmental factor, the efficiency of resource use is noticeably higher than when increasing the environmental intensity of the economy, which has been confirmed by the development of a number of countries in the last few decades [11]. The prevailing opinion so far about maintaining technogenic, nature-intensive development requires more and more funds for nature-exploiting complexes and industries, the functioning of which is often accompanied by the depletion and degradation of natural complexes and their individual components. In turn, this requires additional costs to maintain the same level of exploitation and extraction of natural resources, including forests. Other, resource-saving ways of economic development are needed, which should be based on taking into account environmental factors. This is the goal of the Millennium Ecosystem Assessment, developed under the auspices of the UN, UNEP, IUCN, FAO, and the International Monetary Fund, developed in 2005, which emphasizes: «...Modern knowledge and technologies can significantly reduce human impact on ecosystems. However, their potential is unlikely to be fully exploited until then, but ecosystem services will continue to be viewed as free and infinite, and their value will not be fully taken into account» [12].

This conclusion significantly expands the content of the concept «natural capital» used until recently, which was interpreted only as a resource category with a value reduced to world prices for these resources. Today, it is increasingly realized that natural capital includes not only a resource component, but also a wide range

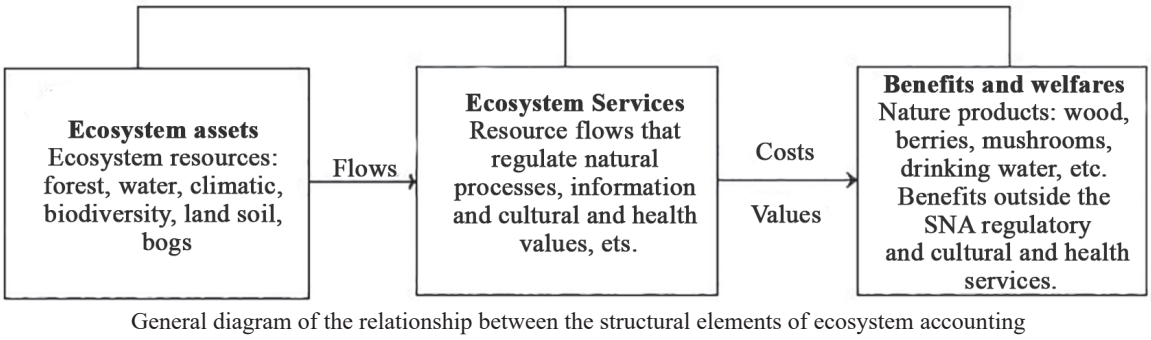
of ecosystem services provided, necessary not only for the self-sustainment of natural resources, but also for anthropogenically sustainable use of resources at different levels of environmental organization [13].

Among a wide range of areas that require disclosure of the content and use of ecosystem services provided, the most significant is the determination of environmental and economic value, including the valuation of benefits received in the process of functioning of forest ecosystems with the subsequent integration of their assets into the system of national accounts [14; 15]. It should be recognized that the last area is among the most poorly developed issues.

Despite the existence of many developed approaches and methodologies that could be used in assessing ecosystem services, they have not been widely used. This is due not only to the complexity and complexity of the problem being solved, the need to take into account ethical and cultural aspects, but also to the fact that the services in question and their assets are not objects of market turnover. In this regard, non-market methods for determining price parameters must be implemented and applied. The most famous is the assessment of ecosystems based on total economic value, recommended by the UN Statistical Commission when maintaining the System of Natural and Economic Accounts (SEEA-12) [1]. The latter serves as an internationally accepted method for accounting for natural capital within national accounts. SEES-12 involves the development of ecosystem services assessments and the inclusion of ecosystem accounts as a separate section. One of the motivations determining the need to study natural resource assets, including forests, was the concern of the world community for the continued intensification of environmental management, leading to the reduction and degradation of environmental components and thereby reducing the value of natural resources. In the report from the previously existing system of national accounts (SNA), which reflected only natural resource value, in SEES-12, environmental-economic accounting expands the category of assets by including all ecosystems that perform environmental functions and services provided in the form of material and intangible assets. This document is of a recommendatory nature, but its main provisions are reflected in the practice of national accounting in many countries, including Belarus, especially in terms of physical accounting of forest and water resources.

The initial category of ecosystem accounting is an ecosystem service, which determines the content of an ecosystem asset and the multidirectional satisfaction of environmental needs (benefits – benefits, revenues, income).

The relationship between ecosystem services, ecosystem assets and benefits can be schematically represented as the following diagram (Fig.).



General diagram of the relationship between the structural elements of ecosystem accounting

As can be seen from the presented diagram (figure), flows of ecosystem resources (in the form of an ecosystem asset) are transformed into various types of benefits. There is an organic connection between the concepts of «ecosystem service» and «ecosystem utility function».

An ecosystem service is the annual production of an asset, and an ecosystem useful function is the asset itself, its ability to produce and «self-reproduce». Etymologically, these two words (service and function) express the same meaning: the manifestation of the properties of a natural resource, the performance of useful work by it. Depending on the set of utilities (benefits) of the ecosystem and their participation in meeting human needs, two fundamentally different assets are formed: economic and environmental. Accordingly, there are two fundamentally different accounts: economic and environmental.

In the system of ecosystem accounting, natural capital, expressed by its nominal value, is characterized by a dual feature: on the one hand, being a purely economic category of economic activity, on the other hand, it is determined by environmental values [16]. In this regard, in many scientific studies devoted to ecosystem services, the latter are interpreted from the perspective of three characteristic functions of natural capital: 1) resource, according to which the production of goods and services is ensured as a result of the use of natural resources; 2) ecosystem-providing environment-forming and regulatory functions with natural components; 3) social – services of nature related to its cultural, historical, scientific, recreational and spiritual aspects. Based on this, a classification of ecosystem services was proposed, divided into 4 groups: providing, regulating, supporting and cultural. This classification was first reflected in the International Program «Millennium Ecosystem Assessment» developed in 2005 [17].

Other most used classifications include the one developed by The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB) project [18], and the third one called the Common International Classification of Ecosystem Services, CICES). The CICES classification was carried out under the auspices of the European Environment Agency [19], has a 5-level hierarchical structure, consisting of sections, divisions, groups, classes and class types, and is most consistent with and reflects the structural and functional features of Belarusian ecosystems and the services they provide. According to the above classification, 83 types of ecosystem service classes are identified, which are currently used in assessing the six most common ecosystems on the European continent: forest, agricultural, wetland, marine, urban, soil ecosystems.

It should be recognized that despite the rapidly developing area of identification, assessment, mapping and practice of applying the results of ecosystem services in foreign, including neighboring countries, in the Republic of Belarus all these issues are at the initial stage of their implementation. All the necessary prerequisites for intensifying work in this area exist. First of all, this concerns the presence in the structure of the republic's land fund of natural complexes and ecosystems, which occupy 11.84 thousand hectares or 57 % of the country's territory, represented by forests, trees and shrubs, natural meadows, swamps, aquatic and agricultural ecosystems [20].

Some experience in assessment, including its monetary expression and accounting of ecosystem services, has been accumulated in our republic. Thus, for the first time, it was recommended to calculate the value of ecosystem services and biological diversity, regulated by a specially developed technical regulatory act: TKP 17.02-10-2013 (02120) «Environmental protection and natural resource management. The procedure for determining the valuation of ecosystem services and biological diversity». Depending on the purposes of the valuation of ecosystem services and the scope of application of its results, two types were used: integral valuation and the cost value of biodiversity used to justify alternative options for their use and element-by-element valuation related to taking into account the value of specific ecosystems (forest, meadow, swamp, aquatic). In the above-mentioned TCP for a detailed calculation of the cost of ecosystem services for the four main natural types of ecosystems and their individual functional properties (carbon dioxide absorption, water treatment and their assimilative capacity), formulas are provided by which the cost is determined such services.

This problem has been most fully solved in relation to forest ecosystems, the area of which in the Republic of Belarus is 8.34 million hectares or 40.1 %, due to which a fairly high ecological asset is formed. Let us briefly consider the main stages and approaches to the assessment, its content and the state of ecosystem accounting in national statistical activities. First of all, in contrast to the SEEA recommendations, the forests of the republic are considered as an independent natural complex, including, along with forest, tree and shrub vegetation, living ground cover, wild animals and microorganisms within the forest fund [21].

This emphasizes the polystructural nature and multifunctional significance of forest ecosystems, which not only have bioproductive potential, but are also characterized by water protection, climate regulation, protective, recreational, aesthetic, scientific and educational properties and suppliers of non-wood by-products. In this regard, forests are distinguished, taking into account their location in landscapes, into categories: operational, protective, recreational and environmental. For each forest category, its own differentiation of ecosystem services according to the degree of their importance is proposed, which made it possible, based on expert assessment, to determine the importance of ecosystem services in each forest category (Table).

Preliminary expert assessment of ecosystem services of different categories of forests [22]

Forest category	Ecosystem services				Sum of points	Value factor
	providing	regulating	cultural	supportive		
Environmental	+	+ + + +	+ + + +	+ + + +	13	1,3
Recreational and health	+ + +	+ +	+ + + +	+ +	12	1,2
Protective	+ +	+ + +	+ + +	+ + +	11	1,1
Operational	+ + + +	+ +	+ +	+ +	10	1,0

Note. Not high (+); moderately high (++); high (+++); very high (++++).

As follows from the table, the initial basis for measuring the value of different categories are operational forests with a total score of 10. The ratio of the sum of points of the specified category of forests with the sum of points with other categories of forests determines the coefficient of the value of ecosystem services of a particular category of forests.

To perform a cost measurement of forest ecosystem services, the concept of total economic value is most often used, combining the direct cost of using ecosystems, indirect cost of use, potential value, and cost of existence [23]. The concept represents an integrated approach to assessing nature as a whole, including resource ecosystem functions, regulatory functions and cultural services of nature.

The formula for total economic value can be presented as:

$$TEV = DV + IV + OV + EV,$$

where DV is the direct cost of use, IV is the indirect cost of use; OV – value of deferred alternative (potential value); EV – cost of existence.

The advantage of this technique is that, using cost indicators, it is possible to trace economic changes in environmental services, i.e. perform an analysis of the costs and benefits obtained from them at all levels of management. At the same time, the disadvantage of this approach is the combined use of both analytical methods for calculating cost indicators and methods based on sociological research, which reduces the accuracy of estimates. In addition, the obvious shortcomings of the methods include the use of simple summation of the value of both functions and ecosystem services, without taking into account the fact that in reality one function can provide several ecosystem services. In addition, the concept of «general economic assessment» suffers from eclecticism, incorporating economically incorrect summation as an expression of the value of a natural resource (for example, wood, berries, mushrooms, etc.) and natural products obtained as a result of human labor and transformed into finished goods. products, in particular wood. It is of interest to have other methods for economic assessment of ecosystem services that determine the demand for a good or service in monetary terms, i.e. both the willingness of consumers to pay for a particular benefit and the willingness of people to accept compensation for giving up that benefit. Their list and contents are described quite fully in the published review [24]. In our opinion, the rental concept of their value should be used as an integral valuation of ecosystem services, which is leading for the environmental accounting system. According to this concept, the key category expressing the economic value of ecosystem services is natural capital, in which the environmental effect is taken into account using a reduced discount rate. The latter is used in determining the capital value of natural resource rent. This methodological approach was used in the preparation of a technical regulatory legal act (TKP) dedicated to the mechanism for calculating the valuation of forest ecosystem services and determining the value of biological diversity in relation to the natural and economic conditions of the Republic of Belarus [7].

This manual provides formulas for calculating the value of forest ecosystem services (specific environmental rent) in relation to their main object - the timber stock, as well as the regulating and socio-ecological services of forest ecosystems. It has been established that, from the standpoint of the physical measurement of ecosystem services, the timber stock of Belarusian forests as a producer of ecosystem services as a whole is 1.82 billion m^3, of which 1.14 billion m3 (62.6 %) are production forests, 332 are protective forests, 0 million m3 (18.2 %), recreational and recreational 63.5 million m^3 (3.5 %), environmental forests – 285.0 million m^3 (15.7 %). The recently published work [22] provides information on the results of the valuation of ecosystem services of forests in Belarus, based on determining their total capital cost, which averaged 1.00 thousand rubles/ha. Its size ranges from 0.88 thousand rubles/ha in production forests to 1.64 thousand rubles/ha in conservation forests. The completed capital assessment was then converted, taking into account the percentage of annual forest use, into the current annual amount of ecosystem services. Their average annual cost was 25.5 rubles/ha. At the same time, its maximum value is for environmental forests – 37.7 rubles/ha, the minimum for operational forests is 25.5 rubles/ha.

The completed valuation of ecosystem services of forests in Belarus, despite the fact that it is preliminary, emphasizes the importance of ecosystem accounting and is an additional tool for justifying the strategic development of forestry and an important argument for the environmental protection role of forest ecosystems and sustainable socio-economic development. Considering the fact that in Belarus the identification and assessment of ecosystem services of forest ecosystems is at an early stage, as well as the presence of some methodological gaps and difficulties in accounting for them at the national level, a scientific solution to a number of priority tasks is required. These include the justification and definition of key criteria and indicators characterizing the ecosystem services of forest resources [25; 26]. These indicators should fully reveal the essence and characteristics of the forest ecosystem assets of the republic, and also be adapted to international methods and recommendations and harmonized with national legislation in this area.

Conclusion

In the context of the formation of a mechanism for sustainable environmental management, the system of ecosystem accounting of natural complexes of the natural environment, where forests play a key role, is noticeably updated and acquires practical significance. The concept of ecosystem accounting of forests is based on the identification of forests as independent, but closely interrelated economic and environmental assets as part of natural capital. The latter are determined by the variety of functions performed by forests and the wide range of ecosystem services they provide in the form of tangible and intangible benefits and benefits. In this regard, it is advisable to highlight the natural accounting of the forest as a source of its timber and secondary forest reserves, which have a certain purely economic (commercial) value. At the same time, forests perform important functions in the

form of regulated, environment-forming and socio-cultural ecosystem services that require separate environmental accounting. To carry out the valuation of forest ecosystems, it is proposed to use a rental approach, the application of which determines the profit due to the high level of not only their productive capacity, but also the savings in future costs associated with the reproduction of the ecological functions performed by forests. Among the promising and popular activities that contribute to a more complete and comprehensive reflection of the beneficial properties of forest ecosystems and their reflection in the system of ecosystem accounting in national and international accounting include the justification and definition of criteria and indicators of ecosystem services of forests of the Republic of Belarus, their territorial manifestation and mapping at different levels of organization of the natural environment.

References

1. System of environmental – economic accounting 2012. Central framework. New York: United Nations; 2014. 378 p.
2. The Sustainable Development Goals [Internet, cited 2024 March 01]. Available from: https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/.
3. State of the World's Forests 2022. Forestry development strategies as a tool for ecologically balanced restoration and creation of inclusiveness. a resilient and sustainable economy. Rome: FAO; 2022. 167 p. (Russian).
4. Poleshchuk EA. System of ecosystem indicators. characterizing forest resources of the Republic of Belarus. *Bukhalterskiy uchet and Analis*. 2020;10:26–32 (Russian).
5. Mengist W, Soromessa T. Assessment of forest ecosystem services research trend and methodological approaches at global level: a meta-analysis. *Environmental System Research.* 2018;8:1–18.
6. Chen HI, Lewison RI, An I, et al. Accessioning the effects of payments for ecosystem services programs on forests and species biodiversity. *Biodiverse Conservation*. 2020;29:2123–2140.
7. TKP 02/17/10/2012 (02120) Environmental protection and natural resource management. Rules for protection and use of natural resources. Procedure for calculating the cost of ecosystem methods I biodiversity. Approved I put into effect on 2013 March 15. Minsk: Ministry of Natural Resources; 2013. 18 p. (Russian).
8. On conducting an economic assessment of ecosystem methods. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated 2024 February 27. No. 223 (in Russian).
9. Veklikh AV. Environmental rent: essence. varieties. forms. *Voprosy economiki*. 2006;11:104–110 (Russian)
10. Neverov AV, Masilevich NA, Ravino AV. Reproduction of environmental capital: concept and cost tools for implementation. *Proceedings of BSTU. Series 5. Economics and Management.* 2020;1:48–56 (Russian)
11. Darbadaeva DA, Romanova TG, Yakovleva VB. Natural capital in the sustainable development of the ecological and economic system. Saint Petersburg: Publishing house of the Saint Petersburg State University of Economics and Finance; 2012. 134 p. (Russian).
12. Ecosystem assessment at the turn of the millennium. Ecosystems and human decency: opportunities for business and industry. Washington: World Resources Institute; 2005. 36 p. (Russian).
13. Neverov AV, Ravino AV, Lukashuk NA, et al. Environmental economics. Minsk: Publishing house «Kolograd»; 2016. 400 p. (Russian).
14. Dumnov AD, Fomenko GA, Fomenko MA. The main problems of reflecting forest resources in the system of natural resource and economic accounting. *Voprosy Statistiki*. 2014;11:3–23 (Russian).
15. System of Environmental-Economic accounting for Agriculture, Forestry and Fisheries: SEEA AFF. White Cover Version. [Place unknown]: FAO, UNSD; 2016. 154 p.
16. Bobylev SN, Zakharov VM. Ecosystem services and economics. Institute for Sustainable Development. Center for Environmental Policy of Russia. Moscow: LLC Printing House Levko; 2020. 72 p. (Russian).
17. Millennium Ecosystem Assessment (MEA): Ecosystem and Human Well-being. Synthesis, Washington, USA: Island Press; 2005. 137 p.
18. The Economic of Ecosystems and Biodiversity. Ecological and Economic Foundation. Abington: Rutledge; 2010. 410 p.
19. Common International of Ecosystem services (CICES. V. 5.1. Guidance on the application of the revised structure. Fibs consulting, Nottingem: [publisher unknown]; 2009. 19 p.
20. Register of land resources of the Republic of Belarus on 01/01/2024. [Internet, cited 2024 March 03]. Available from: www.gki.gov.by (Russian).
21. Forest Code of the Republic of Belarus. Adopted by the House of Representatives on 2015 December 3. [Internet, cited 2024 March 06]. Available from: www.pravo.by (Russian).
22. Neverov AV, Bahedh HA. Ecosystem methods of forests in Belarus: physical and cost measurement. *Belarusian Economic Journal*. 2022;2:107–121 (Russian).
23. Aguilar FA, Kelly M, Danley B. Total economic value, ecosystem services and the role of public policy instruments in the creation and destruction of forest value. In: Service in the family forests, springer. Berlin: World forest book series; 2019. p. 103–118.
24. Neverov AA, Yatsukhno VM. Accounting for the value of ecosystem systems to ensure sustainable environmental management. In: Nature management and environmental risks. Minsk: BSTU; 2019. p. 28–93 (Russian).
25. Poleshchuk EA. Methodological provisions for constructing accounts of natural-economic accounting of forest resources in the Republic of Belarus. *Voprosy Statistiki*. 2021;28(1):69–79 (Russian).
26. Berghöfer A, Scharder A. Indicators for managing ecosystem services – options and examples. Guidance for seeking information that support the intergration of ecosystem services into policy and public management. Leipzig: GmbH, UFZ, Germany; 2015. 50 p.

Статья поступила в редколлегию 15.04.2024.
Received by editorial board 15.04.2024.

УДК 504.3.054

СУЩЕСТВУЮЩИЕ БАРЬЕРЫ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СИСТЕМ АКТИВНОЙ ДЕГАЗАЦИИ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Е. И. БЕРТОШ[1)], ***К. В. ГОНЧАР***[1)], ***Д. В. МЕЛЕХ***[1)], ***И. П. НАРКЕВИЧ***[1)], ***Ю. В. ФУРСА***[1)]

[1)]*Бел НИЦ «Экология»,*
ул. Якубова, 76, 220095, г. Минск, Беларусь

Современные города являются крупным источником образования твердых коммунальных отходов (ТКО), объем которых из года в год растет из-за увеличивающихся темпов экономического развития и урбанизации. Наиболее распространенным методом удаления ТКО во всем мире, в том числе в Республике Беларусь, является их захоронение на полигонах. В настоящее время в Беларуси для размещения ТКО действует 151 полигон (мини-полигоны отсутствуют), где захоранивается около 65 % образующихся ТКО в стране [1], оказывающих негативное воздействие на окружающую среду и изменение климата. В рамках реализации международных обязательств по выполнению положений Парижского соглашения к Рамочной конвенции ООН об изменении климата Совет Министров Республики Беларусь принял постановление от 29 сентября 2021 г. № 553 «Об установлении определяемого на национальном уровне вклада Республики Беларусь в сокращение выбросов парниковых газов до 2030 года», в соответствии с которым страна берет на себя обязательство по сокращению выбросов парниковых газов (ПГ) до 2030 г. на 35 % к уровню 1990 г. с учетом поглощения в секторе «Землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство». Республика Беларусь выполняет свои обязательства по Парижскому соглашению и принимает меры для сокращения выбросов антропогенных ПГ. Выбросы парниковых газов в секторе «Отходы» составили 6,5 % от общих выбросов в 2021 г. и выросли за 1990–2021 гг. на 32 % (с 4513,5 Гг в эквиваленте CO_2 до 5975,9 Гг) за счет увеличения выбросов метана от полигонов твердых коммунальных отходов. В исследовании рассмотрен ряд экологических и социально-экономических преимуществ применения систем активной дегазации полигонов ТКО и использование свалочного газа для производства электрической энергии. Описаны наиболее опасные воздействия на различные компоненты природной среды, включая подземные и поверхностные воды, почвы, атмосферный воздух, которые оказывают токсические и ядовитые вещества, содержащиеся в жидком фильтрате полигонов ТКО, входящие в состав свалочного газа, выделяемого в результате анаэробного разложения отходов. Расчитано количество предотвращенных выбросов загрязняющих веществ

Образец цитирования:
Бертош ЕИ, Гончар КВ, Мелех ДВ, Наркевич ИП, Фурса ЮВ. Существующие барьеры при применении систем активной дегазации полигонов твердых коммунальных отходов для решения экологических и климатических проблем в Республике Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;2:86–91.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-86-91

For citation:
Bertosh EI, Gonchar KV, Melekh DV, Narkevich IP, Fursa YuV. Existing barriers of using of active degassing systems for municipal solid waste disposal sites to solve environmental and climatic problems in the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;2:86–91. Russian.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2024-2-86-91

Авторы:
Евгения Ивановна Бертош – заместитель заведующего отделом международного научного сотрудничества и климата.
Кристина Викторовна Гончар – научный сотрудник отдела международного научного сотрудничества и климата.
Дмитрий Владимирович Мелех – заведующий отделом международного научного сотрудничества и климата.
Иван Петрович Наркевич – доктор технических наук, доцент; старший научный сотрудник отдела международного научного сотрудничества и климата.
Юлия Владимировна Фурса – научный сотрудник отдела международного научного сотрудничества и климата.

Authors:
Evgenia I. Bertosh, deputy head of the department of international scientific cooperation and climate.
ebertosh@gmail.com
Kristina V. Gonchar, researcher at the department of international scientific cooperation and climate.
gonchar.kristina@mail.ru
Dmitry V. Melekh, head of the department of international scientific cooperation and climate.
melekhdima@gmail.com
Ivan P. Narkevich, doctor of science (technical), docent; senior researcher at the department of international scientific cooperation and climate.
ivan.narkevitch@mail.ru
Yulia V. Fursa, researcher at the department of international scientific cooperation and climate.
yuliiafursav@gmail.com

за счет их улавливания системами активной дегазации на одном из объектов Республики Беларусь. Рассмотрены нормативно-правовые акты, поддерживающие развитие технологий по производству и удалению биогаза в Республике Беларусь, а также по международным документам, осуществляемым страной в рамках глобальной климатической повестки, включая Рамочную конвенцию Организации Объединенных Наций об изменении климата и Парижское соглашение.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы; полигон твердых коммунальных отходов; система активной дегазации; свалочный газ; климат; международные соглашения.

EXISTING BARRIERS OF USING OF ACTIVE DEGASSING SYSTEMS FOR MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL SITES TO SOLVE ENVIRONMENTAL AND CLIMATIC PROBLEMS IN THE REPUBLIC OF BELARUS

E. I. BERTOSH[a], ***K. V. GONCHAR***[a], ***D. V. MELEKH***[a], ***I. P. NARKEVICH***[a], ***Yu. V. FURSA***[a]

[a]*Bel SIC «Ecology»,*
76 Yakubava Street, Minsk 220095, Belarus
Corresponding author: Yu. V. Fursa (yuliiafursav@gmail.com)

Modern cities are a major source of solid municipal waste (MSW) generation, the volume of which is increasing from year to year due to growing economic development and urbanization. The most common method of solid waste disposal worldwide, including in the Republic of Belarus, is it's landfilling. Currently, there are 151 landfills in Belarus for the placement of MSW, where about 65 % of the generated MSW in the country is buried [1], which has a negative impact on the environment and climate change. As a part of the implementation of international obligations to implement the provisions of the Paris Agreement to the UN Framework Convention on Climate Change, the Council of Ministers of the Republic of Belarus adopted a resolution dated September 29, 2021. No. 553 «On establishing a nationally determined contribution of the Republic of Belarus to reduce greenhouse gas emissions by 2030», according to which the country undertakes to reduce greenhouse gas (GHG) emissions by 2030 by 35 percent to the level of 1990, taking into account the absorption in the sector «Agriculture, Forestry and Other Land Use». The Republic of Belarus fulfills its obligations under the Paris Agreement and takes measures to reduce anthropogenic GHG emissions. Greenhouse gas emissions in the Waste sector amounted to 6.5 % of total emissions in 2021 and increased by 32 % over the period 1990–2021 (from 4513.5 Gg in CO2 equivalent to 5975.9 Gg) due to growth of methane emissions from landfills of municipal solid waste. The article considers a number of environmental and socio-economic advantages of using active degassing systems for solid waste disposal sites and the use of landfill gas for the production of electric energy. The most dangerous effects on various components of the natural environment, including groundwater and surface waters, soils, and atmospheric air, which have toxic substances contained in the filtrate of solid waste disposal sites and included in the landfill gas released as a result of anaerobic decomposition of waste, are described. The amount of prevented emissions of pollutants due to their capture by active degassing systems at one of the facilities of the Republic of Belarus have been calculated. The normative legal acts supporting the development of technologies for the production and utilization of biogas in the Republic of Belarus and international documents implemented by the country within the framework of the global climate agenda, including the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Paris Agreement, are considered.

Keywords: solid municipal waste; landfill of solid municipal waste; active degassing system; landfill gas; climate; international agreements.

Введение

Свалочный газ состоит из более 100 компонентов с различными негативными свойствами. Любой из них, входящих в состав свалочного газа, может как по отдельности, так и в сочетании создавать опасность для здоровья человека, если они присутствуют в количествах, достаточных для создания среды с дефицитом кислорода[1]. В большей степени опасности подвержены органы дыхания, осязания и зрения [2].

Наиболее опасные воздействия на различные компоненты природной среды, включая подземные и поверхностные воды, почвы, атмосферный воздух, оказывают токсические и ядовитые вещества, содержащиеся в жидком фильтрате полигона и входящие в состав свалочного газа, выделяемого в результате анаэробного разложения ТКО. В свою очередь, наличие воспламеняющихся компонентов в составе свалочного газа является причиной возникновения пожаров, в результате которых выделяются

[1]Государственный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов (Национальный доклад о кадастре, 2023) [Электронный ресурс]. URL: National Inventory Submissions 2023 | UNFCCC (дата обращения: 28.05.2024).

чрезвычайно опасные вещества – диоксины и фураны, имеющие высокий токсический потенциал воздействия на организм человека и загрязняющие окружающую среду. Диоксин – тяжелый, медленно разлагающийся газ, который при поступлении в атмосферу быстро оседает в окрестностях и постепенно накапливается в почвенном покрове [3].

Самым пожароопасным компонентом свалочного газа является метан, составляющий свыше 50 % от общего объема биогаза. Кроме того, метан – это парниковый газ, по своему характеру оказывающий в 25 раз большее воздействие на глобальное потепление, чем диоксид углерода.

Для ликвидации и предупреждения перечисленных неблагоприятных воздействий от полигонов ТКО на окружающую среду и здоровье населения в большинстве развитых стран внедряются различные технологии по снижению выбросов свалочного газа в атмосферу. Одной из таких технологий является применение систем активной дегазации полигонов ТКО и использование свалочного газа для производства электрической энергии. Данные системы имеют ряд экологических и социально-экономических преимуществ как на местном, так и глобальном уровнях.

К наиболее значимым экологическим выгодам работы биогазовых комплексов на полигонах ТКО относятся:

• Стабилизация отходов ТКО до экологически приемлемого уровня.

• Снижение выбросов токсических и ядовитых компонентов, входящих в состав свалочного газа, и улучшение экологической обстановки вокруг полигонов ТКО.

• Предотвращение выбросов парниковых газов и смягчение последствий изменения климата на глобальном и региональном уровнях.

• Минимизация рисков, связанных с пожарами на полигонах ТКО, и, как результат, предотвращение выбросов очень опасных для живых организмов веществ.

Социально-экономические преимущества сбора и энергетического использования свалочного газа:

• экономия ископаемых видов топлива;

• получение дохода от продажи произведенной электрической энергии;

• увеличение налоговых поступлений в бюджет;

• создание новых рабочих мест;

• предотвращение экономического ущерба, вызываемого ростом неблагоприятных погодных явлений из-за климатических изменений климата путем снижения вероятности их воздействия на различные производственные и социальные сферы, здоровье населения и окружающую среду.

Материалы и методы исследования

Расчет предотвращенных выбросов загрязняющих веществ в результате улавливания биогаза системами дегазации полигонов ТКО «Тростенец» и «Тростенецкий» был основан на Методике расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых коммунальных и промышленных отходов (ПО) [4]. Данная методика предназначена для использования при проведении инвентаризации выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, разработке проектов нормативов предельно допустимых и временно согласованных выбросов для полигонов ТКО и ПО, контроле за соблюдением установленных нормативов предельно-допустимых выбросов и при оценке выбросов от полигонов ТКО и ПО в предпроектной и проектной документации на размещение новых и расширение существующих объектов.

Указанная выше методика распространяется на основные виды газообразных загрязняющих веществ, образующихся в результате биотермического анаэробного процесса распада органических составляющих ТКО и выделяющихся с поверхностей полигонов отходов в атмосферу.

В расчетах применялись данные по морфологическому составу отходов, основанные на анализе результатов изучения соотношения отдельных компонентов (фракций) отходов, имеющих определенные общие признаки и (или) свойства, выраженные в процентах к общей массе отходов коммунальных отходов в Республике Беларусь [5].

Сокращение потребления разных видов топлива и предотвращение выбросов парниковых газов (ПГ) от их сжигания было расчитано в соответствии с помощью методических указаний для подготовки национальной отчетности ПГ [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно проведенному исследованию по расчету предотвращенных выбросов загрязняющих веществ за счет их улавливания системами активной дегазации, состоящих из 7-ми биогазовых блок-станций, электрической мощностью в 1 МВт каждая, которые установлены на полигонах ТКО «Тростенец» и «Тростенецкий» в границах г. Минска, масса предотвращенных выбросов загрязняющих веществ, в том

числе ядовитых и взрывоопасных компонентов биогаза, в 2022 г. составила – 13 355 т в год при объеме извлеченного биогаза 20,7 млн $м^3$.

Под предотвращенными выбросами загрязняющих веществ в данном исследовании понимаются объем уловленного (использованного на энергетические нужды) биогаза и содержащиеся в его составе вредные загрязняющие вещества (табл).

Предотвращенные выбросы в составе уловленного свалочного газа системами активной дегазации полигонов ТКО «Тростенец» и «Тростенецкий»

Prevented emissions in the composition of captured landfill gas by active degassing systems of MSW landfills «Trostenets» and «Trostenetsky»

Наименование вещества	Весовое процентное содержание компонентов в биогазе, %	Масса уловленных выбросов, т/год	Класс опасности
Взрывоопасные и ядовитые (токсические) компоненты			
Метан	52,915	12787,4	4
Толуол	0,723	174,7	3
Аммиак	0,533	128,8	4
Ксилол	0,443	107,1	3
Углеродаоксид	0,252	60,9	Не нормируется
Ядовитые и токсичные компоненты			
Азота диоксид	0,111	26,8	2
Формальдегид	0,096	23,2	2
Ангидрид сернистый	0,07	16,9	3
Этилбензол	0,095	23,0	3
Сероводород	0,026	6,3	2

Согласно расчетам, в результате работы биогазовых комплексов на полигонах ТКО «Тростенец» и «Тростенецкий» в 2022 г. выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от эксплуатируемых полигонов сократились более чем на 27 % (по сравнению с выбросами в целом от полигона без учета системы дегазации).

За период работы комплекса по дегазации указанных выше полигонов, с 2010 по 2022 г., выбросы CH_4 за счет улавливания биогаза снизились более, чем на 1,4 млн т CO_2 экв. Выбросы парниковых газов за указанный период от замещения ископаемых видов топлива для выработки электрической энергии в зависимости от замещаемого топлива сократились от 65,2 до 159,3 млн т CO_2 экв. при замещении использования природного газа и торфа соответственно.

В результате дегазации полигона ТКО «Тростенец» был достигнут социально-экологический эффект за счет его биологической рекультивации, в результате которой тело полигона стабилизировалось, сократилось воздействие свалочного газа на корневую систему объектов растительного мира и, как следствие, полигон покрылся густой растительностью, перестал выделяться дурно пахнущий газ, изменилось эстетическое восприятие полигона ТКО. Система активной дегазации позволила не только улучшить экологическую обстановку в районе размещения полигона ТКО, но и помогла существенно снизить затраты на строительство (благоустройство) Мемориального комплекса «Тростенец», посещаемого в том числе, международными делегациями.

Таким образом, на примере работы действующей системы активной дегазации полигонов ТКО показано, что эти установки являются эффективным защитным сооружением, уменьшающем неконтролируемые выбросы ядовитых, токсичных и взрывоопасных веществ в атмосферный воздух, а также сооружениями, обеспечивающим восстановление эстетической и биологической ценности окружающей среды.

Как уже было отмечено выше, установки по удалению свалочного газа существенно влияют на снижение выбросов парниковых газов, тем самым предотвращая изменение климата. В этой связи извлечение свалочного газа на полигонах ТКО имеет важное значение для обеспечения реализации обязательств Республикой Беларусь по международным документам, осуществляемым страной в рамках глобальной климатической повестки, включая Рамочную конвенцию Организации Объединенных Наций об изменении климата и Парижское соглашение.

В соответствии с целями данных международных соглашений, Республика Беларусь реализовывает свою климатическую политику посредством установления национальных целевых показателей по сокращению

выбросов парниковых газов. Так, текущая общеэкономическая цель по сокращению выбросов парниковых газов Республики Беларусь – снижение выбросов в 2030 г. на 35–40 % по отношению к 1990 г.[2]

Кроме того, удаление биогаза на биогазовых установках, в том числе на полигонах ТКО, является одним из ключевых направлений реализации различных отраслевых программ развития в области энергосбережения и совершенствования существующей системы обращения с ТКО:

• Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы, утвержденной Указом Президента Республики Беларусь от 29 июля 2021 г. № 4292.

• Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы, утвержденной Указом Президента Республики Беларусь от 15 сентября 2021 г. № 348.

• Государственной программы «Энергосбережение» на 2021–2025 годы, утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 24 февраля 2021 г. № 103.

• Государственной программы «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2021–2025 годы, утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28 января 2021 № 50.

• Концепции создания объектов по сортировке и использованию твердых коммунальных отходов и полигонов для их захоронения, утвержденная Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 23 октября 2019 г. № 715.

• Концепции совершенствования и развития жилищно-коммунального хозяйства до 2025 года, утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 29 декабря 2017 г. № 1037.

• Национальной стратегии по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь на период до 2035 года, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28 июля 2017 г. № 567.

При таком наличии нормативно-правовых актов, поддерживающих развитие технологий по производству и удаление биогаза в Республике Беларусь, можно сделать вывод, что это направление должно повсеместно внедряться в стране. Однако наряду с этим в Беларуси в 2022 г. были приняты нововведения в законодательстве в части регулирования отношений в области развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в связи с их интеграцией в энергосистему в условиях запуска Белоруской атомной электростанции.

В частности, принятие Закона Республики Беларусь от 30 мая 2022 года № 173-З «О регулировании отношений в сфере использования возобновляемых источников энергии» повлияло на снижение тарифов на приобретение электрической энергии из ВИЭ более чем в два раза, что существенно снизило доходы организаций от продажи произведенной электрической энергии. До сих пор в Республике Беларусь действовали более высокие тарифы на покупку электроэнергии энергоснабжающими организациями из ВИЭ, стимулирующие привлечение инвестиций в эту сферу.

Согласно принятым изменениям, блок-станции, работающие на ВИЭ, могут привлекаться к участию в регулировании суточного графика покрытия электрической нагрузки Белорусской энергетической системы, что подразумевает отключение этих блок-станций в часы минимальной нагрузки энергосистемы и, как результат, снижение выручки от продажи электрической энергии.

При этом предполагается, что такому регулированию не подвержены организации, желающие использовать ВИЭ для собственных хозяйственных нужд. Также для всех собственников ВИЭ все еще действуют льготы в сфере налогообложения в виде снижения экологического налога на сумму капитальных затрат, связанных со строительством ВИЭ, а также освобождения от уплаты земельного налога и налога на добавленную стоимость при ввозе на территорию страны оборудования и запасных частей, предназначенных для строительства, эксплуатации и ремонта установок, работающих на ВИЭ.

Однако новые условия привели к тому, что некоторые производители электрической энергии из ВИЭ, а в большей степени из биогаза на полигонах ТКО, для которых инвестиционные затраты еще не окупились, работают в убыток из-за того, что выручка от продажи электрической энергии не покрывает все эксплуатационные и амортизационные затраты, а также иные затраты по возврату кредитных средств. Кроме того, на уже действующих полигонах, для которых строительство систем дегазации не было предусмотрено до ввода их в эксплуатацию, инвесторам для получения надежной прибыли необходимо постоянно инвестировать в строительство новых скважин и системы очистки поверхностных стоков и фильтрата, но в сложившейся ситуации расширение инфраструктурных объектов для существующих систем дегазации полигонов экономически нецелесообразно.

Заключение

Существующая тарифная и ограничительная политика в отношении ВИЭ не стимулирует дальнейшее развитие технологий улавливания биогаза на отходах ТКО в Беларуси.

[2]Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 29.09.2021 № 553 «Об установлении определяемого на национальном уровне вклада Республики Беларусь в сокращение выбросов парниковых газов до 2030 года».

Однако это вовсе не означает, что в Беларуси не планируется развивать ВИЭ. Предполагается, что созданные механизмы для внедрения ВИЭ будут направлены исключительно на собственные нужды субъектов хозяйствования. Что касается систем дегазации полигонов, то энергопотребление для обеспечения хозяйственной деятельности полигона незначительно, а капитальные затраты на оборудование системами дегазации высоки, и, по примерным оценкам, в зависимости от технологии улавливания и удаление биогаза составляют 3,5–4,7 млн долл. В этой связи строительство установок по использованию свалочного газа в текущей ситуации экономически не привлекательно.

Учитывая социальную и экологическую значимость технологии дегазации полигонов, для ее внедрения необходимы рыночные инструменты. Очевидно, что дальнейшее стимулирование в развитие дегазации полигонов ТКО в Беларуси может произойти в рамках реализации климатических проектов как на международном, так и на национальном углеродном рынке, аспекты создания которого в настоящие время прорабатываются Правительством Республики Беларусь.

Библиографические ссылки

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Интернет, процитировано 28 мая 2024]. URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayuschaya-sreda/sovmestnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii2/i-othody/i-3-ispolzovanie-otkhodov/?ysclid=lreoq2wdj878330357.

2. Вайсман ЯИ, и др. *Управление отходами. Сточные воды и биогаз полигонов захоронения твердых бытовых отходов. Монография.* Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет; 2012. 259 с.

3. Осипов ВИ. Управление твердыми коммунальными отходами как федеральный экологический проект. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2019;3:3–11.

4. Абрамов НВ, Санников ЭС, Русаков НВ, Миляев МБ, Халевин РГ, Лифанов АВ, Буренин НС, Турбин АС. *Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов*. Москва: Академия коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова; 2004. 20 с.

5. Труш ЯВ, Ботян ЕА. *Анализ данных изучения морфологического состава коммунальных отходов в Республике Беларусь.* В: *Экологическая безопасность 1991–2021. Сборник материалов заочной научно-практической конференции*. Минск: БГТУ; 2021. с. 152–156.

6. Руководящие принципы проведения национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006. Том 2. Энергетика [Интернет, процитировано 28 мая 2024]. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf.

Reference

1. National State Committee of the Republic of Belarus. [Internet, cited 2024 May 28]. Available from: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayuschaya-sreda/sovmestnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii2/i-othody/i-3-ispolzovanie-otkhodov/?ysclid=lreoq2wdj878330357.

2. Vaisman YaI, et al. *Upravlenie otkhodami. Stochnye vody i biogaz poligonov zakhoroneniya tverdykh bytovykh otkhodov* [Waste management. Wastewater and biogas from solid waste disposal sites]. Perm: Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politekhnicheskij universitet; 2012. p. 259. Russian.

3. Osipov VI. *Upravlenie tverdymi kommunal'nymi otkhodami kak federal'nyi ekologicheskii proekt* [Municipal solid waste management as a federal environmental project]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya*. *Geokriologiya*. 2019;3:3–11. Russian.

4. Abramov NV, Sannikov ES, Rusakov NV, Milyaev MB, Khalevin RG, Lifanov AV, Burenin NS, Turbin AS. *Metodika rascheta kolichestvennykh kharakteri-stik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu ot poligonov tverdykh by-tovykh i promyshlennykh otkhodov* [Methodology for calculating the quantitative characteristics of pollutant emissions into the atmosphere from solid domestic and industrial waste landfills]. Moscow: Akademiya kommunal'nogo hozyajstva; 2004. 20 p. Russian.

5. Trush YaV, Botyan EA. *Analiz dannykh izucheniya morfologicheskogo sostava kom-munal'nykh otkhodov v Respublike Belarus* [Analysis of data from studying the morphological composition of municipal waste in the Republic of Belarus]. In: *Ekologicheskaya bezopasnost' 1991–2021. Sbornik materialov zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Minsk: BSTU; 2021. p. 152–156. Russian.

6. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2. Energy [Internet, cited 2024 May 28]. Available from: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf.

Статья поступила в редколлегию 28.05.2024.
Received by editorial board 28.05.2024.

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

Жоров Д. Г. Кокциды (Coccoidea) закрытого грунта Беларуси. Видовой состав и характер наносимых повреждений 4

Синчук О. В., Жоров Д. Г. Передние голени жука-носорога обыкновенного (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758) как бионический прототип для моделирования стрельчатых лап культиваторов 15

Счастная И. И., Рондак У. А. Оценка экологического состояния и экосистемных услуг озелененных территорий общего пользования г. Жодино 24

Макаренко Т. В., Макаренко А. И. Сравнительная характеристика содержания тяжелых металлов в тканях различных видов моллюсков водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий 35

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Танкевич Е. А., Никитин А. Н., Симончик Ю. К., Концевая И. И. Роль микроорганизмов основных эколого-трофических групп в поступлении ^{137}Cs из дерново-подзолистой супесчаной почвы в биомассу *Avena sativa* L. 46

Никитин А. Н., Шуранкова О. А., Калиниченко С. А., Мищенко Е. В., Леферд Г. А. Особенности накопления ^{137}Cs растениями травянистых сообществ в ближней зоне Чернобыльской АЭС на этапе отдаленных последствий радиационной аварии 57

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

Венцань Чжань, Нижегородова Д. Б., Зафранская М. М. Иммунопатогенез и серологические маркеры при воспалительных заболеваниях кишечника 68

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Бахед Х. А., Яцухно В. М. Экосистемный учет лесов в устойчивом природопользовании: основное содержание и развитие 79

Бертош Е. И., Гончар К. В., Мелех Д. В., Наркевич И. П., Фурса Ю. В. Существующие барьеры при применении систем активной дегазации полигонов твердых коммунальных отходов для решения экологических и климатических проблем в Республике Беларусь 86

CONTENTS

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

Zhorov D. G. Coccoidea of the indoor soil of Belarus. Species composition and nature of damage caused 4

Sinchuk A. V., Zhorov D. G. The front tibia of the european rhinoceros beetle (*Oryctes nasicornis* (Linnaeus, 1758) as a bionic prototype for modeling the row crop cultivator sweep 15

Shchasnaya I. I., Rondak U. A. Assessment of public green spaces' ecological condition and ecosystem services in Zhodino city 24

Makarenko T. V., Makarenko A. I. Comparative characteristics of heavy metals content in the various types of mollusks' tissues in Gomel water bodies and its adjacent territories.....35

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

Tankevich E. A., Nikitin A. N., Simonchyk Yu. K., Kantsavaya I. I. The role of microorganisms of the main ecological and trophic groups in the transfer of 137Cs from soddy-podzolic sandy loam soil into the biomass of *Avena sativa* L. 46

Nikitin A. N., Shurankova O. A., Kalinichenko S. A., Mishchanka E. V., Leferd G. A. Patterns of ^{137}Cs accumulation in herbaceous plant communities near the Chernobyl nuclear power plant in the aftermath of the accident 57

MEDICAL ECOLOGY

Wencan Zhang, Nizheharodava D. B., Zafranskaya M. M. Immunopathogenesis and serological markers in inflammatory bowel diseases.....68

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

Bahedh H. A., Yatsukhno V. M. Ecosystem accounting of forests in sustainable environmental management: basic content and development.....79

Bertosh E. I., Gonchar K. V., Melekh D. V., Narkevich I. P., Fursa Yu. V. Existing barriers of using of active degassing systems for municipal solid waste disposal sites to solve environmental and climatic problems in the Republic of Belarus 86

Журнал включен Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований по биологическим, сельскохозяйственным и техническим (экология) наукам.

Журнал включен в библиографическую базу данных научных публикаций «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

Журнал Белорусского государственного университета. Экология. № 2. 2024

Учредитель:
Белорусский государственный университет

Юридический адрес: пр. Независимости, 4, 220030, Минск.
Почтовый адрес: ул. Долгобродская, 23/1, 220070, Минск.
Тел. 398-89-34, 398-93-44.
www.iseu.bsu.by
E-mail: jecology@bsu.by

«Журнал Белорусского государственного университета. Экология» издается с сентября 2017 г.
До августа 2017 г. выходил под названием «Экологический вестник» (ISSN 1994-2087).

Редактор *Л. М. Кореневская*
Технический редактор *М. Ю. Мошкова*
Корректор *М. Ю. Мошкова*

Подписано в печать 24.06.2024.
Тираж 100 экз. Заказ 574.

Республиканское унитарное предприятие «Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь»
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014.
Ул. Кальварийская, 17, 220004, Минск.

Journal of the Belarusian State University. Ecology. No. 2. 2024

Founder:
Belarusian State University

Registered address: 4 Niezaliežnasci Ave., 220030, Minsk.
Correspondence address: 23/1 Daŭhabrodskaja Str., 220070, Minsk.
Tel. 398-89-34, 398-93-44.
www.iseu.bsu.by
E-mail: jecology@bsu.by

«Journal of the Belarusian State University. Ecology» published since September, 2017.
Until August, 2017 named «Ekologicheskii vestnik» (ISSN 1994-2087).

Editor *L. M. Korenevskaya*
Technical editor *M. Yu. Moshkova*
Proofreader *M. Yu. Moshkova*

Signed print 24.06.2024.
Edition 100 copies. Order number 574.

RUE «Information Computing Center of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus».
License for publishing No. 02330/89, 3 March, 2014.
17 Kalvaryjskaya Str., 220004, Minsk.