



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

1

2020

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор	МАСКЕВИЧ С. А. – доктор физико-математических наук, профессор; директор Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. E-mail: direktor@iseu.by
Заместитель главного редактора	ГЕРМЕНЧУК М. Г. – кандидат технических наук, доцент; заместитель директора по научной работе Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. E-mail: margermen@gmail.com
Ответственный секретарь	ЛЫСУХО Н. А. – кандидат технических наук, доцент; начальник научно-исследовательского сектора Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. E-mail: nlysukha@mail.ru
<i>Батян А. Н.</i>	Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Голубев А. П.</i>	Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Головатый С. Е.</i>	Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Гричик В. В.</i>	Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Дардынская И. В.</i>	Центр всемирного здоровья «Великие озера», Чикаго, США.
<i>Зафранская М. М.</i>	Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Кильчевский А. В.</i>	Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
<i>Коровин Ю. А.</i>	Обнинский институт атомной энергетики – Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Обнинск, Россия.
<i>Ленгфельдер Э.</i>	Радиологический институт здоровья и окружающей среды имени Отто Хуга, Мюнхен, Германия.
<i>Либератос Г.</i>	Афинский технический университет, Афины, Греция.
<i>Логинов В. Ф.</i>	Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
<i>Медведев С. В.</i>	ГНУ «Объединенный институт проблем информатики» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
<i>Степанов С. А.</i>	Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Россия.
<i>Стожаров А. Н.</i>	Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь.
<i>Тарутин И. Г.</i>	ГУ «РНПЦ онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова», Минск, Беларусь.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief	MASKEVICH S. A. , doctor of science (physics and mathematics), professor; director of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: direktor@iseu.by
Deputy editor-in-chief	GERMENCHUK M. G. , PhD (engineering), docent; deputy director for research of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: margermen@gmail.com
Executive secretary	LYSUKHA N. A. , PhD (engineering), docent; head of research sector of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University. E-mail: nlysukha@mail.ru
<i>Batyan A. N.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Golubev A. P.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Golovaty S. E.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Grichik V. V.</i>	Belarusian State University, Minsk, Belarus
<i>Dardynskaya I. V.</i>	Great Lakes Center for Occupational and Environmental Safety and Health, Chicago, USA.
<i>Zafranskaya M. M.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Kilchevsky A. V.</i>	National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Korovin Y. A.</i>	Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia.
<i>Lengfelder E.</i>	Otto Hug Radiological Institute for Health and Environment, Munich, Germany.
<i>Lyberatos G.</i>	Athens Technical University, Athens, Greece.
<i>Loginov V. F.</i>	National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Medvedev S. V.</i>	The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Stepanov S. A.</i>	International Independent Ecological and Political University, Moscow, Russia.
<i>Stozharov A. N.</i>	Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus.
<i>Tarutin I. G.</i>	N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, Minsk, Belarus.

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

УДК 316.334.56

ЖИВОЙ ГОРОД КАК КРИТЕРИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И СОЦИАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРОДСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Т. Н. ШУШУНОВА¹⁾

¹⁾Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка,
ул. Советская, 18/1, 220050, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты качественного социологического исследования парка развлечения и отдыха малого города, осуществлявшегося в рамках натуралистической парадигмы и с использованием методов визуальной социологии. Изучалась и выявлялась его привлекательность для людей различных возрастов. Городские парки поставлены перед вызовами нового времени, что требует пересмотра ценностей, которые они призваны транслировать. Это предполагает модернизацию имеющейся инфраструктуры, оставшейся в наследство с прежних времен, пересмотр направлений досуговых, учебных и культурных интересов, которые должны согласовываться с предпочтениями горожан. Рассматривается концепт «живой город».

Ключевые слова: архитектура городской среды; визуальная социология; живой город; открытое городское пространство; урбоэкосистема; рекреационная деятельность; социальная устойчивость города.

Образец цитирования:

Шушунова ТН. Живой город как критерий экологической и социальной устойчивости городского пространства. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;1:4–12.

For citation:

Shushunova TN. Living city as a criterion of social and ecological sustainability of urban space. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;1:4–12. Russian.

Автор:

Татьяна Николаевна Шушунова – кандидат социологических наук, доцент, доцент кафедры социально-гуманитарных дисциплин.

Author:

Tatyana N. Shushunova, PhD (sociology), docent, associate professor at the department of social and humanitarian disciplines. Shushunova_tatiana_bspu@mail.ru

LIVING CITY AS A CRITERION OF SOCIAL AND ECOLOGICAL SUSTAINABILITY OF URBAN SPACE

T. N. SHUSHUNOVA^a

^a*Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank,
18/1 Savečkaja Street, Minsk 220050, Belarus*

The results of a qualitative sociological study using the methods of visual sociology carried out as part of a naturalistic paradigm for the study of an amusement park of a small city in order to identify its attractiveness for people of different ages are presented. Currently, city parks are faced with the challenges of modern times, requiring them to revise the values that they are called to broadcast; modernization of the existing infrastructure inherited from the Soviet era, revision of the structure of leisure, educational and cultural interests, which should be consistent with the preferences of citizens. The concept of a «living city» is considered.

Key words: architectonics of the urban environment; visual sociology; vibrant city; open urban space; recreational activities; social sustainability of the city.

Введение

Городской парк – обязательный элемент градостроительства, место отдыха, созданное специально для горожан, в зеленой зоне, обустроенное игровыми площадками, садом или водоемами, местами для различных спортивных игр, лавочками для отдыха. Однако если он играет еще и развлекательную роль, то снабжен всевозможными аттракционами, которые вызывают положительные эмоции как у жителей разных возрастов, так и гостей города. Это преимущественно городской феномен, поскольку многие его элементы могут быть воспроизведены только в условиях городского пространства. Кроме того, городской парк является публичным объектом города, который выступает как его структурообразующий элемент. Представляя собой часть инфраструктуры, он оформился на ранних этапах развития города и по мере усложнения своей функциональной нагрузки видоизменял и усложнял свои виды деятельности. Современный парк обеспечивает культурные и досуговые потребности горожан. Это присуще малым населенным пунктам, где городской парк – место в городе, в рамках которого осуществляется, во-первых, приобщение к городской культуре в целом, а во-вторых, в нем проходит стихийно-организованная форма социализации юных горожан, опосредованная вовлеченностью в общий процесс рекреации за счет усвоения городских норм и правил мышления в области культурного отдыха. Данная инфраструктура объединяет экологию и человека, создает предпосылки для диалога поколений и неформального общения.

Мы можем рассматривать городской парк как часть социальной и коллективной исторической памяти города. Он представляет элемент любого сообщества и его культуры, определяется в качестве основного механизма по сохранению, трансляции и воспроизведению прошлого социокультурного опыта городской жизни для конституирования бытия в настоящем. Идея о существовании в рамках городского пространства определенных локальных мест принадлежит французскому мыслителю М. Нора, которого интересовали вопросы, связанные с исторической памятью и коллективной идентичностью, что нашло свое выражение в его концепции «места памяти». Как понятие, «места памяти» – это то, что объединяет людей в одно единое общими воспоминаниями, переживаниями, поддерживает их и ориентирует на будущее. Это такие пункты, которые можно рассмотреть в трех направлениях: материальном, символическом и функциональном. По мнению Нора, «местами памяти» можно назвать памятники, территории, слова, религиозные меньшинства, пространственно-временные деления и др. [9]. Поэтому городской парк в современном городе и есть пространство, сочетающее в себе как функциональность, так и особую атмосферу, историческую память, доступную для «прочтения» каждому горожанину. Он действительно ассоциируется с радостью и предлагает развлечения на любой вкус для разного возраста. Сейчас произошли изменения в восприятии данного объекта городской жизни. Вызвано это во многом устаревшей архитектурной паркой, непригодной для нового поколения детей и молодежи, обветшавших от времени материальных объектов культуры по причине финансовых трудностей местной администрации.

Данные перемены происходят на фоне существующего запроса жителей города о реальной потребности в создании парка нового типа, в котором чувствовалась бы его первоначальное предназначение. Таким образом, это объект, где соприкасается природа, история, культура, «места памяти» горожан, обеспечивающие их общую социальную память и коллективную идентичность, где существует благоприятная творческая атмосфера и экологически чистый воздух, куда жители города и туристы приходят с целью проведения своего досуга.

Материалы и методы исследования

Используя методы качественного визуального анализа, рассмотрим на конкретных примерах состояние городских парков в малых городах. Сразу уточним, что осуществлять анализ мы будем в рамках натуралистической парадигмы, согласно которой город рассматривается исследователем в качестве материального объекта, со своей архитектурикой и совокупностью архитектурных и инфраструктурных компонентов, что согласуется с натуралистическим пониманием визуального как отражения объективной социальной реальности. Визуальные данные, представленные на фотографиях, которые мы будем использовать, – это анализируемые документы, обеспечивающие как полное, так и детальное описание исследуемого объекта.

Объектом исследования является городской парк г. Бобруйска (рис. 1) – административного районного центра и наиболее крупного населенного пункта областного подчинения (седьмой по численности населения и площади в Республике Беларусь). Исследуемый городской парк культуры создан в 1966 г. На этом месте было еврейское кладбище, функционировавшее до конца XIX в. Некоторое время на его территории проводилась жилая застройка, однако было принято решение разбить здесь городской парк, поскольку остались многочисленные деревья ценных и редких пород. Его общая территория составляет 22,3049 га. На сегодняшний день в парке насчитывается примерно 2,5 тыс. деревьев (до 30 пород), среди которых присутствуют такие виды, как липа, тополь, грецкий орех, клен, береза, акация, сосна, каштан и др. Часть саженцев вырастили в лесхозе, а некоторые привезли с «Екатерининского шляха». В парке разбиты каштановая, липовая и березовая аллеи (рис. 2.) [3], свидетельствующие о высоком качестве среды в рассматриваемой урбозкосистеме.



Рис. 1. Городской парк культуры и отдыха г. Бобруйска

Fig. 1. City amusement park of Bobruisk

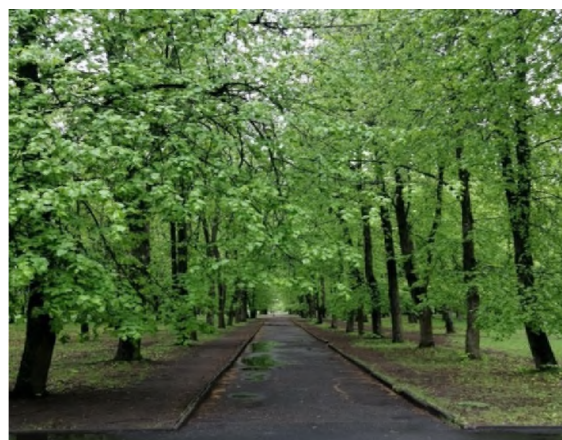


Рис. 2. Аллея городского парка

Fig. 2. Path of the city park

Значительное количество зеленых насаждений с вековой историей способно выполнять ряд функций (рекреационную, структурно-планировочную, декоративно-художественную и санитарно-гигиеническую), важных для оптимизации экологии города, который изобилует промышленными предприятиями. Аллеи городского парка улучшают микроклимат городской территории, увеличивают относительную влажность воздуха и «сглаживают» ее суточные и сезонные колебания, задерживают часть осадков и талых вод, выполняют шумозащитную роль, а также очищают воздух города, поглощают пыль и токсические вещества. Следует отметить, что дерево средней величины за 24 ч восстанавливает такое количество кислорода, которое необходимо для дыхания троих человек [6].

Большинство белорусских парков, в том числе и г. Бобруйска, были разбиты в 60–90-х гг. XX в. и реализованы в английском стиле, что подразумевает минимальное участие в нем человека. Деревья не подстригаются, им не придают причудливые формы, а при необходимости удаляют больные или старые деревья или кустарники, угрожающие безопасности человека. Однако в нем нет таких мест, где люди могли бы отдыхать на траве, как это делается в большинстве европейских парков (рис. 3), поэтому возникает потребность в организации специальных газонов, засеянных травой, устойчивых к различным воздействиям. А пока не будет площадок, доступных для всех желающих, парк не сможет в полной мере иметь статус публичного пространства, особенно для молодежи, культивирующей такие формы отдыха, как йога, скандинавская ходьба, пробежка и др.

С точки зрения автора работы «Психология города» П. Кидуэлла, для душевного здоровья человека, который в своей повседневной жизни окружен многоэтажками, крайне важно какую-то часть времени проводить

в окружении зеленых насаждений, прикасаться к земле [5]. При этом восприятие зеленого цвета, соитие с природой, гуляние в парке – главные составляющие борьбы человека со стрессом. И если у большинства жителей города нет возможности организовать поездку к морю или водоему, что является идеальным условием здорового образа жизни и психологического комфорта, то хотя бы городской парк в пешей доступности, куда человек может приходить в любое свободное время, является способом осуществления его позитивного самосохранительного поведения. В рассматриваемом городском парке есть похожий вариант в виде озера-копанки, которое находится на его территории со стороны кинотеатра «Мир». Зброшенность водоема, заросшего со всех сторон травой, мутность воды, из которой не убирается бытовой мусор, отсутствие в достаточном количестве скамеек, где можно было бы посидеть, – это основные критические замечания и притязания к этому месту как специалистов, так и городских жителей (рис. 4).



Рис. 3. Городской парк Вены

Fig. 3. Vienna city park



Рис. 4. Озеро-копанка

Fig. 4. Excavated tank

На примере озера в парке Боргезе Рима мы отмечаем, что он преобразуется, если в нем существует ухоженный водоем с привлекательной скульптурной композицией, а также имеется возможность поката́ться на лодке и понаблюдать за птицами (рис. 5). Можно, как минимум, вдохновиться этой идеей и сделать заброшенное место любимым для горожан, знаковым для гостей города, а при грамотном администрировании еще и доходным (рис. 5).

Подтверждением принадлежности парка к коллективной памяти бобруйчан является то, что в его создание и благоустройство внесли большой вклад учащиеся и преподаватели техникумов, а также рабочие предприятий Бобруйска. Благодаря им и по инициативе директора автотранспортного техникума Ф. Ф. Аскерко в нем был создан спортивный городок. Здесь находятся 5 площадок с гимнастическими перекладинами и скамейками (рис. 6).

Предлагаемый посетителям спортивный инвентарь парка г. Бобруйска не соответствует современным идеалам. Данный образец в большей степени доступен взрослой части населения, которое целенаправленно и сознательно придет сюда для получения необходимой физической нагрузки. Однако спортивное оснащение парка не может заинтересовать подростков и молодежь своим набором перекладин и не вступит в конкуренцию с цифровым миром.

Для младшего поколения, нуждающегося в активной физической нагрузке, на территории парка есть своя спортивная территория – детская игровая площадка (рис. 6.1). Она создана из природных материалов, экологически чистая, привлекательна для малышей по цвету и способна обеспечить игровую деятельность дошкольников. Согласно базовым принципам любой детской игровой площадки, она должна реализовывать следующие цели: образовательная (получать сведения и знания о новых свойствах материалов), физическая активность (уметь лазать, прыгать, перелезать, повисать и т. д.), здоровый риск, а также установление социальных связей (общаться друг с другом), предрасположенность к хорошему (привлекательному) времяпрепровождению. По мнению дизайнеров и проектировщиков современных игровых зон, детская площадка не должна быть «стерильной», слишком безопасной. В результате дети становятся не способными к таким видам игровой деятельности, которая для сверстников из предыдущих поколений была нормой, при этом их физическая подготовка располагала к ней (лазать по деревьям, забираться по

веревочной лестнице и т. д.). В странах Евросоюза и США были выпущены дополнительные стандарты по безопасности детских игровых площадок. Главное требование: наличие амортизирующего покрытия игровой зоны, если высота хотя бы одного элемента составляет 2 м. Из рис. 6.1 следует, что близость и разный уровень вбитых в землю столбиков при случайном падении ребенка (по внешнему виду предназначается для самых маленьких посетителей парка) может спровоцировать травму.



Рис. 5. Озеро в парке Боргезе (Рим)

Fig. 5. Lake in Borghese park (Rome)



Рис. 6. Спортивный городок

Fig. 6. Sports ground

Для детей среднего и старшего возраста на территории парка имеется третья детская игровая зона, где был организован среди парковых деревьев веревочный городок (рис. 6.2). Популярность веревочных аттракционов как развлекательного элемента в досуговой деятельности молодежи в последнее время заметно выросла за счет новизны, простоты монтажа, эксплуатации и окупаемости в короткие сроки. Кроме того, веревочный аттракцион еще и замечательный маркетинговый ход, позволяющий привлечь посетителей. Из рис. 6.2 следует, что представленный веревочный городок построен по принципу «висячие сады». Он представляет собой нижний вариант, когда этапы располагаются на высоте не более 1 м над землей, и участникам не требуется специального снаряжения и инструкторской страховки. Такого типа развлечение можно организовать на любой открытой площадке, где есть деревья.



Рис. 6.1. Площадка для малышей

Fig. 6.1. Playground for kids



Рис. 6.2. Веревоочный аттракцион

Fig. 6.2. Rope attraction

На обширной территории парка расположены аттракционы (20 объектов), где самый старый – двадцатиметровое «Колесо обозрения», возведенное в 1964 г. Из наследства прошлого в парке остались работать и радовать горожан «Колесо встреч», «Передвижная карусель», «Школьные качели», «Автодром», которому уже 38 лет (рис. 7).

С одной стороны, раритетные аттракционы – это часть коллективной памяти, объединяющей разные поколения, способные стать частью общих воспоминаний. Однако, с другой стороны, индустрия развлечений не стоит на месте, поэтому наличие новейшего занимательного оборудования и аттракционной

техники является важной частью современного городского парка. Их роль заключается в оказании рекреационных услуг, позволяющих человеку испытать чувства, через которые он достигает наибольшего развлекательного эффекта, почувствовать острые ощущения, посредством которых оказывается перед лицом различных эмоциональных состояний: страха, наслаждения, полета и т. д. [8].



Рис. 7. Атракционы

Fig. 7. Side show

Невозможно представить парк развлечений и отдыха г. Бобруйска без его центрального объекта – двухзального кинотеатра «Мир», открытого 1 декабря 1960 г. Изначально в нем было два зала («розовый» и «голубой») на 320 мест каждый (рис. 8).

После модернизации 2014 г. к услугам горожан были предоставлены современные бильярдные залы, настольный теннис, игровые автоматы, а кинозалы были названы: зал 1 и зал 2. В зале 1 установлено кинопроекторное оборудование, поддерживающее технологию 3D кинопоказа, его вместимость – 216 зрительских мест (рис. 8.1).



Рис. 8. Кинотеатр «Мир» (1963 г.)

Fig. 8. Cinema «Mir» (1963 г.)



Рис. 8.1. Кинотеатр «Мир» (2019 г.)

Fig. 8.1. Cinema «Mir» (2019 г.)

В центре парка находится большой фонтан, визуальнo разделяющий его пространство на две части. В одной из них разместились аттракционы и кинотеатр, а вторая часть парка предназначена для более спокойного и тихого отдыха. Фонтан со временем претерпел изменения. Он стал длиннее по протяженности, изменил свою форму и превратился в каскадный вариант. Вечерами и по праздникам фонтан приобретает разноцветную окраску, производимую подсветкой (рис. 9).

Вдоль фонтана (от начала парка до кинотеатра «Мир») по обе стороны размещены полукруглые деревянные лавочки для отдыха. Датский архитектор Ян Гейл утверждает: «Больше скамеек, больше людей на них, а сам факт наличия людей в пределах одного открытого пространства является показателем активности города и делает место живым, привлекательным» [1]. Главное заключается не только в том, чтобы свести людей в одно конкретное место, а то, как люди его используют. Пространство должно быть живым и доступным, тогда оно излучает дружественный посыл и несет в себе потенциал социального взаимодействия.

В парке имеются две открытые летние площадки для организации концертной деятельности. Основная площадка создана в центре парка, а малая эстрада – стационарно размещена недалеко от аттракционов и предназначена для проведения различных городских мероприятий. Например, летом на малой сцене эстрады проходит конкурс «Пой, гитарная струна...», который собирает талантливых исполнителей и слушателей музыки под гитару. Зимой там празднуют «Масленицу», выступают детские танцевальные коллективы и т. д. (рис. 10).



Рис. 9. Фонтан

Fig. 9. Fountain



Рис. 10. Летняя эстрада

Fig. 10. Summer stage

На большой сцене проходят мероприятия общегородского значения, например, встречи, посвященные Дню десантников и сил специальных операций, концерты народных коллективов Республики Беларусь, вокально-инструментального ансамбля «Каскад».

Подобные практики поведения в среде формата градской парк как рационально-прагматического, так и досугового, игрового, перформативного (фестивали, праздники, протесты и др.) предназначены для интерпретации этого вида городского пространства в качестве значимой для горожан дружественной среды. Многослойность образа парка, который совмещает в себе различные формы социального взаимодействия, делает его привлекательным для людей почтенного возраста, детей и молодежи (рис. 11).



Рис. 11. Отдых молодежи

Fig. 11. Young people recreation

Таким образом, главное предназначение городского развлекательного парка – это проведение культурно-массовой и физкультурно-оздоровительной работы, организация полноценного содержательного отдыха, массовых мероприятий и развлечений, культурного обслуживания населения. Городской парк по праву считается тем экологическим и общественным пространством, которое локализует в себе городскую активность.

Заключение

Рассмотренный визуальный объект следует отнести по своему функциональному назначению к паркам общественного типа. По контингенту посетителей – это всеобщий парк, поскольку популярен у различных категорий населения. По своему ландшафту – он относится к типу дендропарк, в котором произрастают различные, в том числе редкие виды деревьев и кустарников. По месту расположения – образец городского парка в малом городе. Нами представлена оценка данного объекта с точки зрения важных аспектов, которые рекомендуются при организации его деятельности [8]: размер, использование ландшафта, использование воды, тематизация и зонирование, освещение, музыка, организация зрелищ, символический персонаж, парк как модульная конструкция.

По своему размеру городской парк г. Бобруйска – это пространство, где достаточно места для развлечений и отдыха, здесь можно при желании найти уединение или почувствовать себя в массе живого пространства. В нем находится шумная территория с аттракционами и уединенные аллеи, бульвар для молодежной подвижной активности и многочисленные лавочки, а также спортивные зоны, игровые площадки, летние эстрады. Озеро используется в минимальном объеме, хотя имеется большой потенциал к преобразованию и более эффективному назначению.

Парк отлично зонирован, разделен на тематические зоны, оснащен специальными указателями, его освещение – это фонари возле каждой лавочки, а также в начале и конце главных аллей. В теплое время суток, особенно в выходные дни, парк дает возможность горожанам осуществлять свой рекреационный отдых под легкое музыкальное сопровождение. Кроме того, предоставляются площадки для концертной деятельности и проведения общегородских мероприятий. В качестве главного символического персонажа парка может выступить центральный фонтан, знакомый каждому жителю города, вид которого является визитной карточкой г. Бобруйска. Модульность конструкции парка обеспечивает возможность построить концертную площадку для специальных развлекательных мероприятий.

Люди выбирают определенное место для своей рекреационной деятельности и проводят там длительное время всей семьей, а это означает, что городской парк обладает высоким показателем качества. Мы можем говорить о живом городе, если люди имеют возможность открыто и беспрепятственно осуществлять элементарные базовые условия деятельности (ходить, стоять, сидеть, разговаривать, смотреть и слушать), находясь в обитаемом ландшафте, специально организованном для всевозможных видов досуга людей различных возрастов. Возможность всем желающим заниматься спортом на бесплатной основе означает повышение качества жизни людей, уменьшение расходов на свое здоровье и увеличение продолжительности жизни. Социальная и экологическая устойчивость городского пространства означает принцип равенства, когда любые социальные группы имеют доступ к привлекательному объекту. Таким образом, городские парки в малых городах должны учитывать значимость живого пространства и создавать дружественный посыл для того, чтобы каждый житель города стремился в это место, с одной стороны, обеспечивающее ему безопасное социальное взаимодействие, а с другой – радость от непосредственного присутствия в нем.

Библиографические ссылки

1. Гейл Я. *Города для людей*. Москва: Крост; 2012. 277 с.
2. Городские парки Минска: как не превратить архитектуру в лесопосадку? [Интернет]. [Прочитано 13 сентября 2019]. Доступно по: <http://urbanforester.by/index.php/news/267-gorodskie-parki-minska-kak-ne-prevratit-arhitekturu-v-lesoposadku.htm>.
3. Городской парк культуры и отдыха [Интернет]. [Прочитано 13 сентября 2019]. Доступно по: <http://tourbook.su/belarus/babruysk/park-and-recreation>.
4. В Бобруйском парке аттракционы заработают 10 апреля [Интернет]. [Прочитано 13 сентября 2019]. Доступно по: <https://komkur.info/kultura-i-dosug/bobruyskiy-park-zamer-v-ozhidanii-gosteyu>.
5. Кидуэлл П. *Психология города*. Москва: Манн, Иванов и Фербер; 2018. 288 с.
6. Литвенкова ИА. *Экология городской среды: урбозэкология*. Витебск: ВГУ им. П. М. Машерова; 2005. 163 с.
7. Анисимова ЛВ, Анисимов ЛЮ, Титоренко ЕН, Анисимов ВЮ. *Методические основы регенерации исторической городской среды*. Вологда: ВоГУ; 2017. 97 с.
8. Родионов ИМ. Парк развлечений как инновационная форма культурно-досуговой деятельности. *Молодой ученый*. 2010;5(2):231–234.
9. Сабанчеев РЮ. Концепция «мест памяти» Пьера Нора как способ исторической реконструкции. *Гуманитарные исследования в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке*. 2018;1:33–38.

References

1. Gail Y. *Gorod dla liudey* [Cities for people]. Moscow: Krost; 2012. 277 p. Russian.
2. Minsk city parks: how not to turn architecture into a forest plantation. [Internet]. [Cited 2019 September 13]. Available from: <http://urbanforester.by/index.php/news/267-gorodskie-parki-minska-kak-ne-prevratit-arhitekturu-v-lesoposadku.html>.
3. City park of culture and rest [Internet]. [Cited 2019 September 13]. Available from: <http://tourbook.su/belarus/babruysk/park-and-recreation>.
4. In Bobruisk Park, attractions will earn on April 10 [Internet]. [Cited 2019 September 13]. Available from: <https://komkur.info/kultura-i-dosug/bobruyskiy-park-zamer-v-ozhidanii-gostey>.
5. Kidwell P. *Psikhologia goroda* [Psychology of the city]. Moscow: Mann, Ivanov and Ferber; 2018. 288 p. Russian.
6. Litvenkova IA. *Ekologia gorodskoy sredy: urboekologia* [Ecology of the urban environment: uroboecology]. Vitebsk: VGU im. P. M. Masherova; 2005. 163 p. Russian.
7. Anisimova LV, Anisimov LYu, Titorenko EN, Anisimov VYu. *Metodicheskie osnovy regeneratsii istoricheskoy gorodskoy sredy* [Methodological foundations of the regeneration of the historical urban environment: a training manual]. Vologda: Vologodskiy gosudarstvennyy universitet; 2017. 97 p. Russian.
8. Rodionov IM. *Park razvlecheniy kak innovatsionnaya forma kul'turno-dosugovoy dejatel'nosti* [Amusement park as an innovative form of cultural and leisure activities]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2010;5(2):231–234. Russian.
9. Sabancheev RYu. *Kontseptsia «mest pamiaty» Pjera Nora kak sposob istoricheskoy rekonstruktsii* [The concept of «places of memory» of Pierre Nora as a way of historical reconstruction]. *Gumanitarnye issledovania v Vostochnoy Sibiri i na Dal'nem Vostoke* [Humanitarian studies in Eastern Siberia and the Far East]. 2018;1:33–38. Russian.

Статья поступила в редколлегию 27.12.2019.
Received by editorial board 27.12.2019.

ИЗУЧЕНИЕ

И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY

AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 632.772(476)

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ЛИЧИНКАМИ МИНИРУЮЩЕЙ МУХИ *CHROMATOMYIA APRILINA* GOUREAU, 1851 ЛИСТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИМОЛОСТИ ОБЫКНОВЕННОЙ (*LONICERA XYLSTEUM* L.) В УСЛОВИЯХ НАСАЖДЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА НАН БЕЛАРУСИ

М. В. ВОЛОСАЧ¹⁾

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

В насаждениях Центрального ботанического сада НАН Беларуси (г. Минск) в октябре 2018 г. выполнялась обработка гербарных сборов, поврежденных личинками минирующей мухи (*Chromatomyia aprilina* Goureau, 1851) листьев жимолости обыкновенной (*Lonicera xylosteum* L.). Она включала сканирование и последующее изучение полученных изображений методами компьютерной планиметрии. При этом отмечено, что площадь отдельных мин личинок *Ch. aprilina* на листовых пластинках *L. xylosteum* к концу вегетационного сезона составляла от 0,04 до 4,97 см², суммарная – 0,17–4,97 см². Относительная площадь поврежденной листовой поверхности варьировала от 1,13 до 52,92 %. Корреляция между площадью отдельных мин и общей площадью листовых пластинок, на которых они сформировались, выявлена не была. Показано, что площадь отдельных мин не может использоваться в качестве критерия для установления возраста личинок *Ch. aprilina*.

Ключевые слова: листовые мины; зеленые насаждения; филлобионты; Diptera; Agromyzidae.

Образец цитирования:

Волосач МВ. Оценка поврежденности личинками минирующей мухи *Chromatomyia aprilina* Goureau, 1851 листовой поверхности жимолости обыкновенной (*Lonicera xylosteum* L.) в условиях насаждений Центрального ботанического сада НАН Беларуси. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2020;1:13–16.

For citation:

Volosach MV. Assessment of damage caused by mining fly *Chromatomyia aprilina* Goureau, 1851 larvae to leaf surface of fly honeysuckle (*Lonicera xylosteum* L.) in the conditions of Central Botanical Gardens of the National Academy of Sciences of Belarus. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2020;1:13–16. Russian.

Автор:

Марина Владимировна Волосач – аспирантка кафедры зоологии биологического факультета.

Author:

Marina V. Volosach, post graduate student at the department of zoology, faculty biology.
marinavolosach@yahoo.com

ASSESSMENT OF DAMAGE CAUSED BY MINING FLY *CHROMATOMYIA APRILINA* GOUREAU, 1851 LARVAE TO LEAF SURFACE OF FLY HONEYSUCKLE (*LONICERA XYLOSTEUM* L.) IN THE CONDITIONS OF CENTRAL BOTANICAL GARDENS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

M. V. VOLOSACH^a

^aBelarusian State University,
4 Niezalezŋnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Based on the data, obtained by processing the herbarium collections of fly honeysuckle leaves (*Lonicera xylosteum* L.) damaged by mining fly (*Chromatomyia aprilina* Goureau, 1851) larvae carried out in the green areas of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk) in October 2018, that included scanning and subsequent processing of obtained images by computer planimetry methods, it was found that the area of individual mines of *Ch. aprilina* on *L. xylosteum* leaf blades by the end of the growing season ranged from 0.04 cm² to 4.97 cm², the total area – 0.17–4.97 cm². The relative area of the damaged leaf surface varied from 1.13 to 52.92 %. A correlation between the area of individual mines and the total area of leaf blades where they have been formed was not revealed. It was shown that the area of individual mines cannot be used as a criterion for determination of *Ch. aprilina* larval instars.

Key words: leaf mines; green areas; phyllobionts; Diptera; Agromyzidae.

Введение

Жимолость обыкновенная, или лесная (*Lonicera xylosteum* L.) – аборигенный вид флоры Беларуси, листопадный кустарник высотой до 3 м, хорошо переносящий условия антропогенного воздействия [1]. Имея декоративные формы, она находит применение, наряду с другими видами и садовыми формами жимолостей, в современном зеленом строительстве Беларуси, играя вспомогательную роль в парковых насаждениях, особенно создаваемых на месте естественных лесных массивов, выступая в составе подлеска и опушек [1]. По всей территории страны входит в состав подлеска рекреационно-оздоровительных лесов, расположенных в черте городов или в их ближайших окрестностях. Следует отметить, что выделение категории рекреационно-оздоровительных лесов предусмотрено последней редакцией Лесного кодекса Республики Беларусь от 2015 г. [2].

Рекреационно-оздоровительные леса используются в качестве мест массового отдыха, служат туристическим, культурно-воспитательным и другим целям, имеют важное эстетическое значение. Городские и пригородные леса испытывают существенный рекреационный пресс, приводящий к угнетению напочвенного покрова и древесно-кустарниковой растительности [3], поэтому их состояние нуждается в особом мониторинге. Дополнительный фактор, снижающий жизнеспособность растений и их декоративность, – воздействие со стороны фитофагов (грызущих, галло- или миноформирующих членистоногих).

Жимолости повреждаются комплексом фитофагов [4], в том числе минирующими мухами семейства Agromyzidae (Diptera). Все повреждающие жимолости агромизиды являются на стадии личинки эндобионтными филлофагами. Негативный эффект деятельности филлофагов заключается в снижении площади фотосинтезирующей поверхности за счет выедания личинками хлорофиллоносной паренхимы, что также ведет к уменьшению производимой биомассы. Повреждения минирующими личинками жилок листьев, то есть проводящих тканей, имеют следствием пожелтение и некроз целых листовых пластинок или их фрагментов [5]. Множественные нарушения целостности покровов при откладке яиц и питании самками агромизид соком растений служат «воротами» для проникновения различных инфекций растений, могут приводить к пожелтению и увяданию [6].

В условиях Беларуси *L. xylosteum* повреждают 6 видов агромизид, среди которых рассматриваемая в данной работе *Chromatomyia aprilina* Goureau, 1851 [7]. Ареал вида включает Ирландию, Британию, Норвегию, Францию (в том числе Корсику), Германию, Австрию, Чехию, Польшу, Португалию, Испанию, Италию и Северную Африку [8]. По спектру питания, – это олигофаг, развивающийся на жимолостях (*Lonicera* L.) и снежноягодниках (*Symphoricarpos* Duhamel) [9], принадлежащих к семейству Жимолостных (Caprifoliaceae).

Материалы и методы исследования

Для оценки повреждаемости листовой поверхности жимолости обыкновенной личинками *Ch. aprilina* использованы сборы листовых пластинок, выполненные на территории Центрального ботанического сада НАН Беларуси (г. Минск) в одной точке – 53.914030 N, 27.615220 E. Сбор проводился в октябре

(10.10.2018), после окончания периода развития личинок, что позволило установить итоговый уровень поврежденности. Собранный материал временно помещали в пакеты с застежкой zip-lock для сохранения влаги листьями, а затем гербаризировали общепринятыми методами [10]. Всего было проанализировано 113 листовых пластинок.

Идентификация минера осуществлялась по совокупности характеристик мин, которые являются видоспецифичными, а также по определительным таблицам специализированных интернет-порталов [9; 11; 12].

Для получения изображений поврежденных листьев использовали сканер Epson Perfection 4180 Photo (разрешение 300 dpi). Для расчета поврежденности листовых пластинок применяли специализированный графический редактор ImageJ в соответствии с методикой, предложенной Ф. В. Сауткиным [13]. Статистическая обработка данных, а именно расчет значений средних арифметических и непараметрического коэффициента ранговой корреляции по Спирмену (r_{sp}), проводилась средствами свободно распространяемого программного обеспечения PAST 3.25.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам выполненных определений площадей отдельных мин и площадей листовых пластинок, на которых они размещались, представляется возможным констатировать, что площади мин варьировали в диапазоне от 0,04 до 4,97 см² при среднем значении $1,29 \pm 0,94$ см² (коэффициент вариации переменной очень высокий – 72,80 %).

Мины личинок *Ch. aprilina* светлые, хорошо контрастирующие окраской с неповрежденными участками листовых пластинок, что обеспечивает высокую точность определения их площади методами компьютерной планиметрии. Расположившись на нижней стороне листовой пластинки, мина переходит на верхнюю ее сторону, размещаясь вдоль главной жилки листа, от которой отходят коридоры по обе ее стороны. Мины часто коллективные, обширные, по нашим наблюдениям, в каждой может развиваться до 5 личинок. Это делает проблематичной дифференциацию мин как по возрастам формирующих их личинок, так и по числу населяющих отдельную мину их экземпляров.

На рис. представлена диаграмма рассеяния значений показателя площади отдельных мин личинок *Ch. aprilina* на листовых пластинках *L. xylosteum*. Как следует из характера размещения точек, некоторые их сгущения визуализация выделить не позволяет. Таким образом, размерная дифференциация мин не может быть инструментом ни для определения возраста личинок, ни для установления числа населяющих отдельную мину личинок *Ch. aprilina*.

При этом не выявлена корреляция между площадью отдельных мин личинок жимолостной минирующей мухи и площадью поверхности листовых пластинок, на которых они сформированы ($r_{sp} = 0,17$).

Суммарная площадь мин *Ch. aprilina* на листовых пластинках *L. xylosteum* варьировала от 0,17 до 4,97 см². При этом относительная поврежденность листовой поверхности отдельных листьев жимолости обыкновенной составляла от 1,13 до 52,92 %. В каждом случае следует говорить о высоком уровне поврежденности листьев минерами, что не может не иметь следствием существенное снижение декоративности.

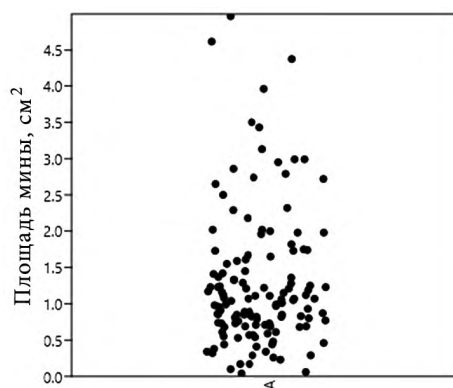


Рис. Диаграмма рассеяния значений показателя площади отдельных мин личинок минирующей мухи *Chromatomyia aprilina* Goureau, 1851 на листовых пластинках жимолости обыкновенной (*Lonicera xylosteum* L.)

Fig. The scatter plot of the area (square) index values of individual mines of the mining fly *Chromatomyia aprilina* Goureau, 1851 larvae on the leaf plates of Fly honeysuckle (*Lonicera xylosteum* L.)

Таким образом, для установления средней площади мин личинок *Ch. aprilina* разных возрастов необходимы дополнительные исследования, в ходе которых возраст будет определяться не на основе значений показателя площади отдельных мин, а по признакам формирующих их личинок.

Заклучение

По результатам выполненных исследований установлено, что площадь одиночных мин личинок жимолостной минирующей мухи (*Chromatomyia aprilinea* Gougeau, 1851) на листовых пластинках жимолости обыкновенной (*Lonicera xylosteum* L.), произрастающей в насаждениях Центрального ботанического сада НАН Беларуси (г. Минск), к концу вегетационного сезона составляла от 0,04 до 4,97 см², тогда как суммарная – от 0,17 до 4,97 см².

Относительная площадь поврежденной минером листовой поверхности составляла от 1,13 до 52,92 %. Не выявлена корреляция между площадью мин и общей площадью листовых пластинок, на которых они сформировались. С использованием диаграммы рассеяния продемонстрировано, что площадь мин не может использоваться как критерий для установления возраста формирующих их личинок *Ch. aprilinea*.

Библиографические ссылки

1. Чаховский АА, Орленок ЕИ. Культура жимолости в Белоруссии. Минск: Наука и техника; 1989. 70 с.
2. Лесной кодекс Республики Беларусь от 24 декабря 2015 г. № 332-З. *Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь*. 2015;2(2330).
3. Горшков СП. *Концептуальные основы геоэкологии*. Смоленск: Смоленский гуманитарный университет; 1998. 288 с.
4. Сауткин ВФ. Таксономический состав и структура комплекса членистоногих-фитофагов – вредителей жимолостей (*Lonicera* spp.) в условиях зеленых насаждений Беларуси. В: *Структура и динамика биоразнообразия. Материалы I Республиканской заочной научно-практической конференции молодых ученых, Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2019. с. 75–80.
5. Michalska Z, Myssura M. Damages caused by leaf-mining flies (Diptera: Agromyzidae, Anthomyiidae). *Dipteron*. 2007;23:21–25.
6. Civelek H.S., Önder F. An investigation on the role of leafminers (Diptera: Agromyzidae) on transmission of plant diseases. *Turkish Journal Entomology*. 1997;21:233–241.
7. Волосач МВ, Буга СВ. Комплексная оценка вредоносности минирующих мух (Diptera: Agromyzidae) – вредителей декоративных древесных растений Беларуси. В: *Защита растений. Сборник научных трудов*. 2019; 43:220–229.
8. Martinez M. 2013. Fauna Europaea. Version 2.4 [Internet; cited 2020 February 7]. Available from: <http://www.faunaeur.org>.
9. Ellis WN. Plant Parasites of Europe: leafminers, galls and fungi [Internet; cited February 7]. Available from: <http://www.bladmineers.nl>.
10. Гельтман ДВ, редактор. *Гербарное дело: справочное руководство: русское издание*. Кью: Королевский ботанический сад; 1995. 341 с.
11. Edmunds R. British Leafminers [Internet; cited 2020 February 7]. Available from: <http://www.ukflymines.co.uk>.
12. Pitkin B, et al. The leaf and stem mines of British flies and other insects [Internet; cited 2020 February 7]. Available from: <http://www.leafmines.co.uk>.
13. Сауткин ВФ. *Использование программных средств анализа цифровых изображений для определения размерных характеристик биологических объектов*. Минск: БГУ; 2013. 28 с.

References

1. Chakhovskii AA, Orlenok EI. *Kul'tura zhimolosti v Belorussii* [Honeysuckle cultivation in Belarus]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1989. 70 p. Russian.
2. *Lesnoi kodeks Respubliki Belarus' ot 24 dekabrya 2015 g. № 332-3* [The Forestry Code of the Republic of Belarus of December 24, 2015. № 332-3]. *Natsional'nyy reestr pravovyykh aktov Respubliki Belarus'*. 2015;2(2330). Russian.
3. Gorshkov SP. *Kontseptual'nye osnovy geoekologii* [Conceptual fundamentals of geoecology]. Smolensk: Smolenskiy gumanitarnyy universitet; 1998. 288 p. Russian.
4. Sautkin FV. *Taksonomicheskii sostav i struktura kompleksa chlenistonogikh-fitofagov – vrediteli zhimolostei (Lonicera spp.) v usloviyakh zelenykh nasazhdenii Belarusi* [The taxonomic composition and structure of the arthropod-phytophages complex – pests of honeysuckle (*Lonicera* spp.) in the green areas in Belarus]. In: *Struktura i dinamika bioraznoobraziya. Materialy I Respublikanskoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, Minsk, Belarus'*. Minsk: BGU; 2019. с. 75–80. Russian.
5. Michalska Z, Myssura M. Damages caused by leaf-mining flies (Diptera: Agromyzidae, Anthomyiidae). *Dipteron*. 2007;23:21–25.
6. Civelek HS, Önder F. An investigation on the role of leafminers (Diptera: Agromyzidae) on transmission of plant diseases. *Turkish Journal Entomology*. 1997;21:233–241.
7. Volosach MV, Buga SV. *Kompleksnaya otsenka vredonosnosti miniruyushchikh mukh (Diptera: Agromyzidae) – vrediteli dekorativnykh drevesnykh rastenii Belarusi* [Complex harmfulness assessment of mining flies (Diptera: Agromyzidae) – pests of ornamental woody plants in Belarus]. In: *Zashchita rastenii. Sbornik nauchnykh trudov*. 2019;43:220–229. Russian.
8. Martinez M. 2013. Fauna Europaea. Version 2.4 [Internet; cited 2020 February 7]. Available from: <http://www.faunaeur.org>.
9. Ellis WN. Plant Parasites of Europe: leafminers, galls and fungi [Internet; cited February 7]. Available from: <http://www.bladmineers.nl>.
10. Gel'tman DV, editor. *Gerbarnoe delo: spravochnoe rukovodstvo* [Herbarium: reference guide]. K'yu: Korolevskiy botanicheskiy sad; 1995. 341 p. Russian.
11. Edmunds R. British Leafminers [Internet; cited 2020 February 7]. Available from: <http://www.ukflymines.co.uk>.
12. Pitkin B, et al. The leaf and stem mines of British flies and other insects [Internet; cited 2020 February 7]. Available from: <http://www.leafmines.co.uk>.
13. Sautkin VF. *Ispol'zovanie programnykh sredstv analiza tsifrovyykh izobrazhenii dlya opredeleniya razmernykh kharakteristik biologicheskikh ob'ektov* [The use of digital image analysis software for determining the dimensional characteristics of biological objects]. Minsk: BGU; 2013. 28 p. Russian.

УДК [576.8]

ЭКОЛОГО-ФАУНИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПАРАЗИТОЦЕНОЗОВ ЖИВОТНЫХ МИНСКОГО ЗООПАРКА

Е. Ю. ЖУК¹⁾, М. В. МЕЛЬНИК¹⁾, Е. И. БОДРОВА²⁾, А. О. РЯБЦЕВ²⁾

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

²⁾Государственное культурно-просветительское учреждение «Минский зоопарк»,
ул. Ташкентская, 40, 220066, г. Минск, Беларусь

Эколого-фаунистические исследования паразитов у обитателей Минского зоопарка позволяют оценить состояние их фаунистического состава для проведения профилактических и противопаразитарных мероприятий. Качественная структура паразитоценозов копытных зоопарка включает три рода паразитических простейших (*Eimeria*, *Balantidium*, *Isospora*) и пять – гельминтов (*Trichocephalus*, *Strongylata*, *Capillaria*, *Fasciola*, *Nematodirus*). Основной хозяин паразитов среди копытных Минского зоопарка – Кабан европейский (*Sus scrofa*). Его паразитоценоз представлен двумя родами гельминтов – *Trichocephalus* и *Strongylata* и всеми паразитическими простейшими, обнаруженными у обитателей зоопарка, – *Eimeria*, *Balantidium*, *Isospora*.

Ключевые слова: паразитоценоз; паразитические простейшие; гельминты; копытные; зоопарк.

ECOLOGICAL FAUNAL ASSESSMENT OF ANIMALS PARASITOCENOSIS CONDITION OF THE MINSK ZOO

A. Yu. ZHUK^a, M. V. MELNIK^a, E. I. BODROVA^b, A. O. RYABTSEV^b

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daihabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

^bState Cultural and Educational Institution «Minsk Zoo»
40 Tashkent Street, Minsk 220066, Belarus

Corresponding author: A. G. Chernetskaya (chealval@gmail.com)

Ecological and faunal studies of the animals' parasites living in the Minsk Zoo allow to assess the state of the faunistic composition of their parasites in order to carry out preventive and antiparasitic measures. The qualitative structure of parasitocenoses of ungulates of the zoo includes three genera of parasitic protozoa: *Eimeria*, *Balantidium*, *Isospora* and five helminths: *Trichocephalus*, *Strongylata*, *Capillaria*, *Fasciola* and *Nematodirus*. The main host of parasites among ungulates of the Minsk Zoo is the European wild boar (*Sus scrofa*). Its parasitocenosis is represented by two genera of helminths: *Trichocephalus* and *Strongylata* and all parasitic protozoa that live in the inhabitants of the zoo: *Eimeria*, *Balantidium* and *Isospora*.

Key words: parasitocenosis; parasitic protozoa; helminthes; ungulates; zoo.

Образец цитирования:

Жук ЕЮ, Мельник МВ, Бодрова ЕИ, Рябцев АО. Эколого-фаунистическая оценка состояния паразитоценозов животных Минского зоопарка. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;1:17–22.

For citation:

Zhuk AYU, Melnik MV, Bodrova EI, Ryabtsev AO. Ecological faunal assessment of animals parasitocenosis condition of the Minsk Zoo. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;1:17–22. Russian.

Авторы:

Елена Юрьевна Жук – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры общей биологии и генетики.
Марина Вячеславовна Мельник – магистр биологических наук.
Елена Ильинична Бодрова – младший научный сотрудник.
Алексей Олегович Рябцев – ветеринар.

Authors:

Alena Yu. Zhuk, PhD (biology), docent, associate professor at the department of general biology and genetic.
zhukelena@yandex.ru
Marina V. Melnik, master of biological sciences.
marina_melnik_97@bk.ru
Elena I. Bodrova, junior researcher.
prosvetzoo@tut.by
Alexey O. Ryabtsev, veterinary.
prosvetzoo@tut.by

Введение

Условия существования обитателей зоопарков в значительной степени отличаются от природных, что сказывается на поведении животных, содержащихся в неволе. На их состояние существенно влияют физиологические процессы, обусловленные паразитарными заболеваниями различной этиологии, оказывающими неблагоприятное воздействие на организм животного, испытывавшего инвазию. Отрицательная роль паразитов как отдельных, так и в комплексе, проявляющаяся в снижении репродуктивной способности у малочисленных ценных видов животных зоопарков, заключается в существенном экономическом ущербе и ставит эту проблему в ряд актуальных. Кроме того, больные особи становятся источником заражения здоровых обитателей зоопарка. Существование животных в неволе индуцирует изменения в структуре паразитоценозов, обуславливает особенности протекания жизненного цикла паразитов. Зараженные животные представляют собой интенсивные и динамичные источники распространения инвазии, чему способствует ограниченное пространство, более плотное и продолжительное скопление на определенной территории. Даже незначительная инвазия в условиях зоопарка может причинить ощутимый вред воспроизводству, снизить рост поголовья и продуктивность животных, а нередко – вызвать их падеж. Инвазированные особи более восприимчивы к инфекционным заболеваниям и тяжелее переносят условия существования [1]. Изучение состояния паразитофауны обитателей зоопарка является одним из основных аспектов экологических исследований, которые позволяют дать оценку паразитарной ситуации, планировать санитарные, противоэпидемические и лечебно-профилактические мероприятия, а также контролировать их эффективность. Выявление структурной организации паразитов и мониторинг их в условиях зоопарков актуальны, поскольку важны для разработки рациональных методов профилактики и радикального оздоровления.

Научные исследования в зоопарках направлены на изучение биологии редких видов, особенностей поведения животных, обитающих в неволе. Важным аспектом в данном направлении является изучение вопросов разведения и содержания животных, а также проблемы, влияющей на состояние популяции, наличие возбудителей болезней различной этиологии. Исследования, связанные с распространением паразитов среди обитателей зоопарков, крайне немногочисленные [4].

Содержание животных в условиях неволи или в условиях городской среды оказывает определенное влияние на функционирование системы паразит–хозяин. Сбалансированность паразитарных систем порой непредсказуема. Она нарушается в условиях значительной трансформации окружающей среды, происходящей под влиянием антропогенных факторов [5]. Вольерное содержание особей животных влияет на структуру паразитоценозов, может вызывать заболевания и усилить обострение при протекании болезни в условиях неволи. Паразитоценозы обитателей зоопарка оказывают определенное влияние на характер существования организмов, способствуют снижению иммунитета и предрасположенности к различным заболеваниям [2; 6].

Материалы и методы исследования

Функционирование зоопарков в Республике Беларусь заключается в проведении научных исследований, осуществляемых ветеринарным и просветительским и отделами, изучении болезней обитателей зоопарка, а также наблюдении за их поведением. Проведение ветеринарно-диагностических мероприятий по выявлению паразитов осуществляется в соответствии с плановой санитарно-профилактической деятельностью. Основные методы прижизненной диагностики паразитов – гельминтокопрологические и копропротозооскопические исследования. Диагностика паразитов обитателей ГКПУ «Минский зоопарк» осуществлялась посредством стандартных методов исследования [3]. Объектами для установления паразитофауны явились представители отряда копытные среди обитателей зоопарка.

Результаты исследования и их обсуждение

Эколого-фаунистическая характеристика паразитоценозов простейших копытных – обитателей Минского зоопарка. На наличие паразитов обследовано 16 видов копытных животных – представителей отрядов непарнокопытные и парнокопытные. Отряд непарнокопытные представлен семейством Лошадные (Equidae) (виды: Домашняя лошадь (*Equus ferus caballus*), Верховой пони (*Eq. caballus*) и Домашний осел (*Equus asinus asinus*)). Отряд парнокопытные представлен 4 семействами: Свиные (Suidae) (виды: Кабан европейский (*Sus scrofa*) Вьетнамская свинья (*S. bucculentus*), Карликовая свинья (*S. salvanius*)), Пекариевые (Tayassuidae) (вид – Ошейниковый пекари (*Tayassu (Pecari) tajacu*)), Оленевые (Cervidae) (виды: Европейская косуля (*Capreolus capreolus*), Олень Давида (*Elaphurus davidianus*), Лось сохатый (*Alces alces*)), семейство полорогие Полорогие (Bovidae) (виды – Зубр европейский (*Bison bonasus*), Камерунская коза (*Capra hircus*), Камерунская овца (*Ovis ammon aries*), Винторогий козел (*Capra falconeri heptneri*), Домашняя овца (*Ov. orientalis*)).

Фаунистическая структура паразитоценозов копытных представлена простейшими паразитами, которые относятся к трем родам – *Eimeria*, *Balantidium*, *Isospora* и паразитическими червями, представленными 5 родами гельминтов – *Trichocephalus*, *Capillaria*, *Fasciola*, *Strongylata* и *Nematodirus*.

Паразитические простейшие, зарегистрированные у копытных зоопарка, принадлежат к типам Споровики (*Sporozoa*) и Инфузории (*Ciliophora*) (табл. 1).

Таблица 1

Паразитические простейшие копытных – представителей ГКПУ «Минский зоопарк»

Table 1

Parasitic protozoa of ungulates – representatives of «Minsk Zoo»

Род паразита	Хозяин	Интенсивность заражения (экз/зараж.экз.)
<i>Eimeria</i>	Домашний осел (<i>Equus asinus dom.</i>)	11, 2
	Вьетнамская свинья (<i>Sus bucculentus</i>)	1,8
	Кабан европейский (<i>Sus scrofa</i>)	434,1
	Ошейниковый пекари (<i>Tayassu (Pecari) tajacu</i>)	0,8
	Лось сохатый (<i>Alces alces</i>) и т. д.	15,1
	Европейская косуля (<i>Capreolus capreolus</i>)	122,3
	Зубр европейский (<i>Bison bonasus</i>)	30,5
	Камерунская коза (<i>Copra giricus</i>)	14,4
	Домашняя овца (<i>Ovis orientalis</i>)	86,1
	Домашняя коза (<i>Capra hircus</i>)	18,9
	Камерунская овца (<i>Ovis ammon aries</i>)	80,1
	Винторогий козел (<i>Capra falconeri heptneri</i>)	131,8
<i>Balantidium</i>	Кабан европейский (<i>Sus scrofa</i>)	4,1
	Вьетнамская свинья (<i>Sus bucculentus</i>)	100,1
<i>Isospora</i>	Кабан европейский (<i>Sus scrofa</i>)	13,1

Простейшие рода *Eimeria* являются доминирующими и зарегистрированы у 12 видов обследованных копытных. Паразитические простейшие рода *Balantidium* являются специфичными паразитами семейства Свиные и зарегистрированы у типичных представителей: Кабан европейский (*S. scrofa*), Вьетнамская свинья (*Sus bucculentus*). Паразитические простейшие рода *Isospora* зарегистрированы только у Кабана европейского. Показатели интенсивности заражения простейшими рода *Eimeria* варьировали от единичных экземпляров до значения средней интенсивности на одну особь 434,1 у Кабана европейского (*S. scrofa*).

Простейшие, принадлежащие к роду *Eimeria*, регистрировались в течение всего периода обследования у представителей различных семейств копытных обитателей зоопарка (рис. 1).

Простейшие рода *Eimeria* находят хозяев и у животных, обитающих в дикой природе, что также нашло отражение в результатах наших исследований. Мониторинг за состоянием зараженности обитателей зоопарка представителями рода *Eimeria* является важным элементом профилактических мероприятий, направленных на предотвращение распространения заражения эймериозом копытных зоопарка.

Наиболее богатая паразитофауна простейших обнаружена у вида Кабан европейский. У него выявлены представители всех трех родов простейших паразитов, обнаруженных в результате общего исследования. Отмечено, что именно данный вид обитателей копытных зоопарка должен быть объектом постоянного паразитологического контроля. Таким образом, требуется проведение мониторинговых исследований для оценки паразитологической ситуации и осуществление мероприятий по дезинвазии мест содержания животных, пунктов их кормления и поения, изолированное содержание и выпас молодняка, обеззараживания навоза.

Эколого-фаунистическая характеристика паразитоценозов гельминтов копытных обитателей Минского зоопарка. Фауна гельминтов копытных обитателей Минского зоопарка представлена 5 родами гельминтов (*Trichocephalus*, *Capillaria*, *Fasciola*, *Strongylata*, *Nematodirus*), принадлежащих к 3 типам, – *Trematoda*, *Cestoda*, *Nematoda* (табл. 2.). Зарегистрированные гельминты, кроме гельминта рода *Fasciola*, относятся к группе геогельминтов, поэтому их распространение тесно связано с условиями обитания обитателей зоопарка.

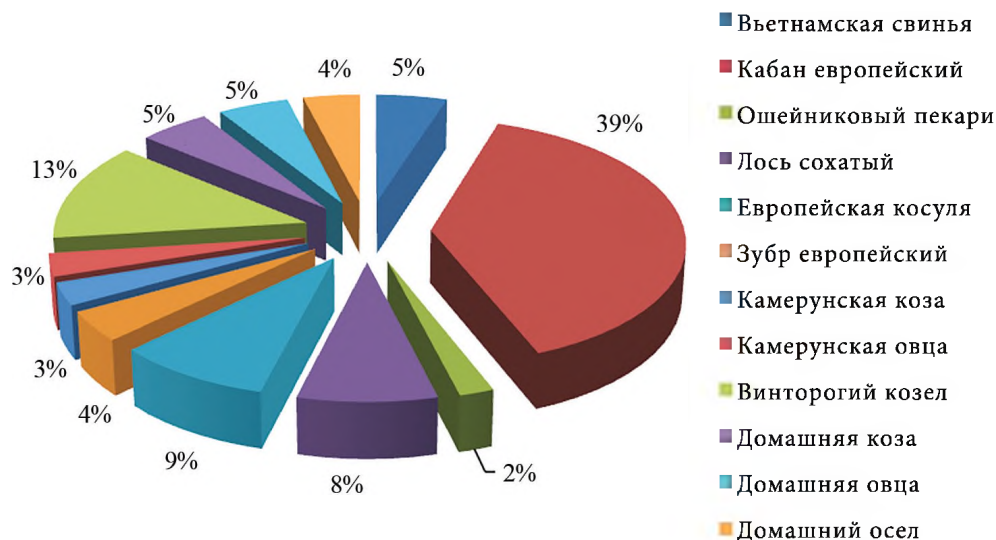


Рис. 1. Зараженность копытных обитателей зоопарка простейшими рода Eimeria

Fig. 1. Infection of hoofed inhabitants of the zoo by protozoa of the genus Eimeria

Таблица 2

Гельминты копытных – представителей ГКПУ «Минский зоопарк»

Table 2

Helminths of ungulates – representatives of the State Public Institution «Minsk Zoo»

Род	Хозяин	Интенсивность зараженности (экз/зараж. экз.)
Trichocephalus	Кабан европейский (<i>Sus scrofa</i>)	2,5
	Лось сохатый (<i>Alces alces</i>)	5
Capillaria	Ошейниковый пекари (<i>Tayassu tajacu</i>)	0,8
	Винторогий козёл (<i>Capra falconeri heptneri</i>)	1,7
Fasciola	Олень Давида (<i>Elaphurus davidianus</i>)	0,3
Strongylata	Кабан европейский (<i>Sus scrofa</i>)	30,5
	Вьетнамская свинья (<i>S. bucculentus</i>)	0,4
	Европейская косуля (<i>Capreolus capreolus</i>)	12,3
	Олень Давида (<i>Elaphurus davidianus</i>)	3
	Зубр европейский (<i>Bison bonasus</i>)	6
	Камерунская коза (<i>Copra gircus</i>)	33,6
	Винторогий козёл (<i>Cap. falconeri heptneri</i>)	93,8
	Лось сохатый (<i>Alces alces</i>)	4
	Камерунская овца (<i>Ovis ammon u aries</i>)	17,8
	Домашняя лошадь (<i>Equus caballus</i>)	2,6
	Пони верховой (<i>Equus caballus</i>)	50,5
Nematodirus	Олень Давида (<i>Elaphurus davidianus</i>)	2,33

Показатели интенсивности зараженности для различных гельминтов колебались от 0,33 у оленя Давида (*Fasciola*) до 93,8 у винторогого козла (*Strongylata*). Встречаемость паразитических гельминтов различна, но наибольший круг хозяев характерен для гельминтов рода *Strongylata*, который был зарегистрирован у 12 видов копытных обитателей зоопарка: Кабан европейский, Вьетнамская свинья, Европейская косуля, Олень Давида, Зубр европейский, Камерунская коза, Винторогий козел, Лось сохатый, Камерунская овца,

Домашняя лошадь, Пони верховой. Наибольшая степень инвазии на одну особь была выявлена у Винторогого козла и составила 93,8 экземпляров (рис. 2.).

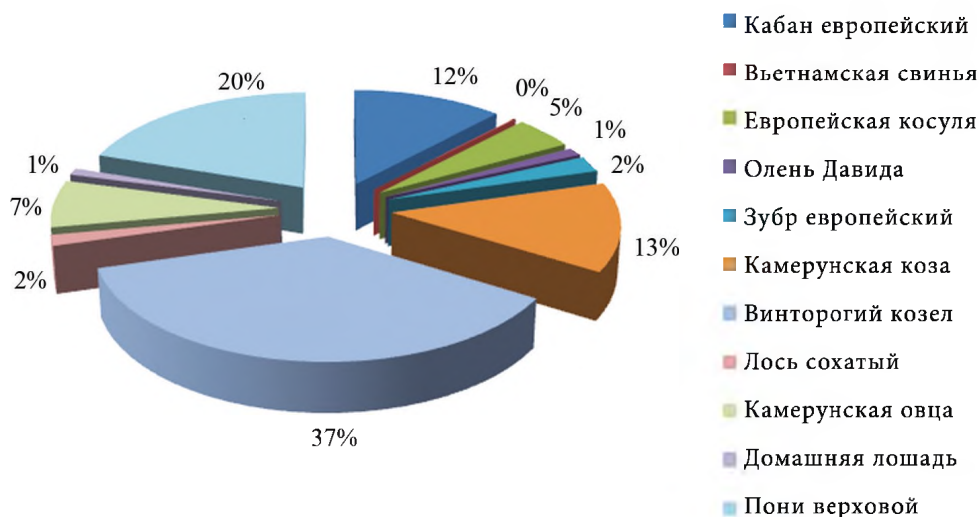


Рис. 2. Круг хозяев гельминта рода Strongylata

Fig. 2. The host circle of the helminth of the genus Strongylata

Стронгилоидоз – паразитарная инфекция, которая характеризуется затяжным течением. Из этого следует, что необходимо ежедневно и тщательно убирать навоз как основной резервуар инвазии, а животных следует подвергать неоднократной дегельминтизации. Тщательного выполнения этих мероприятий достаточно, чтобы ликвидировать стронгилятозы. При полноценном кормлении и нормальных условиях размещения животных они в большинстве случаев протекают бессимптомно.

Заключение

Содержание животных в зоопарках всегда связано с проблемами, решение которых зависит от проведения необходимых мероприятий на основе мониторинга состояния обитателей зоопарка. Проблема наличия у них паразитов является особенно актуальной, так как определяет состояние не только самих хозяев, но и состояние животных, которые имеют непосредственный контакт с людьми.

Паразитозы в максимальной степени отражают негативные процессы, связанные с нарушением естественной экологии животных. В условиях ограничения воли животных, а также плотного и продолжительного их скопления на определенной территории зараженность и перезаражение животных паразитическими организмами происходит более интенсивно и динамично. Изучение паразитофауны обитателей зоопарка необходимо для проведения профилактических мероприятий по распространению паразитарных заболеваний и улучшению существования самих животных.

Выявлена фаунистическая структура паразитоценозов копытных обитателей ГКПУ «Минский зоопарк», которая включает три рода паразитических простейших – *Eimeria*, *Balantidium*, *Isospora* и пять родов гельминтов – *Trichocephalus*, *Strongylata*, *Capillaria*, *Fasciola*, *Nematodirus*.

Показано, что доминирующим паразитом среди паразитических простейших копытных является род *Eimeria*, который зарегистрирован у 12 представителей копытных обитателей зоопарка. Выявлены максимальные показатели зараженности для вида Кабан европейский (*S. scrofa*). Доминирующий представитель гельминтов – род *Strongylata*, для которого характерен наибольший круг хозяев среди копытных обитателей ГКПУ «Минский зоопарк».

Основной хозяин паразитов среди копытных – Кабан европейский. Паразитоценоз кабана представлен гельминтами родов *Trichocephalus* и *Strongylata*, а также паразитическими простейшими, принадлежащими к родам *Eimeria*, *Balantidium*, *Isospora*.

Установлено, что возможным источником заражения среди обитателей зоопарка является кабан. Для своевременного предотвращения возможностей заболеваний других животных необходимо проводить ряд профилактических мероприятий и своевременно выявлять возможный источник заражения.

Полученные результаты – это составной элемент комплексных исследований, проводимых на базе ГКПУ «Минский зоопарк» в рамках договора о сотрудничестве с Международным государственным экологическим институтом имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета.

Библиографические ссылки

1. Есаулова НВ. Гельминтозы зоопарковых животных отряда *Carnivora* и меры борьбы с ними. В: *Актуальные ветеринарные проблемы в зоопарках. Межведомственный сборник научных и научно-методических трудов, Москва, 20–26 октября 2008 г.* Москва: Московский зоопарк; 2009. с. 52–56
2. Корнеева ВИ. Профилактика инфекционных заболеваний хищных млекопитающих в Московском зоопарке. В: Андреева ТФ. и др., редколлегия. *Хищные и морские млекопитающие в искусственной среде обитания. Межведомственный сборник научных и научно-методических трудов, Москва, 14–18 ноября 2005 г.* Москва: Московский зоопарк; 2006. с. 23–26.
3. Котельников ГА. Гельминтологические исследования животных и окружающей среды. *Справочник.* Минск: Колос; 1984. 208 с.
4. Попов СВ, Вахрушева ГВ. Научные исследования в зоологических парках. В: *Межведомственный сборник научных и научно-методических трудов.* Москва: Московский зоопарк; 2014. Выпуск 30. с. 5–21
5. Сонин МД, Безр СА, Ройтман ВА. Паразитарные системы в условиях антропопрессии (проблемы паразитарного загрязнения). *Паразитология.* 1997;31(5):452–457.
6. Требоганова НВ. Поведение зубров и гельминтозы. В: *Копытные в зоопарках и питомниках. Межведомственный сборник научных и научно-методических трудов.* Москва: Московский зоопарк; 2005. с. 249–255.

References

1. Esaulova NV. *Gel'mintozy zooparkovykh zhivotnykh otrada Garnivora I mery bor'by s nimi* [Helminthiasis of zoo animals of the order Carnivora and measures to combat them]. In: *Aktual'nye vtterinarnye problem v zooparkakh* [Actual veterinary problems in zoos]. *Mezhvedovstvennyy sbornik nauchnykh i nauchno-metodicheskikh trudov, Moskva, 2008 Oktjabr' 20–26.* Moscwa: Moscow Zoo, 2009. p. 52–56.
2. Korneeva VI. Prevention of infectious diseases of carnivorous mammals in the Moscow Zoo. In: Andreeva TF, et al. editorial. *Khishchnye morskie mlekopitajushchie v iskusstvennoy srede obitania* [Predatory and marine mammals in an artificial habita]. *Mezhvedovstvennyy sbornik nauchnykh i nauchno-metodicheskikh trudov, Moskva, 2005 Nojabr' 14–18.* Moscow: Moscw zoo; 2006. p. 23–26.
3. Kotelnikov GA. *Gel'mintologicheskie issledovanija zhivotnykh i okruzhajushchey sredy. Spravochnik* [Helminthological studies of animals and the environment: reference book]. Minsk: Kolos; 1984. 208 p.
4. Popov SV, Vakhrusheva GV. *Nauchnye issledovania v zoologicheskikh parkakh* [Scientific research in zoological parks]. *Mezhvedovstvennyy sbornik nauchnykh i nauchno-metodicheskikh trudov.* Moscow: Moscow Zoo; 2014. Issue 30. p. 5–21.
5. Sonin MD, Beer SA, Roitman VA. Parasitic systems under conditions of anthropopression (problems of parasitic pollution). *Parazitologia* [Parasitology]. 1997;31(5):452–457.
6. Treboganova NV. *Povedenie zubrov i gel'mintozy* [Behavior of bison and helminth infections]. In: *Kopytnye v zooparkakh i pitomnikakh* [Ungulates in zoos and nurseries]. *Mezhvedovstvennyy sbornik nauchnykh i nauchno-metodicheskikh trudov.* Moscow: Moscow Zoo; 2005. p. 249–255.

Статья поступила в редакцию 05.02.2020.
Received by editorial board 05.02.2020.

УДК 633.85;502.521:631.6;504.5-03]:[581.1+591.1;502.52:502.175:658.274

COMPREHENSIVE EVALUATION OF THE PHYTOREMEDITICAL ABILITY OF A NUMBER OF AGRICULTURAL CROPS FOR THE RESTORATION OF POLLUTED WITH HEAVY METALS SOILS

L. P. LOSEVA^a, T. K. KRUPSKAYA^a, S. N. ANUCHIN^a, S. S. ANUFRICK^a

^aYanka Kupala State University of Grodno,
22 Ažeshka Street, Grodno 230023, Belarus

Corresponding author: L. P. Loseva (spirulina1945@gmail.com)

During the work, the method of X-ray fluorescence analysis (XRF) has been used, which allows analyzing the content of various chemical elements from sulfur to uranium in samples of various nature (soil, plants). This method allows analyzing samples without complicated and lengthy sample preparation. In the course of work, model systems for heavy metals («soil–lead», «soil–cadmium», «soil–cadmium–lead») within the limits of 1–3 maximum permissible concentrations (MPC) for growing colza & flax have been compiled, bioelement gross concentrations have been determined. As a result of the work, one of the possible ways of removing heavy metals (HM) from contaminated soils, monitoring the environmental safety of a soil cover, as well as the opportunity to assess the phytoremediation ability of agricultural crops are proposed. A quantitative assessment of the content of trace and macroelements in the sod-podzolic soil as well as in model compositions based on it is presented. Bench studies on the cultivation of technical colza and flax on the proposed mixtures have been carried out. It has been shown that different concentrations of cadmium and lead have different effects on seed germination and plant growth dynamics. An increase in the concentration of heavy metals in the soil reduces the percentage of seed germination. Seed germination on the clean sod-podzolic soil is the highest – 80 %. The degree of the environmental safety of soils before and after the cultivation of technical colza and flax has been assessed. In some cases, the cultivation of technical colza and flax made it possible to reduce the total soil pollution by 3.1 times. It is shown that during the cultivation of industrial crops, metals are intensively absorbed and largely accumulate in the aboveground organs of plants. After harvesting the phytomass, the level of soil pollution risk is significantly reduced. Thus, the removal of chemical elements from the soil with industrial crops contributes to its self-cleaning. The results of the study will make it possible to expand the range of optimal crops for the phytoremediation of the soils contaminated with lead and cadmium.

Key words: X-ray fluorescence analysis; soil; heavy metals; agricultural crops, restoration of polluted soils.

Acknowledgment. This work was financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, project #B17IC-034 «Comprehensive assessment of the phytoremediation ability of some agricultural crops for the restoration of heavy metals polluted soils».

For citation:

Лосева ЛП, Крупская ТК, Анучин СН, Ануфрик СС. Комплексная оценка фиторемедиационной способности ряда сельскохозяйственных культур для восстановления загрязненных тяжелыми металлами почв. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;1:23–31. (На англ.)

Образец цитирования:

Loseva LP, Krupskaya TK, Anuchin SN, Anufrikk SS. Comprehensive evaluation of the phytoremeditational ability of a number of agricultural crops for the restoration of polluted soils with heavy metals. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;1:23–31.

Авторы:

Людмила Павловна Лосева – кандидат химических наук; ведущий научный сотрудник.

Татьяна Константиновна Крупская – старший преподаватель кафедры теоретической физики и теплотехники.

Сергей Николаевич Анучин – заведующий лабораториями кафедры теоретической физики и теплотехники.

Славамир Степанович Ануфрик – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники.

Authors:

Ludmila P. Loseva, PhD (chemistry), leading researcher. spirulina1945@gmail.com

Tatyana K. Krupskaya, senior lecturer at the department of theoretical physics and heat engineering.

krupskaya_tk@grsu.by

Sergei N. Anuchin, head of the laboratories at the department of theoretical physics and heat engineering.

fxm1005@mail.ru

Slavimir S. Anufrikk, doctor of science (physics and mathematics), full professor, professor at the department of theoretical physics and heat engineering.

Anufrikk@grsu.by

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФИТОРЕМЕДИАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ РЯДА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОЧВ

Л. П. ЛОСЕВА¹⁾, Т. К. КРУПСКАЯ¹⁾, С. Н. АНУЧИН²⁾, С. С. АНУФРИК²⁾

¹⁾Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
ул. Ожешко 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

Использован метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), позволяющий анализировать содержание химических элементов (от серы до урана) в образцах различной природы (почвы, растений), без сложной и длительной пробоподготовки. Составлены модельные системы по тяжелым металлам (ТМ) «почва – свинец», «почва – кадмий», «почва – кадмий – свинец» в пределах 1 ПДК и 2–3 ПДК для выращивания рапса и льна, определены валовые концентрации биоэлементов. Предлагается один из вариантов удаления тяжелых металлов из загрязненных почв, контроля экологической безопасности почвенного покрова и определения фиторемедиационной способности сельскохозяйственных культур. Дана количественная оценка содержания микро- и макроэлементов в дерново-подзолистой почве и в модельных композициях. Проведены стендовые исследования по выращиванию ярового рапса и льна на предложенных смесях. Показано, что определенные концентрации кадмия и свинца оказывают различное влияние на всхожесть семян и динамику роста растений. Следует отметить, что увеличение концентрации тяжелых металлов в почве снижает процент всхожести семян, при этом на чистой дерново-подзолистой почве она самая высокая – 80 %. Проведена оценка степени экологической безопасности почв до и после выращивания технического рапса и льна, что в некоторых случаях позволило снизить суммарный показатель загрязнения почвы в 3,1 раза. При выращивании технических культур металлы интенсивно поглощаются и в значительной степени накапливаются в надземных органах растений, поэтому после уборки фитомассы значительно снижается уровень опасности загрязнения почвы. Таким образом, вынос химических элементов из почвы с техническими культурами способствует ее самоочищению. Полученные результаты исследования дадут возможность расширить спектр оптимальных культур для фиторемедиации почв, загрязненных свинцом и кадмием.

Ключевые слова: рентгенофлуоресцентный анализ; почва; тяжелые металлы; сельскохозяйственные культуры; восстановление загрязненных почв.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект № Б17МС-034 «Комплексная оценка фиторемедиационной способности ряда сельскохозяйственных культур для восстановления загрязненных тяжелыми металлами почв».

Introduction

The intensification of industrial and agricultural production, the development of transport, and the intensification of mining operations inevitably lead to the pollution of natural ecosystems with heavy metals. In this case, one of the main objects of pollution is soil. As a result of pollution, the quality of soils and the value of agricultural land are being reduced. One of the most serious aspects of this problem is that heavy metals and the products of their transformation entering the soil are absorbed by plants and accumulate in them in concentrations that are harmful to human and animal health. Currently, industrialized countries are actively developing economical and soft remediation technologies for the soils contaminated with heavy metals, which are based on the ability of specially selected species of higher plants and the associated microbiota to absorb and accumulate heavy metals in their biomass in quantities significantly exceeding their content in the growth environment. Subsequently, contaminated biomass is removed and utilized. Currently, about 400 species of hyperaccumulators of various metals from 22 families have been identified in the world, the use of which as phytoremediants is of great interest to researchers. At the same time, the study of phytoremediation processes raises a wide range of issues regarding the behavior of heavy metals in a soil-plant system, which enhances the relevance of research on this topic [1–10].

In addition, there remains an urgent issue of the suitability of the chosen territory for the safe functioning of the population, because, for example, in Ukraine, the lands subject to a strong anthropogenic impact with anthropogenic pressure of 1,5–3,0 МРС, which corresponds to weak and medium levels of pollution according to V. B. Ilyin (1995), are allocated for the development of agro-social complexes. Therefore, there is a need for the selection of crops resistant to heavy metal pollution. It should be noted that in conditions of low and medium pollution levels, phytostabilization is of great importance – the cultivation of crops that do not remove toxicants from the soil and, accordingly, do not accumulate them in their biomass. At a high level of pollution, phytoextraction is used – cleaning the soil due to the absorption of heavy metal cations by a root system, followed by their accumulation in the aerial parts of plants. Plants with high values of biological absorption and translocation coefficients

as well as with the basipetal distribution of chemical elements across organs will be the most promising phytoextractors. While the main requirement of phytostabilization is the acropetal distribution of toxicants, which, in the presence of a high geochemical barrier and protective mechanisms of the plant itself, will provide high-quality crop products that comply with sanitary standards with heavy metals in the commodity part within the MPC. However, it is known that the degree of tolerance to heavy metals varies greatly not only among different crops, but even by variety within a given crop.

The excessive content of heavy metals in soils negatively affects the growth and development of agricultural plants, deteriorates the quality of products. The latter occurs mainly not due to changes in chemical composition, but as a result of excessive accumulation of heavy metals. There is a direct, but far from adequate connection between the content of heavy metals in the soil and the culture grown on it – on highly contaminated, but highly protected soil, it is possible to obtain a hygienically acceptable crop. With the excessive intake of heavy metals through roots, there work plant protective mechanisms of nonspecific nature, which restrict the penetration of heavy metals into the aboveground organs and metabolic centers of cells. In relation to various heavy metals, the protective capabilities of the plant are not the same: lead is mainly retained already in roots, cesium penetrates relatively easily into the aboveground organs of plants [11–13].

Up to 25 % of the territory of the Republic of Belarus is contaminated with heavy metals, radionuclides and, as a result, is excluded from agricultural circulation. It is shown that technical colza (*Brassica napus*) as the most promising crop for cultivation in the Republic is not afraid of soils contaminated with radionuclides and heavy metals. According to preliminary data, the land previously withdrawn from agricultural circulation can potentially be used as land for growing raw materials used in the production of biofuels, in particular, based on technical colza. In addition, the Republic will be able to obtain significant economic benefits, since the production capacities of Belarus will be sufficient not only for the «closur» of domestic consumption, but also for the potential export of surplus biofuels to the EU countries [14–15].

Another crop resistant to pollution is ordinary flax or sowing (*Linum usitatissimum*). In the whole country, the area of suitable soils for flax makes up 28,1 % of the total area of arable land. It ranges from 37,9–38,9 % in the Grodno and Mogilev regions to 8,0–8,7 % in the Brest and Gomel regions; in districts – from 40–50 % in the northern districts of the Grodno, Mogilev, Vitebsk and Minsk regions, to almost complete absence in the southern districts of the Brest and Gomel regions. Flax cultivation in Belarus is planned to be given special attention, and in the near future, a program will be developed for the integrated development of the flax growing industry in Belarus and Russia [16].

For a more objective assessment of the influence of heavy metals under conditions of agrocenosis, several additional indicators are introduced:

environmental safety coefficient (ESC);

mobility coefficient of heavy metals in soils;

«The zincous equivalent».

The environmental safety coefficient (ESC) is the ratio of the MPC for the soil to the gross metal content in this soil. The ESC is always higher on the light-sized soils and soils with low buffering ability. The authors of [17] believe that the environmental safety coefficient should be $MPC / C_{HM} > 2.0$ for the sod-podzolic, gray forest soils. If this condition is not satisfied, it can't guarantee the production of clean products. The determination of the mobility coefficient of HM in various types of soils gives a real idea of its migration ability within agricultural lands. It is proposed on the basis of comprehensive monitoring definitions. For example, the maximum permissible concentration of lead for soil is 30,0 mg/kg, and its translocation index is 35,0. For cadmium APC (approximately permissible concentration) – 0,5–2,0 mg / kg. For lead, OEC is 32–130 mg / kg. In both cases, the hazard class is the first [17–23].

Thus, the proposed topic is relevant and fits into international environmental trends.

The aim of the work is to study the possibility of using crops as phytoextractors or phytostabilizers in conditions of soil pollution with heavy metals.

Materials and research methods

Characteristics of the research object, sampling and sample preparation. Soil compositions were created on the basis of the light loamy sod-podzolic soil with the addition of heavy metal salts: cadmium sulfate ($CdSO_4$) and lead nitrate ($Pb(NO_3)_2$) in various ratios of 1–3 MPC. A total of 12 samples were created for further posterior observations. Further three containers were prepared with each of the soil compositions proposed above – 36 in total. Each container had a volume of 1,14 dm³, and the area for sowing was 0,143 m², respectively.

To account for the total heavy metal accumulation in plants in the «soil-plant» system, technical colza and flax were selected. Seeding rates for these crops were reduced to 80 seeds per 1 m², so that no more than 9 seeds were sown in each prepared container, since a denser sowing could lead to stretching and weakening of the aerial part of the plants.

- 1) Soil 100 % (3 samples);
- 2) Soil 90 % + 2–3 MPC of cadmium (3 samples);
- 3) Soil 90 % + 2–3 MPC of lead (3 samples);
- 4) Soil 90 % + 2–3 MPC of cadmium and lead (3 samples).

The samples of soil and plants were taken from each composition for further sample preparation and research by the XRF method according to the methodologies of MP MN 4092-2011, MP MN 3272-2009.

The stages of sample preparation for X-ray fluorescence analysis are presented in fig. 1.

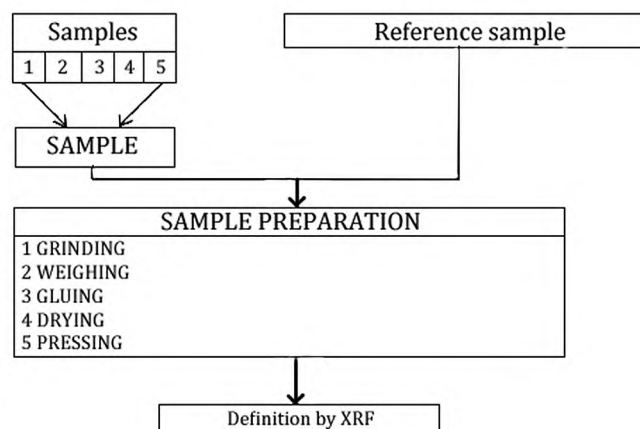


Fig. 1. Stages of sample preparation for XRF

X-ray fluorescence analysis is one of many modern physicochemical methods of measurement and widely used for a qualitative, semi-quantitative and quantitative determination of the elemental composition of substances.

Results and discussion

The gross content of chemical elements, which characterizes the degree of danger of soil pollution and allows controlling it, is an important indicator of soil pollution. When conducting a quantitative analysis of the studied soil compositions as fertilizers, it has been revealed that all samples contain 13 chemical elements that pose the greatest environmental hazard: As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sn, Ti, Zn, Zr (according to Directive 86/278/EEC of June 12, 1986).

Determination of biological absorption coefficients for crops: technical colza, flax at various levels of soil pollution.

The results of calculating the biological absorption coefficients of heavy metals for the phytomass of technical colza and flax grown on the soils with various degrees of contamination with lead and cadmium are presented in tabl. 1–2.

As can be seen from the data presented, severe accumulative metals have not been detected. Lead and zinc are strongly accumulative. Arsenic, copper, lead and strontium are weak accumulative or secondary gripping elements. Other metals belong to a weak capture group.

Translocation coefficient (TC) – is the ratio of the content of an element in the aerial part to the content in roots. The translocation coefficient is calculated by the formula 1:

$$TC = C_a / C_r, \quad (1)$$

where C_a – concentration of an element in the aerial part of a plant;

C_r – concentration of an element in the root of a plant.

The translocation coefficients of heavy metals for technical colza and flax grown in the soils with different degrees of contamination have been calculated under obtained data. The results are presented in tabl. 3–4.

As can be seen from the data presented in tabl. 3–4, cadmium, manganese, tin, and strontium are most intensively accumulated in colza phytomass. Moreover, cadmium most intensively passes into the aboveground organs of the plant with a dominant soil contamination.

In the flax phytomass, cadmium, tin, and zinc accumulate most intensively. The accumulation of cadmium in the leaves intensifies with an increase in its concentration in the soil. Tin to a greater extent passes from the roots to the aerial part of the plant at moderate lead contamination. With increasing the concentrations of lead and cadmium in the soil, the transition of zinc to the phytomass becomes more difficult.

Table 1

Biological absorption coefficients of heavy metals for colza grown on soils with various degrees of contamination

Plants	Biological Absorption Coefficients										
	As	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Pb	Sn	Sr	Zn	Zr
Colza, grown on pure soil	–	0,0301	–	0,3068	0,0288	0,0437	0,3144	0,9633	0,2990	1,6642	0,0223
Colza, grown on soil with 1 MPC of Cd	0,1685	0,012	–	0,1588	0,0264	0,0544	0,1441	0,5699	0,4444	0,9857	0,0482
Colza, grown on soil with 3 MPC of Cd	0,4118	0,0056	–	0,2563	0,0307	0,0608	0,1262	0,8882	0,4085	1,15	0,0442
Colza, grown on soil with 1 MPC of Pb	–	0,0640	–	0,3889	0,0186	0,0414	0,0624	1,0006	0,3380	1,1392	0,0273
Colza, grown on soil with 3 MPC of Pb	0,191	0,0541	–	0,1842	0,0258	0,0612	0,0624	0,8857	0,4357	0,8912	0,0498
Colza, grown on soil with 3 MPC of Cd & Pb	0,3015	0,0085	–	0,2527	0,0144	0,041	0,0912	0,7111	0,03401	1,2091	0,0764

Table 2

Biological absorption coefficients of heavy metals for flax grown on soils with various degrees of contamination

Plants	Biological Absorption Coefficients										
	As	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Pb	Sn	Sr	Zn	Zr
Flax, grown on pure soil	–	0,0452	0,0192	0,3378	0,0139	0,0352	0,1394	0,5691	0,1618	1,4938	0,0105
Flax, grown on soil with 1 MPC of Cd	0,1797	0,026	0,0489	0,3281	0,0365	0,0820	0,1412	0,5342	0,2611	1,4500	0,042
Flax, grown on soil with 3 MPC of Cd	0,4967	0,0074	0,0276	0,1750	0,0319	0,0610	0,0615	0,4929	0,2554	0,916	0,0609
Flax, grown on soil with 1 MPC of Pb	–	0,0327	–	0,5278	0,0066	0,0725	0,0402	0,4343	0,1901	1,9303	0,0199
Flax, grown on soil with 3 MPC of Pb	0,1348	0,0348	0,0772	0,1807	0,0274	0,0633	0,039	0,4780	0,2028	0,601	0,488
Flax, grown on soil with 3 MPC of Cd & Pb	–	0,0058	0,1552	0,1771	0,0116	0,0273	0,0162	0,4053	0,2139	1,0242	0,0333

Table 3

Translocation coefficients of heavy metals for colza grown on soils with various degrees of contamination

Plants	Translocation coefficients										
	As	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Pb	Sn	Sr	Zn	Zr
Colza, grown on pure soil	–	2,545	–	0,071	0,508	1,903	0,330	2,589	1,089	0,895	0,336
Colza, grown on soil with 1 MPC of Cd	0,100	8,182	–	0,057	0,603	2,399	0,229	1,467	1,199	0,728	0,693
Colza, grown on soil with 3 MPC of Cd	0,201	7,962	–	0,093	0,699	2,673	0,192	2,284	1,102	0,846	0,550
Colza, grown on soil with 1 MPC of Pb	–	4,363	–	0,158	0,469	1,568	0,420	3,095	0,892	0,888	0,268
Colza, grown on soil with 3 MPC of Pb	0,122	3,318	–	0,069	0,610	2,399	0,288	2,841	1,143	0,842	0,633
Colza, grown on soil with 3 MPC of Cd & Pb	0,295	3,944	–	0,107	0,375	1,900	0,159	2,818	0,983	0,955	0,667

Table 4

Translocation coefficients of heavy metals for colza grown on soils with various degrees of contamination

Plants	Translocation coefficients										
	As	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Pb	Sn	Sr	Zn	Zr
Flax, grown on pure soil	–	0,910	0,006	0,122	0,071	0,373	0,099	4,830	0,792	2,745	0,073
Flax, grown on soil with 1 MPC of Cd	0,08	3,65	0,246	0,235	0,227	0,475	0,086	9,911	0,605	2,152	0,303
Flax, grown on soil with 3 MPC of Cd	0,170	5,346	0,138	0,125	0,195	0,353	0,035	8,671	0,528	1,360	0,399
Flax, grown on soil with 1 MPC of Pb	–	0,446	–	0,436	0,046	0,368	0,103	9,646	0,433	3,034	0,087
Flax, grown on soil with 3 MPC of Pb	0,060	0,429	0,404	0,135	0,177	0,327	0,520	11,000	0,454	1,149	0,311
Flax, grown on soil with 3 MPC of Cd & Pb	–	1,355	0,877	0,151	0,082	0,169	0,044	11,544	0,529	1,633	0,146

The assessment of the chemical pollution of agricultural field soils (control soil) by gross forms of chemical elements using the total pollution indicator has shown that the initial soil is characterized by a moderately hazardous level of pollution initially (before growing) and after collecting flax and colza ($Z_c = 23,9$, $Z_c = 18,5$ and $Z_c = 20,6$ respectively).

According to the indicative scale of pollution hazard, the soil with 1 MPC of cadmium is assessed as hazardous ($Z_c = 41,7$), and after collecting flax and technical colza, it is already assessed as moderately hazardous ($Z_c = 27,5$, $Z_c = 28,9$ respectively). The following pattern is traced by the accumulation of chemical elements: $Fe > Cd > Sn > Mn > Cu > Co$.

The soil with 3 MPC of cadmium is characterized by a dangerous level of contamination initially and after harvesting flax and technical colza ($Z_c = 98,1$, $Z_c = 77,2$, $Z_c = 89,9$ and $Z_c = 38,7$ respectively). Elements enter the soil to varying degrees as follows: $Cd > Fe > Mn > Cu > Co$.

The soil with 1 MPC of lead is characterized by a moderately hazardous level of contamination initially and after harvesting flax and technical colza ($Z_c = 28,7$, $Z_c = 21,8$ and $Z_c = 25,5$ respectively). Elements enter the soil to varying degrees as follows: $Fe > Sn > Pb > Cd > Mn > Cu > Co$.

According to the averaged total indicators of contamination by the gross forms of the studied elements, the soil with 3 MPC of lead is assessed as dangerous ($Z_c = 37,0$). After collecting flax and technical colza, this soil is already assessed as moderately hazardous ($Z_c = 27,3$ and $Z_c = 28,4$ respectively). Elements enter the soil to varying degrees as follows: $Fe > Sn > Pb > Mn > Cu > Co > Cd$.

The soil with 3 MPC of cadmium and lead is characterized by a dangerous level of contamination initially and after flax collection ($Z_c = 60,7$ and $Z_c = 37,8$ respectively). After collecting technical colza, this soil is moderately hazardous ($Z_c = 19,3$). Elements enter the soil to varying degrees as follows: $Fe > Cd > Sn > Pb$.

The dynamics of changes in the degree of soil hazard after growing technical colza and flax are shown in fig. 2–7.

From the data shown in Figures 2–7, it is seen that the degree of danger of the original soil after growing flax is reduced by 1,3 times, technical colza – by 1,2 times. The total pollution index for the soil with 1 MPC of Cd after growing flax decreases by 1,5 times, colza – by 1,4 times. The risk of the soil with 3 MPCs of Pb after growing flax is reduced by 1,4 times, technical colza – by 1,3 times. The degree of soil hazard from 1 MPC of Pb after growing flax is reduced by 1,3 times, technical colza – by 1,1 times. The total pollution index for the soil with 3 MPCs of Cd after growing flax is reduced by 1,3 times, technical colza – by 1,1 times. The risk of the soil with 3 MPCs for Cd and Pb after growing flax is reduced by 1,6 times, technical colza – by 3,1 times. With simultaneous contamination of the soil with several heavy metals, the phytostabilizing ability of colza is also activated.

It is shown that the removal of chemical elements from the soil with industrial crops (colza and flax) contributes to its self-cleaning.

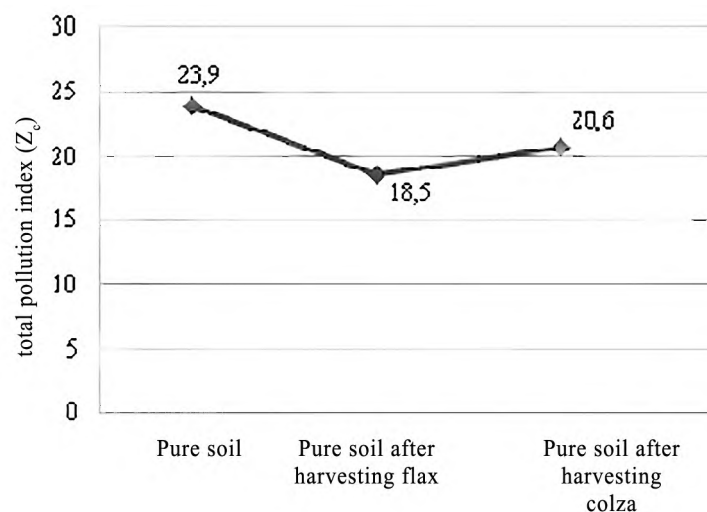


Fig. 2. Change in the degree of danger of the initial soil during the cultivation of flax and technical colza

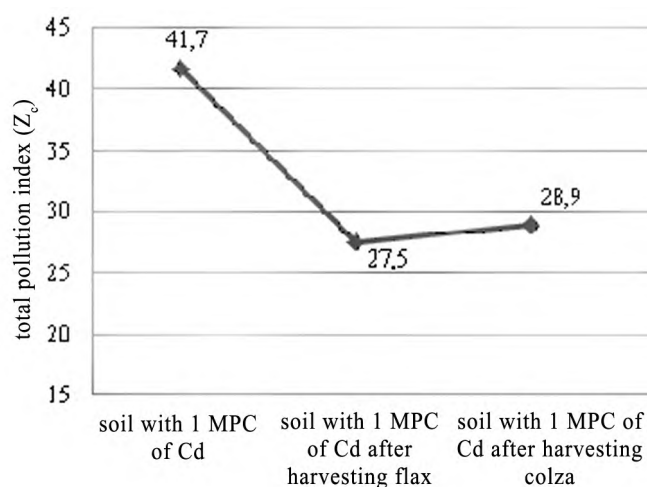


Fig. 3. Change in the degree of soil hazard from 1 MPC of Cd when growing flax and technical colza

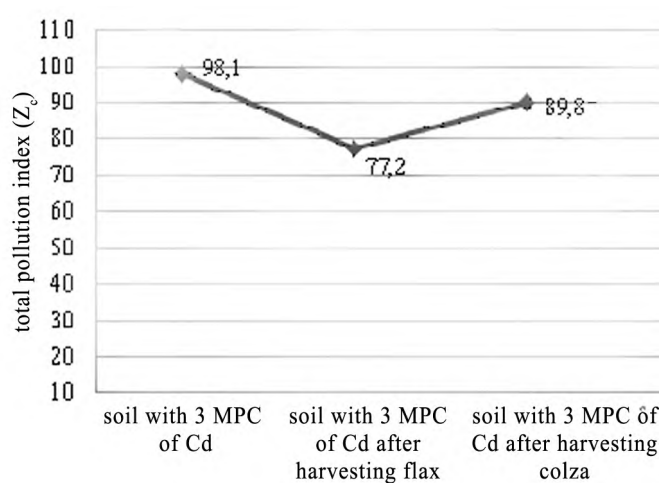


Fig. 4. Change in the degree of soil hazard from 3 MPC of Cd when growing flax and technical colza

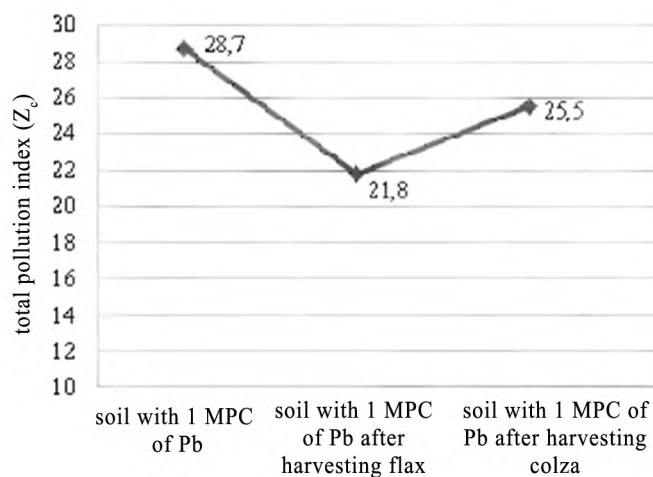


Fig. 5. Change in the degree of soil hazard from 1 MPC of Pb when growing flax and technical colza

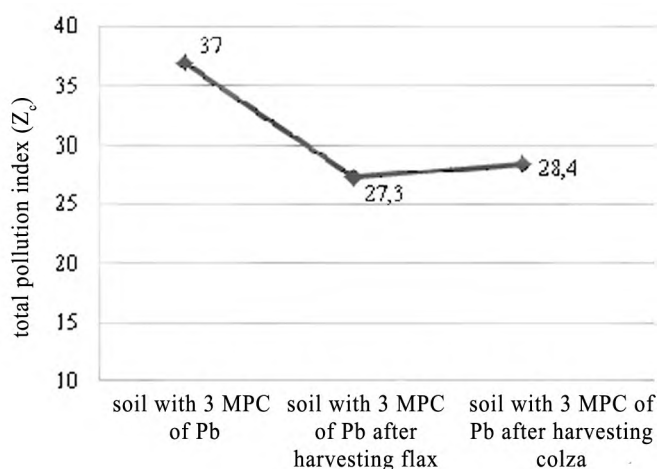


Fig. 6. Change in the degree of soil hazard from 3 MPC of Pb when growing flax and technical colza

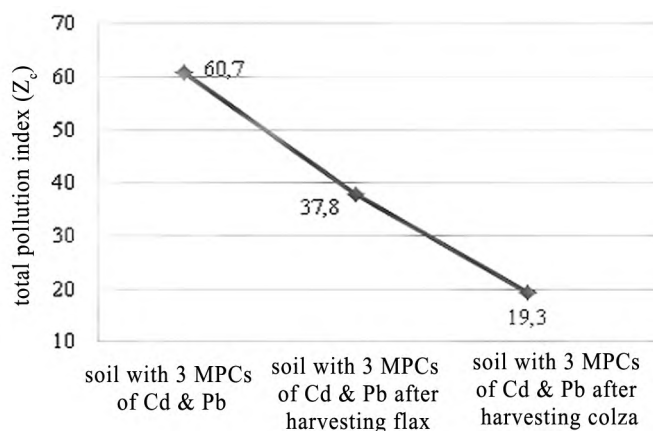


Fig. 7. Change in the degree of soil hazard from 3 MPCs of Cd & Pb when growing flax and technical colza

In the areas of industrial emissions and possible soil pollution by heavy metals, it is necessary to select industrial crops as phytoremediants with barrier-free functions with respect to the influx of heavy metals into them, which will allow for the ecologically safe restoration of the soils previously removed from crop rotation.

Thus, the possibility of using technical colza as a promising phytoremediant for the Belarusian soils contaminated with other chemical elements, except lead and cadmium, needs to be studied further.

Conclusion

1. The possibility of using the method of X-ray fluorescence analysis to assess the content and migration of heavy metals of various degrees of danger in a soil-plant system has been shown.
2. It has been established that cadmium, manganese, tin and strontium accumulate most intensively in the phytomass of industrial colza; cadmium, tin, zinc accumulate in the flax phytomass.
3. Based on the data obtained, it can be assumed that the degree of danger of the soil, depending on the nature of its pollution with heavy metals, is reduced by 1,3–1,6 times after growing flax, by 1,2–3,1 times after growing colza. Moreover, the phytostabilizing properties of technical colza are manifested to a greater extent with the initially high values of the total soil pollution index.
4. It has been shown that when growing industrial crops, metals are intensively absorbed and accumulate in the aboveground and underground organs of plants, which significantly reduces the level of risk of soil pollution. The removal of chemical elements from the soil with industrial crops (colza, flax) contributes to its self-cleaning.

Библиографические ссылки / References

1. Buravtsev VN, Krylova NP. Modern technological schemes of phytoremediation of the contaminated soils. *Plant Biology Series. Agricultural biology*. 2005;5:67–75.
2. Mineev VG, Alekseev AA, Grishina TA. Heavy metals and the environment under the conditions of current chemization. *Communication 2 Lead, Agricultural Chemistry*. 1982;9:126–140.
3. Mineev VG, Valitova AR, Bolsheva TL, Kizhalkin GSh. Phytoremediation effect of various cultures. *Fertility*. 2006;1:34–36.
4. Chernykh NA. Change in the content of a number of chemical elements in plants under the influence of various amounts of heavy metals in the soil. *Agrochemistry*. 1991;3:68–76.
5. Chernykh NA. Patterns of behavior of heavy metals in a soil-plant system under different anthropogenic load. Moscow: Publishing House of the D. N. Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Fertilizers and Agricultural Soil Science; 1995.
6. Chernykh NA, Milashchenko NZ, Ladonin VF. Ecotoxicological aspects of soil pollution with heavy metals. Moscow: Agroconsult Publishing House; 1999.
7. Chernykh NA, Ovcharenko MM, Popovicheva LL, Chernykh IN. Techniques for reducing the phytotoxicity of heavy metals. *Agrochemistry*. 1995;9:101–107.
8. Chernykh NA, Chernykh IN. On the quality of crop products at different levels of soil pollution with heavy metals. *Agrochemistry*. 1995;5:97–101.
9. Pokrovskaya SF. Soil pollution by heavy metals and its effect on agricultural production. Moscow: Publishing House of the All-Union Research Institute of Information and Technical and Economic Research of the Agro-Industrial Complex; 1986.
10. Brooks RR. Plant that hyperaccumulate heavy metals (their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining). Wallingford: CAB International; 1998.
11. Andreeva IV, Baybekov RF, Ganzhara NF, Zlobin MV. Determination of the phytoremediation potential of wild-growing and cultivated plants. In: *Proceedings of the International Academy of Agricultural Education*. 2009;8:8–12.
12. Andreeva IV, Zlobina MV. (2009). Study of the phytoremediation potential of ornamental and agricultural crops. In: *Contribution of young scientists to the development of innovations in agricultural science. Collection of articles of the international scientific conference of young scientists and specialists*. Moscow; [publisher unknown]; 2009. p. 125–132.
13. Andreeva IV, Zlobina MV, Baybekov RF, Ganzhara NF. Phytoremediation ability of wild and cultivated plants. *Bulletin of the Timiryazev Agricultural Academy*. 2010;1:8–17.
14. Cosio C. Phytoextraction of heavy metal by hyperaccumulating and non hyperaccumulating plants: comparison of cadmium uptake and storage mechanisms in the plants. Champagne: EPFL; 2004.
15. Andreeva IV, Baybekov RF, Zlobina MV. Phytoremediation of the soils contaminated with heavy metals. *Environmental Engineering*. 2009;5:5–11.
16. Andreeva IV, Baybekov RF, Zlobin MV. Study of the parameters of the accumulation of heavy metals by cultivated and ornamental plants during complex soil pollution for phytoremediation. In: *Collection of articles Reports of the Timiryazev Agricultural Academy*. Moscow; [publisher unknown]; 2010. Part 1. p. 661–663.
17. Koshkin EI, Andreeva IV, Vagun IV. Production process and phytoremediation potential of colza plants at various levels of the pollution of the sod-podzolic soil with heavy metals. *Agrochemistry*. 2010;12:52–57.
18. Zlobin MV, Andreeva IV, Voloskova DE. Search for phytoremediation plants by setting vegetative experiments. In: *Collection of articles Reports of the Timiryazev Agricultural Academy*. Moscow; [publisher unknown]; 2010. Part 1. p. 669–671.
19. Baybekov RF, Ganzhara NF, Zlobina MV. Phytoremediation ability of cultivated and ornamental plants in the complex pollution of soils with heavy metals. *Fertility*. 2010;5:42–43.
20. Ufimtseva MD, Terekhina NV. Phytoindication of the ecological state of the urban geosystems of St. Petersburg. Saint Petersburg: Publishing House Science; 2005. Russian.
21. Fitz WJ, Wenzel WW. Arsenic transformation in the soil- rhizosphere-plant system, fundamentals and potential application of phytoremediation. *Journal of Biotechnology*. 2002; 99:259–278.
22. Shaganov IA. Colza field in Belarus: a practical guide for the development of intensive technology for the cultivation of winter colza on oilseeds. Minsk: Equinox Publishing House; 2008.
23. Ivashkevich OA, Kabo GYa, Blokhin AV, Simirsky VV, Lugovik YuN. Prospects for the use of agricultural crops for fuel production in the Republic of Belarus. *Bulletin of BSU. Series. Chemistry, Biology. Geography*. 2009;1:4–12.

Статья поступила в редакцию 09.01.2020.
Received by editorial board 09.01.2020.

УДК 591.531.11:595.782(476)

ТРОФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ КАШТАНОВОЙ МИНИРУЮЩЕЙ МОЛИ (CAMERARIA OHRIDELLA DESCHKA & DIMIČ) В УСЛОВИЯХ БЕЛАРУСИ

А. С. РОГИНСКИЙ¹⁾

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

В течение полевых сезонов 2013–2019 гг. в регионах Беларуси проводились обследования декоративных зеленых насаждений с целью выяснения трофических связей каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986; Lepidoptera: Gracillariidae) – чужеродного для фауны, инвазивного вида минирующих фитофагов растений семейства Sapindaceae. Установлено, что к числу сильно повреждаемых представителей семейства принадлежит конский каштан обыкновенный (*Aesculus hippocastanum* L.) и конский каштан Баумана (*Aesculus hippocastanum* L. cv. *Baumanii*), малоповреждаемых – конский каштан красный (*Aesculus pavia* L.). Относительная площадь поврежденной листовой поверхности совместно произрастающих в зеленых насаждениях г. Бреста экземпляров *A. hippocastanum* и *A. pavia* составляла в конце вегетационного сезона 2019 г. от 17,16 до 72,79 и от 0,66 до 2,42 % соответственно.

Ключевые слова: Gracillariidae; Lepidoptera; инвазивные виды; интродукция растений; декоративные насаждения; Черная книга; конский каштан; Sapindaceae.

THE TROPHIC RELATIONS OF THE HORSE CHESTNUT LEAF-MINER (CAMERARIA OHRIDELLA DESCHKA & DIMIČ) IN THE CONDITIONS OF BELARUS

A. S. ROGINSKY^a

^aBelarusian State University,
4 Niezależności Avenue, Minsk 220030, Belarus

During the field seasons of 2013–2019 in the regions of Belarus the studies of ornamental green spaces were carried out in order to clarify the trophic relationships of the horse chestnut leaf-miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986; Lepidoptera: Gracillariidae), an invasive and alien for the fauna phytophagous species of insects, mining plants of the Sapindaceae family. It was found that horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) and Bauman horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L. cv. *Baumanii*) are among the most damaging members of the family, while Red buckeye (*Aesculus pavia* L.) is slightly damaging. The relative area of the damaged leaf surface of the specimens of *A. hippocastanum* and *A. pavia* co-growing in the green spaces of Brest at the end of the growing season of 2019 ranged from 17,16 to 72,79 and from 0,66 to 2,42 %, respectively.

Key word: Gracillariidae; Lepidoptera; invasive species; plant introduction; decorative plantings; the Black book; horse chestnut; Sapindaceae.

Образец цитирования:

Рогинский АС. Трофические связи каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič) в условиях Беларуси. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2020;1:32–37.

For citation:

Roginsky AS. The trophic relations of the horse chestnut leaf-miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič) in the conditions of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;1:32–37. Russian.

Автор:

Алексей Сергеевич Рогинский – аспирант кафедры зоологии биологического факультета.

Author:

Alexey S. Roginsky, postgraduate student at the department of zoology, faculty of biology.

Введение

Каштановая минирующая моль, или охридский минер (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) – чужеродный для фауны Беларуси инвазивный вид минирующих чешуекрылых семейства молей-пестрянок (Lepidoptera: Gracillariidae), внесенный в издание «Черная книга инвазивных животных Беларуси» [1]. Он включен также в список 100 наиболее опасных инвазивных видов Европы [2], что однозначно характеризует значимость экологических и экономических последствий экспансии данного инвайдера.

Личинки каштановой минирующей моли развиваются внутри камер (мин) в толще листовых пластинок. На I–III возрастах они являются так называемыми сокоедками; на IV–V переходят к интенсивному потреблению листовой паренхимы, что сопровождается стремительным ростом площади мин; личинки VI возраста не питаются и прядут колыбельки, в которых происходит окукливание [3]. Окраска листовых мин изменяется от светло-зеленой – в начале, до бурой – к концу развития личинок, что обусловлено постепенной некротизацией поврежденных участков листовых пластинок [4]. При высокой плотности фитофага мины могут сливаться, охватывая большую часть листовой поверхности. Обусловленная каштановой минирующей молью ранняя дефолиация крон наблюдается в условиях Беларуси уже с конца июля [5; 6].

C. ohridella считается специализированным фитофагом представителей рода *Aesculus* L. [7]. Вид был описан в 1986 г. [8] по сборам с конского каштана обыкновенного (*Aesculus hippocastanum* L.) из окрестностей Охридского озера в бывшей югославской республике Македония (ныне Северная Македония). Предполагается, что естественно исторически сформировавшийся ареал *A. Hippocastanum* был ограничен горными долинами Балканского полуострова [9]. Целенаправленный просмотр гербарных образцов листовых пластинок, собранных в XIX в., показал наличие в коллекционных материалах поврежденных личинками *C. ohridella* листьев *A. hippocastanum*, коллектированных на территории современных Греции и Болгарии. Следует отметить, что видовая принадлежность сохранившихся остатков насекомых была подтверждена молекулярно-генетическими методами [10]. Таким образом, имеющиеся данные указывают на балканское происхождение каштановой минирующей моли, где этот фитофаг исконно повреждал конский каштан обыкновенный.

Ко времени первоописания каштановой минирующей моли *A. hippocastanum* (конский каштан) сформировал обширный культигенный ареал в континентальной Европе, широко присутствуя в разного типа зеленых насаждениях [9]. Это послужило предпосылкой для стремительной экспансии охридского минера по вторичному ареалу конского каштана обыкновенного. Границу Беларуси этот инвайдер достиг, предположительно, в 2001–2002 гг. [6], а завершил расселение по территории страны к 2014 г. [11]. На большей части своего вторичного инвазионного ареала охридский минер характеризуется популяционной плотностью, обуславливающей статус не только фонового, но и массового вида, что сопряжено с высоким уровнем поврежденности кормовых растений [5; 6].

Широкое распространение *C. ohridella* создало предпосылки повреждения этим фитофагом растений, которые отсутствовали в первичном ареале. В частности, помимо конского каштана обыкновенного (*A. hippocastanum*), в литературе приводятся примеры повреждения личинками *C. ohridella* [12] других представителей рода *Aesculus*, а также регистрации мин на листовых пластинках кленов остролистного (*Acer platanoides* L., 1753), ложноплатанового (*Acer pseudoplatanus* L., 1753) и девичьего винограда пятилисточкового (*Parthenocissus quinquefolia* Planch.) [7; 13]. Род *Acer* L., наряду с *Aesculus* L., в настоящее время относят к ботаническому семейству Sapindaceae [14], что не позволяет считать подобные регистрации случайными и вызывает необходимость выяснения повреждаемости разных видов и форм кленов в условиях тех или иных регионов Европы.

В настоящее время в составе рода *Aesculus* насчитывается 13 рецентных видов, распределенных по нескольким секциям [15]. К секции *Aesculus* L. относятся *A. hippocastanum* и *A. turbinata* Blume; секции *Calothyrsus* (Spach) K. Koch – *A. assamica* Griffith, *A. californica* (Spach) Nuttall, *A. chinensis* Bunge, *A. wilsonii* (Rehder) Turland & N. H. Xia, *A. indica* (Camb.) Hook.; секции *Pavia* (Mill.) Persoon – *A. glabra* Willd., *A. flava* Sol., *A. pavia* L., *A. sylvatica* Bartram; секции *Macrothyrsus* (Spach) K. Koch – *A. parviflora* Walter; секции *Parryanae* Wiggins – *A. parryi* A. Gray. При этом *A. turbinata* при произрастании в пределах вторичного ареала *C. ohridella* повреждается личинками этого фитофага в меньшей степени, нежели *A. hippocastanum* [12]. По данным литературы, среди других представителей рода *Aesculus*, входящих в круг повреждаемых растений, и американский конский каштан красный (*A. pavia*) из секции *Pavia* [12].

В Беларуси в зеленых насаждениях широко представлены конский каштан обыкновенный и клен остролистный. Конский каштан красный стали вводить в насаждения недавно, поэтому растение встречается довольно редко. Наибольшим видовым и формовым разнообразием кленов характеризуется дендрарий Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (г. Минск) [16; 17]. В задачи

выполненных исследований входило выявление круга растений, повреждаемых каштановой минирующей молью в условиях зеленых насаждений Беларуси, а также сопоставление уровней их поврежденности со степенью поврежденности конского каштана обыкновенного.

Материалы и методы исследования

Для установления трофических связей каштановой минирующей моли на территории Беларуси в 2013–2019 гг. нами выполнялись целенаправленные обследования зеленых насаждений населенных пунктов в пределах всех административных областей, ландшафтно-географических провинций, лесорастительных зон и районов интродукции древесных растений. Особое внимание уделялось насаждениям Центрального ботанического сада НАН Беларуси, где представлено абсолютное большинство интродуцированных в Беларусь видов и форм родов *Aesculus* и *Acer*, а также девичий виноград пятилисточковый (*P. quinquefolia*) [16; 17].

Оценку степени заселенности и поврежденности древесных растений каштановой минирующей молью, их устойчивости к повреждению данным вредителем проводили по предложенным А. И. Блинцовым методике и балльным шкалам [18]. Следует отметить, что подобный подход был описан в работе F. Vienne и задействован в Европе более 15 лет тому назад [12].

Регистрационные данные, полученные в ходе обследований, аккумулировались в соответствующей базе данных, созданной и поддерживаемой средствами LibreOffice Base.

Отбор проб листовых пластинок конского каштана обыкновенного проводился с целью установления относительной площади поврежденной личинками каштановой минирующей моли листовой поверхности конских каштанов обыкновенного и красного в г. Бресте при их совместном произрастании (ул. Гоголя, 13–32 и бульвар Космонавтов). Для предотвращения увеличения размеров мин и относительной площади повреждений листовые пластинки помещали в морозильник. После гибели личинок осуществляли гербаризацию листьев по стандартной методике [19].

Изображения поврежденных простых листочков сложных листьев каштанов, полученные с использованием сканера Epson Perfection 4180 Photo, обрабатывали с помощью свободно распространяемого графического редактора ImageJ, определяя при этом общую и поврежденную площадь листовой поверхности [20].

Результаты исследования и их обсуждение

Многолетние исследования свидетельствуют, что в условиях Беларуси каштановой минирующей молью повреждаются конский каштан обыкновенный (*A. hippocastanum*) (широко представлен в зеленых насаждениях), *A. hippocastanum* L. cv. *Baumanii* (представлен в Ботаническом саду) и конский каштан красный (*A. pavia*) (редок, присутствует в зеленых насаждениях Бреста и Минска). При этом данным инвазивным фитофагом не повреждаются широко распространенный в зеленых насаждениях клен остролистный (*A. platanoides*) и относительно распространенный в декоративных зеленых насаждениях юга и запада Беларуси клен-явор (*A. pseudoplatanus*), а также обычный девичий виноград пятилисточковый (*P. quinquefolia*). Фактические данные о заселенности и поврежденности отдельных видов и форм древесных растений семейства Sapindaceae представлены в табл.

Таким образом, устойчивость к повреждению каштановой минирующей молью проявляют относительно широко представленные в зеленых насаждениях Беларуси или отдельных регионах страны виды рода *Acer*. Необходимым представляется дополнительный мониторинг поврежденности культивируемых представителей семейства Sapindaceae в условиях региона.

Анализ результатов учетов относительной поврежденности листовой поверхности конского каштана обыкновенного в условиях зеленых насаждений г. Бреста позволил констатировать варьирование значений данного показателя от 17,16 до 72,79 %, что соответствует потере декоративности растениями от незначительной до существенной (рис).

Размах варьирования рассматриваемого показателя для произрастающих в непосредственной близости экземпляров конского каштана красного оказался на порядок ниже – от 0,66 до 2,42 %, что соответствует незначительной потере растениями декоративности (рис.).

Таблица

Уровни заселенности и поврежденности древесных растений семейства Sapindaceae
каштановой минирующей молью в условиях декоративных зеленых насаждений Беларуси

Table

The rates of occupancy and damage caused to woody plants of the Sapindaceae family
by horse chestnut leaf-miner in the conditions of decorative greenery in Belarus

Древесное растение	Заселенность	Поврежденность
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	++++	++++
<i>Aesculus hippocastanum</i> L. cv. <i>Baumanii</i>	+++	+++
<i>Aesculus pavia</i> L.	++	+
<i>Acer campestre</i> L.	—	—
<i>Acer ginnala</i> Maxim.	—	—
<i>Acer negundo</i> L.	—	—
<i>Acer platanoides</i> L.	—	—
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	—	—
<i>Acer rubrum</i> L.	—	—
<i>Acer saccharinum</i> L.	—	—
<i>Acer tataricum</i> L.	—	—
<i>Acer tegmentosum</i> Maxim.	—	—

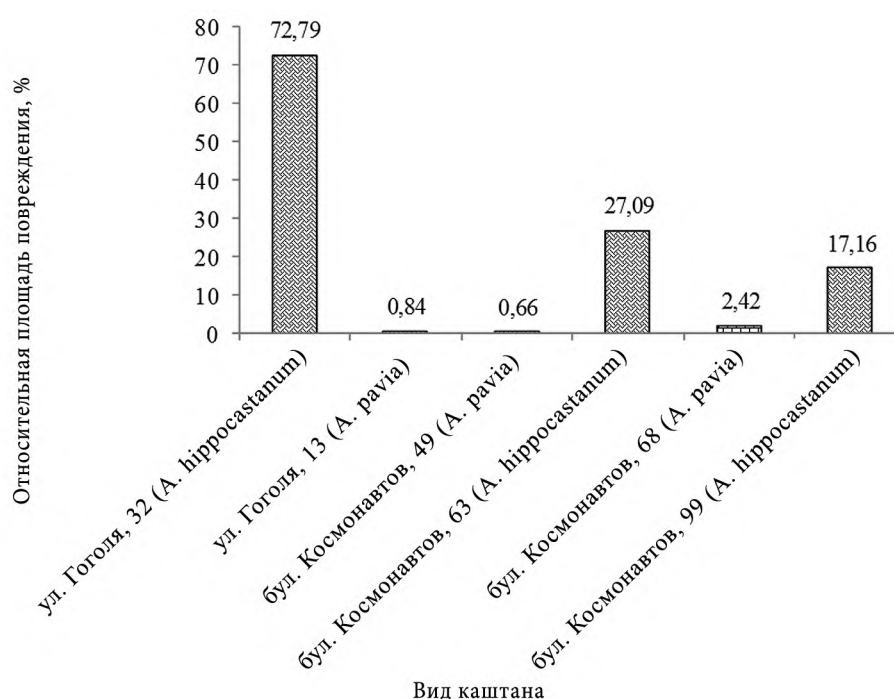


Рис. Относительная площадь поврежденной личинками каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimić, 1986) листовой поверхности экземпляров конских каштанов обыкновенных (*Aesculus hippocastanum* L.) и красного (*Aesculus pavia* L.) в зеленых насаждениях г. Бреста (2019 г.)

Fig. The relative area of leaf surface of horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) and Red buckeye (*Aesculus pavia* L.) damaged by the horse chestnut leaf-miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimić, 1986) in green spaces of Brest (2019).

Заключение

По результатам выполненных исследований сделаны следующие выводы:

1. Выявлен круг декоративных растений, повреждаемых в настоящее время каштановой минирующей молью (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimić, 1986) в условиях Беларуси. К числу сильно повреждаемых принадлежит конский каштан обыкновенный (*Aesculus hippocastanum* L.) и конский каштан Баумана

(*Aesculus hippocastanum* L. cv. *Baumanii*), малоповреждаемых – конский каштан красный (*Aesculus pavia* L.). Не повреждаются *C. ohridella* в различного типа декоративных насаждениях представители рода *Acer* L.: *Acer campestre* L., *A. ginnala* Maxim., *A. negundo* L., *A. platanoides* L., *A. pseudoplatanus* L., *A. rubrum* L., *A. saccharinum* L., *A. tataricum* L., *A. tegmentosum* Maxim.

2. Уровень поврежденности, отражаемый показателем относительной площади поврежденной листовой поверхности конского каштана обыкновенного и конского каштана красного при их совместном произрастании в зеленых насаждениях г. Бреста, составляет от 17,16 до 72,79 и от 0,66 до 2,42 %, соответственно. Однако это не может служить рекомендацией для широкого внедрения конского каштана красного в зеленые насаждения, поскольку он принадлежит к числу повреждаемых каштановой минирующей молью древесных растений.

Библиографические ссылки

1. Семенченко ВП, редактор. *Черная книга инвазивных видов животных Беларуси*. Минск: Беларуская навука; 2016. 105 с.
2. Hulme & Daise PE, editors. *Handbook of alien species in Europe*. Dordrecht: Springer; 2009. 399 p.
3. Рогинский АС. Mineuse du marronnier (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimic, 1986) organisme nuisible aux coulées vertes au Bélarus. В: «*Иностранные языки и современный мир*». Международная научная конференция г. Брест, 15 апреля 2016 г. Брест: БрГУ; 2016. Выпуск 2. с. 115–117.
4. Рогинский АС, Буга СВ. Динамика развития мин личинок каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) на листовых пластинках каштана конского обыкновенного (*Aesculus hippocastanum* L.) в условиях Беларуси. *Труды БГУ*. 2016;11(1):314–319.
5. Рогинский АС, Буга СВ. Поврежденность каштана конского обыкновенного каштановой минирующей молью (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) в условиях зеленых насаждений г. Минска в осенний период. *Защита растений*. 2014;38:216–225.
6. Рогинский АС, Синчук ОВ, Сауткин ФВ, Буга СВ. Распространение и вредоносность каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič) в зеленых насаждениях Беларуси. *Труды БГУ*. 2014;9(2):95–103.
7. Зерова МД, Никитенко ГН, Норольский НБ, Горпензон ЗС, Свиридов СВ, Лукаш ОВ, Бабидорич ММ. *Каштановая минирующая моль на Украине*. Киев: Велес; 2007. 87 с.
8. Deschka G, Dimič N. *Cameraria ohridella* n. sp. aus Mazedonien, Jugoslawien (Lepidoptera, Lithocolletidae). *Acta Entomologica Jugoslavica*. 1986;22(1):11–23.
9. Григорюк ІІ, Машковська СІ, Яворовський ІІІ, Колесніченко ОВ. *Біологія каштанів*. Київ: Логос; 2004. 380 с.
10. Lees DC, Lack HW, Rougerie R, Hernandez-Lopez A, Raus T, Avtzi ND, Augustin S, Lopez-Vaamonde C. Tracking origins of invasive herbivores through herbaria and archival DNA: the case of the horse-chestnut leaf miner. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2011;9:322–328.
11. Рогинский АС, Синчук ОВ, Сауткин ФВ, Буга СВ. Каштановая минирующая моль (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) в Беларуси: экспансия завершена. В: Янчуевич ОВ, редактор. *Зоологические чтения – 2015. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной памяти профессора Бенедикта Дыбовского, Гродно, 22–24 апреля 2015 г.*, ГрГУ им. Я. Купалы. Гродно: ГрГУ; 2015. с. 215–217.
12. Vienne F. Gegen die Minierrmotte *Cameraria ohridella* resistente Aesculus-Arten in Europa – eine Literaturübersicht. *Schweizer Zeitschrift für Forstwesen*. 2005;156(2):65–69.
13. Pèrè Ch. *Ecological impact of the invasive horsechestnut leaf miner, Cameraria ohridella* Deschka & Dimič (Lepidoptera: Gracillariidae) on native species [dissertation]. Neuchâtel, Switzerland: [publisher unknown]. 2009. 97 p.
14. Buerki S, Forest F, Acevedo-Rodriguez P, Callmender MW, Nylander JAA, Harrington M, Sanmartín I, Kämpfer P & Alvarez N. Plastid and nuclear DNA markers reveal intricate relationships at subfamilial and tribal levels in the soapberry family (Sapindaceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 2009;51:238–258.
15. Lian XY. An overview of genus *Aesculus* L.: ethnobotany, phytochemistry and pharmacological activities. *Pharmaceutical Crops*. 2010;1:24–51.
16. Ботанические коллекции Беларуси. Гербарий ЦБС НАН Беларуси [Интернет]. 2016. [Процитировано 20 февраля 2020]. Доступно по: <http://hbc.bas-net.by/>.
17. Решетников ВН. *Каталог сосудистых растений центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (открытый грунт)*. Титок. ВВ, редактор. Минск: Тэхналогія; 2010. 264 с.
18. Блинцов АИ. Способ определения устойчивости древесных растений к вредителям. *Информационный листок БелНИИЛТИ*. 1986;58:4.
19. Бридсон Д, Фоман Л. *Гербарное дело. Справочное руководство*. Кью: Королевский ботанический сад; 1995. 342 с.
20. Синчук ОВ, Рогинский АС, Даниленок ВВ. *Количественная оценка поврежденности инвазивными минирующими насекомыми листовых пластинок декоративных древесных растений*. Минск: Belarusian State University; 2016. 30 с.

References

1. Semenchenko VP, editor. *Chernaya kniga invazivnyh vidov zhyvotnyh Belarusi* [The Black Book of Invasive Animals of Belarus]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2016. 105 p. Russian.
2. Hulme & Daise PE, editors. *Handbook of alien species in Europe*. Dordrecht: Springer; 2009. 399 p.
3. Roginsky AS. Mineuse du marronnier (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimic, 1986) organisme nuisible aux coulées vertes au Bélarus. In: «*Inostrannyye yazyki i sovremennyy mir*». *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya Brest, 15 aprelya 2016 g.* Brest: Brestskiy gosudarstvennyi universitet; 2016. Issue 2. p. 115–117. Russian.
4. Roginsky AS, Buga SV. *Dinamika razvitiya min lichinok kashtanovoj miniruyushchej moli (Cameraria ohridella Deschka & Dimič, 1986) na listovyh plastinkah kashтана konskogo obyknovennogo (Aesculus hippocastanum L.) v usloviyah Belarusi* [Dynamics of larvae

development of horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) on leaf plates of horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) under the conditions of Belarus]. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016;11(1):314–319. Russian.

5. Roginsky AS, Buga SV. Povrezhdennost' kashtana konskogo obyknovennogo kashtanovoj miniruyushchej mol'yu (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) v usloviyah zelenyh nasazhdenij g. Minska v osennij period [Damage of *Aesculus hippocastanum* by horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) under the conditions of green plantations of Minsk in the autumn period]. *Zashchita rastenij*. 2014;38:216–225.

6. Roginsky AS, Sinchuk OV, Sautkin FV, Buga SV. Rasprostranenie i vredonosnost' kashtanovoj miniruyushchej moli (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič) v zelenyh nasazhdeniyah Belarusi [Distribution and harmfulness of horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič) in green stands of Belarus]. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014;9(2):95–103. Russian.

7. Zerova MD, Nikitenko GN, Norol'skij NB, Gorshenzon ZS, Sviridov SV, Lukash OV, Babidorich MM. Kashtanovaya miniruyushchaya mol' na Ukraine [The horse-chestnut leaf miner in Ukraine]. Kiev: Veles; 2007. 87 p. Ukrainian.

8. Deschka G, Dimič N. *Cameraria ohridella* n. sp. aus Mazedonien, Jugoslawien (Lepidoptera, Lithocolletidae). *Acta Entomologica Jugoslavica* 1986;22(1):11–23.

9. Grigoryuk IP., Mashkovs'ka SP. YAVOROVSKIJ PP. Kolesnichenko OV. *Biologiya kashtaniv* [Biology of chestnuts]. Kіiv: Logos; 2004.380 p. Ukrainian.

10. Lees DC, Lack HW, Rougerie R, Hernandez-Lopez A, Raus T, Avtızis ND, Augustin S, Lopez-Vaamonde C. Tracking origins of invasive herbivores through herbaria and archival DNA: the case of the horse-chestnut leaf miner. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2011;9:322–328.

11. Roginskij AS, Sinchuk OV, Sautkin FV, Buga SV. Kashtanovaya miniruyushchaya mol' (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) v Belarusi : ekspansiya zavershena [Horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) in Belarus: expansion completed]. In: Yanchurevich OV, editor. Zoologicheskie chteniya – 2015. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj pamyati professora Benedikta Dybovskogo, Grodno, 22–24 aprelya 2015 g., Grodntnskiy gosudarstvenny universitet imeni Yanki Kupaly. Grodno: Grodntnskiy gosudarstvenny universitet; 2015. p. 215–217. Russian

12. Vienne F. Gegen die Miniermotte *Cameraria ohridella* resistente Aesculus-Arten in Europa – eine Literaturübersicht. *Schweizer Zeitschrift für Forstwesen*. 2005;156(2):65–69.

13. Péré Ch. Ecological impact of the invasive horsechestnut leaf miner, *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič (Lepidoptera: Gracillariidae) on native species [dissertation], Neuchâtel, Switzerland: [publisher unknown]. 2009. 97 p.

14. Buerki S, Forest F, Acevedo-Rodriguez P, Callmander MW, Nylander JAA, Harrington M, Sanmartín I, Kűpfer P & Alvarez N. Plastid and nuclear DNA markers reveal intricate relationships at subfamilial and tribal levels in the soapberry family (Sapindaceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 2009;51:238–258.

15. Lian XY. An overview of genus *Aesculus* L.: ethnobotany, phytochemistry and pharmacological activities. *Pharmaceutica Crops*. 2010;1:24–51.

16. Botanicheskie kolektsii Belarusi. Gerbarii TsBS NAN Belarusi [The botanical collections of Belarus. The herbarium of the Central botanical garden of the National Academy of Sciences of Belarus] [Internet; cited 2020 February 20] – 2016. Available from: <http://hbc.bas-net.by>.

17. Reshetnikov VN. Katalog sosudistyykh rastenii Tsentral'nogo botanicheskogo sada Natsional'noi akademii nauk Belarusi (otkrytyi grunt) [Catalog of vascular plants of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (open field)]. Titok VV, editor. Minsk: Tekhnalogiya; 2010. 264 p. Russian.

18. Blintsov AI. Sposob opredeleniya ustoichivosti drevesnykh rastenii k vre-ditelyam [The method of determining the resistance of woody plants to pests]. *Informatsionnyi listok BelNIINTI*. 1986;58:4. Russian.

19. Gel'tman DV, editor. Gerbarnoe delo: spravochnoe rukovodstvo: russkoe izdanie [Herbarium: reference guide: Russian edition]. K'yu: Korolevskiy botanicheskiy sad; 1995. 341 p. Russian.

20. Sinchuk OV, Roginskij AS, Danilyonok VV. Kolichestvennaya ocenka povrezhdennosti invazivnymi miniruyushchimi nasekomymi listovykh plastinok dekorativnykh drevesnykh rastenij [Quantitative assessment of damage ornamental wood plants leaf sheets by invasive miner insects]. Minsk: BGU; 2016.30 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 25.02.2020.
Received by editorial board 25.02.2020.

УДК 574.587+578.087(282.247.431.2)+595.7(476)

МЕТОДЫ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ В СИНЭКОЛОГИИ НАСЕКОМЫХ

Г. Г. СУШКО¹⁾

¹⁾Витебский государственный университет имени П. М. Машерова,
пр. Московский, 33, 210015, г. Витебск, Беларусь

Анализ публикаций по экологии насекомых за последние пять лет, доступных в международной базе данных PubMed Central, свидетельствует, что 65,6 % из них содержат методы ординации. Это подчеркивает актуальность их использования в современных исследованиях. Данные методы позволяют выделить группы с общими свойствами, выявить градиенты и тренды в многомерных данных, продемонстрировать зависимости между переменными и определить, какие из них являются наиболее влиятельными. В представленной статье дан краткий обзор методов ординации, чаще всего используемых в экологических исследованиях насекомых, а также определены ограничения к их применению.

Ключевые слова: многомерный анализ; ординация; энтомология; экология сообществ.

METHODS OF MULTIVARIATE DATA ANALYSIS IN INSECTS SYNECOLOGY

G. G. SUSHKO^a

^aVitebsk State University named after P. M. Masherova,
33 Maskoŭski Avenue, Vičebsk 210015, Belarus

Analysis of publications on insect ecology over the past five years, available in the international database PubMed Central, showed that 65,6 % of them contain ordination methods. This emphasizes their relevance at the present stage. These methods allow to select groups with common properties, identify gradients and trends in multivariate data, demonstrate the relationships among variables and determine which of them are the most influential. This article provides a brief overview of the methods of ordination, most often used in environmental studies of insects and identifies restrictions on their use.

Key words: Multivariate analysis; ordination; entomology; community ecology.

Введение

Методы многомерного (мультивариантного) анализа, в частности ординации, применяются в случае, когда нужно найти закономерности отношений между многими переменными одновременно [1]. В экологических исследованиях насекомых таковыми могут быть обилия видов в сообществе, между которыми существуют определенные взаимосвязи, а также факторы среды, характеризующие местообитания. Методы ординации позволяют выделить группы с общими свойствами в анализируемых выборках, выявить градиенты и тренды в многомерных данных, продемонстрировать зависимости между переменными и определить, какие из них являются наиболее влиятельными, а также исследовать переменные на взаимные корреляции (мультиколлинеарность).

Образец цитирования:

Сушко Г.Г. Методы многомерного анализа данных в синэкологии насекомых. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2020;1:38–45.

For citation:

Sushko GG. Methods of multivariate data analysis in insects synecology. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2020;1:38–45. Russian.

Автор:

Геннадий Геннадьевич Сушко – кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой экологии и охраны природы биологического факультета.

Author:

Gennadi G. Sushko, PhD (biology), docent, head of the department of ecology and nature conservation, faculty of biology. gennadis@rambler.ru

Перечисленные особенности сообществ можно отобразить на 2-мерном (биplot) или 3-мерном (триplot) графике, которые обуславливают их основные черты.

Методы ординации начали активно использоваться в биологии во второй половине прошлого века [2]. В наше время, для которого характерно развитие компьютерной техники, они находят все более широкое распространение, особенно в синэкологических исследованиях. Не обошли стороной данные методы и энтомологию. Однако уже трудно провести грань между отраслями знаний. Так, насекомые являются подходящими объектами исследований в самых различных областях, например, при оценке состояния окружающей среды, биоиндикации, молекулярной генетики, теории эволюции, климатологии и т. д. [3].

Современное состояние вычислительной техники позволило обрабатывать огромные массивы данных, поэтому методы многомерного анализа получили широкое развитие. Существенной проблемой является ограниченность русскоязычной литературы по современным методам анализа данных, которые появляются, уточняются и дополняются чуть ли не каждый год. Одной из первых книг на русском языке, в которой рассмотрены в большом объеме методы многомерного анализа на примере данных геоботанических исследований, стал перевод монографии Р. Г. Джонгмана с соавторами «Анализ данных в экологии сообществ и ландшафтов» (1999) [2]. Многие методы анализа данных в экологии на примере водных беспозвоночных животных продемонстрированы в монографиях В. К. Шитикова с соавторами «Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения» (2005) [4], «Макроэкология речных сообществ: концепции, методы, модели» (2012) [5], «Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R» (2013) [6]. Подробный обзор методов ординации дан в публикациях А. Б. Новаковского (2008) [7], В. К. Шитикова и Т. Д. Зинченко (2019) [1].

Изучая зарубежную современную литературу по энтомологии, не трудно заметить, что авторы используют широкий спектр методов многомерного анализа. В то же время достаточно сложно сориентироваться в целесообразности того или иного метода в конкретном случае, и у исследователя зачастую возникают проблемы выбора.

Цель исследования – систематизация основных методик многомерного анализа данных, приемлемых в синэкологии насекомых, а также определение возможностей и ограничений к применению наиболее распространенных методов ординации.

Материалы и методы исследования

Материалом для работы послужил анализ литературы, размещенной в открытом доступе в одной из крупнейших международных баз данных PubMed Central (PMC), которая содержит публикации по биологии, медицине и наукам о живой природе [8]. Для анализа использованы такие показатели, как методы ординации, кластерного анализа, выбор пакета статистической обработки данных. Всего проанализировано 350 работ по экологии наземных насекомых различных таксонов, отобранных по соответствующим ключевым словам в названии и аннотации, опубликованных за последние 5 лет.

Рассмотрены возможности и ограничения к применению наиболее часто используемых методов многомерного анализа данных на основании современных литературных источников, в том числе пособий по работе в статистической среде R и руководства к применению ее отдельных пакетов [9–15].

Результаты исследования и их обсуждение

Среди проанализированных публикаций, включающих результаты энтомологических и экологических исследований с использованием насекомых, 65,6 % содержат методы ординации и кластеризации. В числе применяемых в настоящее время наиболее распространенными оказались методы непрямой ординации: неметрическое многомерное шкалирование – nMDS (42,6 %). Достаточно часто используется анализ главных компонент – PCA (13,1 %), реже анализ соответствий с удаленным трендом – DCA (4,9 %) и анализ главных координат – PCoA (3,3 %). Доля методов прямой ординации (CCA и RDA) оказалась ниже и составила в совокупности 36 % (по 18 % на каждый метод соответственно). Следует отметить, что такие популярные в русскоязычных публикациях методы, как кластерный анализ (5,02 %) и дискриминантный анализ (1 %), не имеют столь широкого распространения в исследованных публикациях [3].

Проверку того, значимо ли отличаются группы объектов (например, данные обилия видов в нескольких местообитаниях), осуществляли с помощью мультивариантных тестов, основанных на статистических гипотезах. Такие методики выявлены в 29,2 % публикаций. Чаще всего применяются такие непараметрические методы, как многофакторный дисперсионный анализ PERMANOVA (53,5 %) и анализ сходства ANOSIM (28,5 %) [3].

Для выполнения различных методов анализа данных были использованы как стандартные пакеты статистического анализа (STATISTICA, SPSS, PAST), так и специализированные, которые разработаны для выполнения ординации (PC-Ord, CANOCO). Однако в основном анализ выполнялся в R (62,5 %). Стати-

стическая среда R в настоящее время предоставляет наиболее широкие возможности для обработки таких данных: пакеты *vegan*, *BiodiversityR* и многие иные позволяют анализировать биологические данные. Другие, в том числе и наиболее популярные до недавнего времени пакеты анализа, применяются не так часто: *PRIMER* (12,5 %), *CANOCO* (9,3 %), *SPSS* (7,3 %), *STATISTICA* и *PAST* (по 6,2%), *SAS* (3,1 %), *PC-ORD* (2 %) [3].

Следует подчеркнуть, что ординация – это совокупность методов многомерного анализа, позволяющая проводить упорядочение видов, факторов среды, типов биотопов и других экологических переменных путем их оптимального проецирования в пространство малой размерности. Термин введен Дж. Гудллом, и происходит от нем. «*ordnung*» (порядок) [1; 5; 14].

Методы ординации делят на неограниченные (*Unconstrained*) и ограниченные (*Constrained*). Первая группа из них не ограничена конкретными переменными и в нашем случае показывает изменение видового состава, обилие видов, биомассы, морфологических показателей и т. д. вдоль некоторой абстрактной оси (градиента), которая отражает максимальную изменчивость в структуре данных. Тогда как прямая ординация отображает изменение исследуемых переменных вдоль градиентов среды, выбранных исследователем (температура, уровень влажности, рельеф, сезон, уровень загрязнения и т. д.) [1; 10; 11]. В последнем случае анализ ограничивается только факторами среды, выбранными (измеренными) исследователем, которые, по его мнению, можно считать наиболее важными. По этому принципу также выделяют методы прямой (*Direct gradient analyses*) и непрямой (*Indirect gradient analyses*) ординации. Непрямой градиентный анализ имеет преимущества перед прямым, поскольку видовой состав и его количественные показатели достаточно легко идентифицируются. Однако условия среды охарактеризовать достаточно сложно вследствие того, что существует много факторов и еще больше способов их оценки. Следовательно, виды могут быть более информативными индикаторами окружающей среды [11; 14].

Основные методы непрямой ординации, используемые в энтомологических исследованиях, – анализ главных компонент (*PCA*, *principal component analysis*), анализ соответствий (*CA*, *correspondence analysis*), анализ соответствия с удаленным трендом (*DCA*, *detrended correspondence analysis*), анализ главных координат (*PCoA*) или метод метрического многомерного шкалирования, неметрическое многомерное шкалирование (*NMDS*, *nonmetric multidimensional scaling*), основаны на анализе одной матрицы данных (в большинстве случаев – матрица видов и их обилий в различных биотопах).

Среди выявленных, наиболее распространенных методов прямой ординации – канонический анализ соответствий (*CCA*, *canonical correspondence analysis*), анализ избыточности (*RDA*, *redundancy analysis*). Они отличаются от предыдущих использованием двух матриц данных (матрица видов и матрица, включающая измеренные переменные среды). Как правило, методы ограниченной ординации применяются после неограниченного ординационного анализа, при попытке связать видовой состав местообитаний с переменными среды на графике ординации.

Анализ диаграмм различных методов ординации во многом сходен. Длина вектора переменной на графике отражает его вклад в ординацию. Таким образом, переменные, описываемые более длинными векторами, считаются наиболее важными (информативными) по сравнению с теми, которые характеризуются короткими стрелками. Угол между двумя стрелками (или между стрелкой и осью координат) указывает на величину корреляции между двумя переменными (или между переменной и осью координат). Острый угол характеризует высокую положительную корреляцию (если угол 0° – корреляция равна 1). Прямой угол свидетельствует об отсутствии корреляции (рис. 1), тогда как тупой угол – об отрицательной (при 180° корреляция равна – 1) [11].

Анализ главных компонент (*PCA*) является одним из самых старых методов ординации. Процедура *PCA* заключается в построении новых синтетических переменных – главных компонент (*principal components*) или осей на графике ординации (*PC 1*, *PC 2*, *PC 3*, *PC 4* и т. д.), которые являются линейными комбинациями исходных переменных (например, видов, местообитаний или факторов среды). Метод позволяет сгруппировать объекты на ординационной диаграмме, что дает возможность увидеть тренды в распределении данных (обилии видов, концентрации химических элементов и т. д.) и сделать предположения о вызывающих их факторах [14]. Например, можно проанализировать приуроченность видов к определенным биотопам (рис. 2). Дистанция между объектами измеряется расстоянием Евклида [14].

Несмотря на частое использование в биологии, этот метод не идеален для анализа данных о численности видов насекомых из-за ряда ограничений. Во-первых, он работает корректно, если переменные имеют нормальное или близкое к нему распределение, что встречается достаточно редко в комплексах насекомых, приуроченных к определенным местообитаниям.

Во-вторых, переменные должны быть связаны между собой линейными отношениями (либо распределение обилия видов или других переменных, характеризующихся монотонностью, без ярко выраженных пиков) [1]. Это также не частое явление, поэтому требуется преобразование данных (трансформация Хеллингера или логарифмирование), которое в ряде случаев может исправить ситуацию [15].

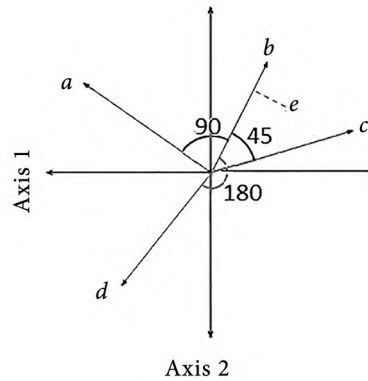


Рис. 1. Пример ординационной диаграммы; *e* – точка, соответствующая виду, *a* – *d* – вектора соответствующие переменным среды

Fig. 1. An example of ordination diagram; *d* – the point corresponding to the species, *a* – *d* – the vectors corresponding to the environment variables

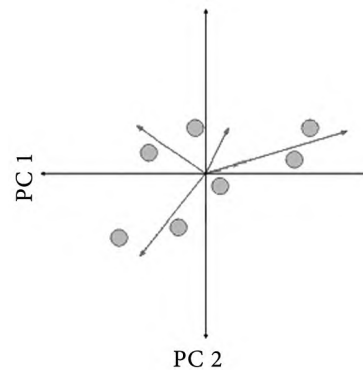


Рис. 2. Пример ординационной диаграммы анализа главных компонент. Стрелки – биотопы, точки – виды

Fig. 2. An example of the ordination diagram of the principal components analysis. Arrows are biotopes, points are species

В-третьих, анализ главных компонент работает корректно при коротких градиентах в структуре данных, то есть когда одни и те же виды в основном идентифицируются повсюду в районе исследования, и выборки различаются по их обилиям. Если ваши данные получены, например, в широком спектре местообитаний и уже априори наблюдаются значительные вариации видового состава и обилия, РСА следует применять с осторожностью. Проверить наличие градиента и его длину можно с помощью другого метода ординации – анализа соответствий, о котором речь пойдет ниже.

Следует отметить, что применение РСА к данным со многими нулями (когда многие виды присутствуют только в отдельных местообитаниях) может привести к некорректным выводам. В данном случае может улучшить ситуацию также преобразование Хеллингера или логарифмирование ($\log(x+1)$) [14; 15]. Напомним, что прибавление 1 необходимо вследствие того, что $\log 1 = 0$, а в данных многие виды в выборках могут быть представлены одним экземпляром. Альтернативой логарифмированию является трансформация извлечением корня 4-й степени, которая предпочтительнее классического $\log(x+1)$ в тех случаях, когда добавление константы (1) может повлиять на небольшие значения [14].

РСА выполняется с использованием двух подходов: на основе дисперсионно-ковариационной матрицы, либо на матрице корреляции. Первый подход применяется, когда таблица данных включает наблюдения в одних и тех же единицах измерения или одинаковые типы данных (например, число особей разных видов). Второй подход используется, если переменные измеряются в разных единицах или в разных масштабах (например, разные параметры окружающей среды) [10; 14].

Анализ соответствий (СА). Цель анализа соответствий состоит в том, чтобы наилучшим способом обобщить соответствие между строками и столбцами матрицы данных. Таким образом, чем ближе точки, представляющие две строки в таблице данных, тем больше они соответствуют друг другу, а близость между точками, представляющими данные в строках и столбцах, указывает на связь между ними [11]. В нашем случае это позволяет показать связи между видами насекомых и биотопами. Расстояние между объектами вычисляется с использованием меры дистанции хи-квадрат, а не расстояния Евклида, как в РСА.

Этот метод имеет преимущество, поскольку хи-квадрат является лучшим экологическим расстоянием, чем евклидово и не чувствителен к двойным нулям в таблице данных, которые анализ главных компонент может принять за сходства [13; 14].

Кроме того, анализ соответствий изначально был ориентирован на анализ объектов с унимодальным распределением, что в большей мере отражает распределение обилия видов (в большинстве экологических исследований данные не соответствуют линейному распределению и имеют пик, отражающий экологический оптимум) [14].

В то же время СА обладает рядом недостатков. Если первая полученная ось (СА 1) отражает влияние одного самого важного фактора среды, то вторая и последующие оси часто являются искаженными версиями первой оси. Этот метод также сильно преувеличивает влияние редких видов. Кроме того, иногда возникает математический артефакт – «эффект арки», обусловленный квадратичными связями между осями, при котором точки отдельных видов выстраиваются на графике в дугу (рис. 4) [1]. Если данные недостатки прослеживаются в ходе выполнения анализа, то лучше использовать альтернативный метод ординации.

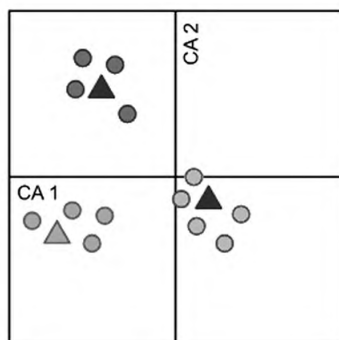


Рис. 3. Пример ординационной диаграммы анализа соответствий. Треугольники – биотопы, точки – виды

Fig. 3. An example of ordination diagram of the correspondence analysis. Triangles are biotopes, points are species

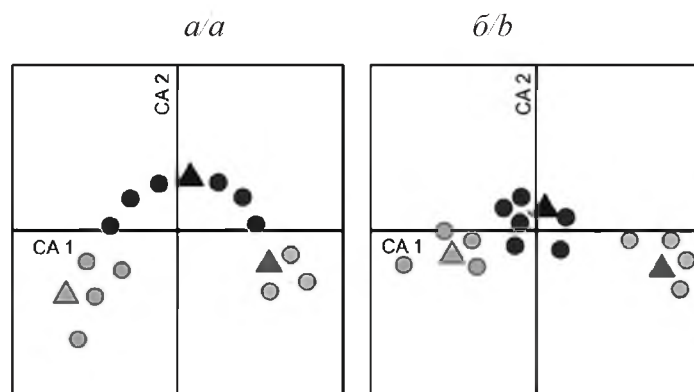


Рис. 4. Пример ординационной диаграммы анализа соответствий с эффектом арки (а) и с удаленным трендом (б). Треугольники – биотопы, точки – виды

Fig. 4. An example of ordination diagram of the correspondence analysis with the arch effect (a) detrended (b). Triangles are biotopes, points are species

Анализ соответствия с удаленным трендом (DCA). Для устранения эффекта арки в СА используется математическая процедура detrending (рис. 5). Данный подход, с одной стороны, улучшает качество анализа соответствий, но с другой – вместе с удалением эффекта арки разрушаются и реально существующие тренды данных, что приводит к потере информации, имеющей экологическую значимость [10; 13]. Несмотря на достоинства DCA и его широкое использование в прошлом, многие специалисты в настоящее время относятся к этому методу ординации с осторожностью [14]. Таким образом, DCA может помочь исследователю определить длину экологических градиентов при анализе обилия видов в различных местообитаниях.

Анализ главных координат (PCoA), или метрическое многомерное масштабирование (Metric multidimensional scaling, MDS) – это метод ординации, аналогичный PCA. Его преимущество перед PCA в том, что может быть использована любая экологическая дистанция, а не только евклидово расстояние. В экологии чаще всего применяют расстояние Брея–Кертиса. PCoA позволяет получить лучшие результаты при

рассмотрении трендов распределения видов в местообитаниях с широким диапазоном факторов среды, когда выборки в значительной мере различаются по видовому составу. Кроме того, PCoA может обрабатывать матрицы, включающие как количественные, так и ранговые и другие качественные переменные [11; 13; 14].

Неметрическое многомерное шкалирование (nMDS). Как и PCoA, метод позволяет исследователю выбирать дистанцию самостоятельно, в зависимости от имеющихся данных (рис. 5). Наиболее часто используется мера расстояния Брея–Кертиса. При этом nMDS ранжирует расстояния между объектами, использует эти ранги, чтобы отобразить их нелинейно на упрощенное двумерное пространство и продемонстрировать их ранговые различия, а не сохранить исходные расстояния. Используя nMDS, можно выявить сходства и различия между объектами. Метод применяется для выявления различий видового состава ассамблей насекомых, наличия связей между видами и группирует выборки по сходству в ординационном пространстве [11; 13; 14]. Главным преимуществом nMDS является то, что от исходных данных не требуется соответствия закону нормального распределения [12; 13]. Неметрическое многомерное шкалирование является гибким методом, так как позволяет использовать широкий спектр различных мер сходства между выборками. Вследствие этого он в настоящее время является наиболее популярным как в энтомологических, так и в синэкологических исследованиях в целом.

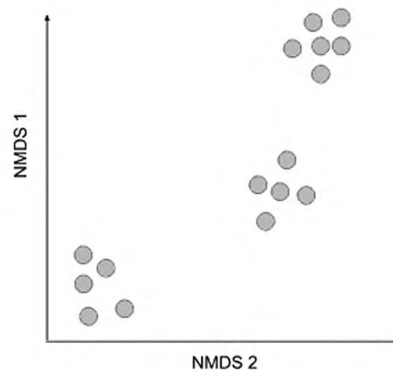


Рис. 5. Пример ординационной диаграммы неметрического многомерного шкалирования. Точками обозначены виды

Fig. 5. An example of ordination diagram of non-metric multidimensional scaling. Dots are indicating species

Показательные результаты nMDS дает в совокупности с тестами ADONIS, ANOSIM, а также PERMANOVA, которые используются для выявления значимых различий между более чем двумя выборками, сгруппированными предварительно на ординационной диаграмме [9; 14]. На этом анализ может не ограничиться. Для выяснения, какие конкретно виды вносят наибольший вклад в различия между выборками, полученными в различных биотопах, можно применить процедуры IndVal (Indicator Value) или SIMPER (Similarity of Percentage).

Анализ избыточности (RDA). Применяется для определения того, какие факторы окружающей среды наиболее значимы для объяснения различий в составе сообществ. Этот метод представляет собой сочетание ординации (PCA) и множественного регрессионного анализа, в котором главные оси (компоненты) ограничены линейными комбинациями переменных среды, как и в анализе главных компонент. Для анализа необходимы две таблицы: одна с данными учетов изучаемых видов (зависимые переменные) и другая, включающая показатели измеренных экологических факторов (независимые переменные) [11; 14]. Анализ избыточности работает корректнее, если переменные имеют распределение близкое к нормальному и связаны между собой линейными отношениями. Таким образом, рекомендуется их преобразование перед анализом (трансформация Хеллингера или логарифмирование), что придаст одинаковый вес всем переменным [11; 14]. RDA может быть представлен графически как биplot, так и триplot, на котором выборки отображаются в виде точек, виды и переменные окружающей среды – в виде стрелок, точек или других символов. Если виды представить в виде стрелок, исходящих из начала координат, то косинус угла между стрелкой вида и стрелкой фактора среды приблизительно равен коэффициенту корреляции между ними [11; 14].

Канонический анализ соответствий (CCA). Используется как и RDA, когда требуется рассмотреть влияние на распределение обилий видов комплекса факторов среды, которые могут быть зависимыми друг от друга. CCA объединяет CA и регрессионный анализ. CCA основан на расстоянии хи-квадрат (рис. 6). Как обсуждалось ранее, это расстояние не является лучшей экологической мерой дистанции, однако оно лучше, чем евклидово, применяемое в PCA и, соответственно, в RDA. В остальном метод похож на RDA, за

исключением того, что ССА основан на унимодальных отношениях вида и окружающей среды, тогда как RDA основан на линейных моделях. Канонический анализ соответствий чувствителен к редким видам. Удаление их из таблицы данных помогает уменьшить проблему [10; 11; 14].

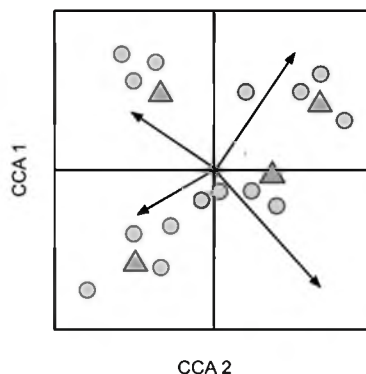


Рис. 6. Пример ординационной диаграммы канонического анализа соответствий.
Треугольники – биотопы, точки – виды, стрелки – факторы среды

Fig. 6. An example of ordination diagram of the canonical correspondence analysis.
Triangles are biotopes, points are species, arrows are environmental factors

Анализ избыточности на основе матрицы расстояний (db-RDA). Анализ можно выполнить и с использованием матрицы, основанной на различных расстояниях, в отличие от RDA. Исследователь может сам выбрать наиболее подходящее из них, соответствующее набору анализируемых данных. В основе метода лежит использование PCoA, а не PCA, как в обычном анализе избыточности. Интерпретация db-RDA во многом сходна с RDA [11].

Следует обратить внимание на то, что методы ограниченной ординации, как следует из названия данной группы, ограничены только теми переменными среды, которые использует исследователь. Но это не означает, что нет других факторов, которые могут оказаться более влиятельными. Поскольку данные виды ординации сочетаются с регрессионным анализом, очень полезным может оказаться анализ остатков регрессии, которые представлены в таблицах анализа.

На этом число методов многомерного анализа не ограничивается. В настоящее время разработаны новые методики, которые находят применение в экологии, основанные на симметричном анализе двух и более матриц данных, что позволяет выполнять на более высоком уровне обширные пространственно-временные исследования [11]. В данном обзоре мы рассмотрели лишь наиболее часто используемые методы многомерного анализа данных, применяемые в энтомологических исследованиях.

Заключение

Итак, следует отметить, что несмотря на разнообразие подходов, нет простых правил выбора лучшего метода ординации. Однако если набор данных имеет ярко выраженный тренд, то это будет показано всеми методами, которые уместно применить в данном случае. Но есть несколько правил, которых желательно придерживаться. Необходим правильный выбор меры экологического расстояния, которая в наибольшей степени должна соответствовать реальным трендам набора данных. Хорошей практикой является повторение анализа с несколькими типами расстояния и выяснение того, приводят ли все эти анализы к одному и тому же выводу. Если разные методы приводят к разным выводам, то в данных нет четкой структуры, или одна из переменных является чрезмерно «влиятельной» вследствие очень высоких значений и подавляет другие. В последнем случае может помочь преобразование (логарифмирование) переменных [1; 11].

Если данные (число особей видов в различных типах местообитаний или их учетная плотность) отчетливо отражают градиент экологических условий местообитаний, формируя ряд последовательных группировок на диаграмме ординации, наиболее подходит анализ соответствий (CA) или канонический анализ соответствий (CCA). Можно применить анализ главных компонент (PCA) или многомерное шкалирование pMDS, если тренды в выборках прослеживаются не отчетливо или затруднительно разделить их на несколько групп. Последний метод является более универсальным, поскольку для PCA необходимы линейные отношения между переменными, либо их монотонное распределение, а также соответствие закону нормального распределения. Не следует применять PCA, если матрицы данных содержат много нулевых значений. В случае, если редкие наблюдения ничего не вносят в общую картину (виды, представленные в массиве данных менее, чем 5 особями во всех выборках), они могут быть удалены.

Библиографические ссылки

1. Шитиков ВК. Многомерный статистический анализ экологических сообществ (обзор). *Теоретическая и прикладная экология*. 2019;1:5–11. DOI:10.25750/1995-4301-2019-1-005-011.
2. Джонгман РГ, тер Браак СДФ, ван Тонгерен ОФР. *Анализ данных в экологии сообществ и ландшафтов* [перевод с английского]. Москва: Российская академия сельскохозяйственных наук; 1999.
3. Сущко ГГ. Использование методов анализа данных в энтомологических исследованиях. В: *Сборник статей III Международной научно-практической конференции памяти В. А. Цинкевича*. Минск: Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам; 2019. с. 381–383.
4. Шитиков ВК, Розенберг ГС, Зинченко ТД. *Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения*. Москва: Наука; 2005.
5. Шитиков ВК, Зинченко ТД, Розенберг ГС. *Макроэкология речных сообществ: концепции, методы, модели*. Тольятти: Кассандра; 2012.
6. Шитиков ВК, Розенберг ГС. *Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R*. Тольятти: Кассандра; 2013.
7. Новаковский АБ. Методы ординации в современной геоботанике. *Вестник Института биологии Коми НЦУрО РАН*. 2008;132(10):2–8.
8. PubMed Central (PMC) [Internet]. [Cited 2019 August 10]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/>
9. Anderson MJ, Walsh DC, Permanova, Anosim, and the Mantel test in the face of heterogeneous dispersions: what null hypothesis are you testing? *Ecological monographs*. 2013;83(4):557–574.
10. Borcard D, Gillet F, Legendre P. *Numerical Ecology with R*. Wien: Springer Nature; 2018.
11. Herve M. Aide-mémoire de statistique appliquée à la biologie. In: *Construire son étude et analyser les résultats à l'aide du logiciel R*. Version finale; 2016. 203 p.
12. McCune B, Grace JB. *Analysis of ecological communities*. Gleneden Beach: MjMSoftware Design; 2002.
13. Oksanen J. *Multivariate Analysis in Ecology. Lecture Notes*. Finland: University of Oulu; 2004.
14. Ramette A. Multivariate analyses in microbial ecology. *FEMS. Microbiological Ecology*. 2007;62(2):142–160.
15. Zuur AF, Ieno EN, Elphick CS. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods of Ecology and Evolution*. 2010;1:3–14.

References

1. Shitikov VK, Zinchenko TD. Multivariate statistical analysis of ecological communities (review). *Teoreticheskaja i prikladnaja ekologija* [Theoretical and Applied Ecology]. 2019;1:5–11. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-1-005-011. Russian.
2. Jongman RH, ter Braak CJF, van Tongeren OFR. *Data analysis in community and landscape ecology*. Wageningen (The Netherlands): Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc); 1987.
3. Russian edition: Jongman RH, ter Braak CJF, van Tongeren OFR. *Data analysis in community and landscape ecology*. Moscow: Rossiyskaja akademija sel'skokhoziaystvennykh nauk; 1999.
4. Sushko GG. *Ispolzovanie metodov analiza damnykh v entomologicheskikh issledovaniyakh* [Use of data analysis methods in entomological research]. In: *Sbornik statey III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii pamyati V. A. Tsinkevicha*. Minsk: Nauchno-prakticheskij centr Natsionalnyy akademii nauk Belarusi po bioresursam; 2019; p. 381–383. Russian.
5. Shitikov VK, Rozenberg GS, Zinchenko TD. *Kolichestvennaja gidroekologija: metody, kriterii, reshenia* [Quantitative hydroecology: methods, criteria, solutions]. Moscow: Nauka; 2005. Russian.
6. Shitikov VK, Zinchenko TD, Rozenberg GS. *Makroekologija rechnykh soobshchestv: kontseptsii, metody, modeli* [Macroecology of river communities: concepts, methods, models]. Togliatti: Kassandra; 2012. Russian.
7. Shitikov VK, Rozenberg GS. *Rendomizatsia i butstrep: statisticheskij analiz v biologii i ekologii s ispolzovaniem R* [Randomization and bootstrap: a statistical analysis in biology and ecology with R use]. Togliatti: Kassandra; 2014. Russian.
8. Novakovsky AB. *Metody ordinatsii v sovremennoy geobotanike* [Ordination methods in modern geobotany]. *Vestnik Instituta biologii Komi NTSUrO RAN*. 2008;132(10):2–8. Russian.
9. PubMed Central (PMC) [Internet]. [Cited 2019 August 10]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/>
10. Anderson MJ, Walsh DC, Permanova, Anosi, and the Mantel test in the face of heterogeneous dispersions: what null hypothesis are you testing? *Ecological monographs*. 2013;83(4):557–574.
11. Borcard D, Gillet F, Legendre P. *Numerical Ecology with R*. Wien: Springer Nature; 2018.
12. Herve M. Aide-mémoire de statistique appliquée à la biologie. In: *Construire son étude et analyser les résultats à l'aide du logiciel R*. Version finale; 2016. 203 p.
13. McCune B, Grace JB. *Analysis of ecological communities*. Gleneden Beach: MjMSoftware Design; 2002.
14. Oksanen J. *Multivariate Analysis in Ecology. Lecture Notes*. Finland: University of Oulu; 2004.
15. Ramette A. Multivariate analyses in microbial ecology. *FEMS. Microbiological Ecology*. 2007;62(2):142–160.
16. Zuur AF, Ieno EN, Elphick CS. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods of Ecology and Evolution*. 2010;1:3–14.

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 615.01:59.089:539.1.047

РАДИОМОДИФИЦИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ КОМПЛЕКСА ИНОЗИНА С СО(II) ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МЫШЕЙ ЛИНИИ C57BL/6

**Н. Н. ВЕЯЛКИНА¹⁾, Е. М. КАДУКОВА¹⁾, Е. В. ЦУКАНОВА¹⁾,
К. Н. ШАФОРОСТ¹⁾, К. М. ФАБУШЕВА¹⁾, А. С. АБДУЛЛАЕВ²⁾, Э. Н. ШАМИЛОВ²⁾**

¹⁾Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Беларусь

²⁾Институт радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана,
ул. Б. Вагабаде, 9, AZ1143, г. Баку, Азербайджан

Образец цитирования:

Вейалкина НН, Кадукова ЕМ, Цуканова ЕВ, Шафорост КН, Фабусева КМ, Абдуллаев АС, Шамилов ЭН. Радиомодифицирующее действие комплекса инозина с СО(II) при облучении мышей линии C57BL/6. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;1:46–53.

For citation:

Veyalkina NN, Kadukova AM, Tsukanova AV, Shafarost KN, Fabusheva KM, Abdullayev AS, Shamilov EN. Radiomodifying effect of the inosine complex with CO(II) in the irradiation C57BL/6 line mice. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;1:46–53. Russian.

Авторы:

Наталья Николаевна Вейалкина – кандидат биологических наук; заведующий лабораторией экспериментальных биологических моделей.

Елена Михайловна Кадукова – старший научный сотрудник лаборатории комбинированных воздействий.

Елена Владимировна Цуканова – младший научный сотрудник экспериментальных биологических моделей.

Кристина Николаевна Шафорост – младший научный сотрудник экспериментальных биологических моделей.

Ксения Михайловна Фабусева – младший научный сотрудник экспериментальных биологических моделей.

Асим Сабри оглы Абдуллаев – кандидат химических наук; заведующий лабораторией «Радиопротекторы».

Элшан Нураддин оглы Шамилов – научный сотрудник лаборатории «Радиопротекторы».

Authors:

Nataliya N. Veyalkina, PhD (biology); head at the laboratory of experimental biological models.

veyalkina@mail.ru

Alena M. Kadukova, senior researcher at the laboratory of combined effects.

helena.kad@mail.ru

Alena V. Tsukanova, junior researcher at the laboratory of experimental biological models.

elenatsukanova14@gmail.com

Kristina N. Shafarost, junior researcher at the laboratory of experimental biological models.

forkristina90@mail.ru

Kseniya M. Fabusheva, junior researcher at the laboratory of experimental biological models.

fabusheva_kseniya@mail.ru

Asim S. Abdullayev, PhD (chemistry); head at the laboratory of radioprotectors.

seabrioglu@gmail.com

Elshan N. Shamilov, researcher at the laboratory of radioprotectors.

seabrioglu@gmail.com

Поиск и изучение новых радиозащитных соединений, способных модифицировать эффекты ионизирующего излучения, – актуальная задача радиобиологии. В настоящее время перспективными биологически-активными соединениями являются малотоксичные и мембранопроницаемые комплексы инозина с металлами.

Цель исследования – сравнительный анализ противолучевых свойств комплекса инозина с кобальтом при остром γ -облучении мышей.

Эксперименты проводились на лабораторных мышках линии C57Bl/6 обоего пола. Для оценки влияния исследуемого соединения на выживаемость животных после облучения они были облучены в дозах 4, 5, 6 и 7 Гр, наблюдение проводилось в течение 30 сут. Для определения влияния на уровни микроядер в полихроматофильных эритроцитах костного мозга и клеточной гибели лимфоцитов периферической крови животные были облучены в дозе 1,5 Гр и выведены из эксперимента через 48 ч после облучения. Растворы инозина и комплексной соли инозина с кобальтом (II) вводили внутривентрально в дозе 45 мг/кг через 15 мин после облучения (материалы для исследования предоставлены Институтом радиационных проблем НАН Азербайджана). Отмечено положительное влияние внутривентрального введения комплекса инозина с кобальтом (II) и инозина на выживаемость мышей. Через месяц после облучения в дозах 5 Гр не выявлено значимого влияния исследуемого соединения на восстановление клеточного состава лейкоцитов в периферической крови животных. При этом наблюдалось снижение уровня апоптоза лимфоцитов периферической крови и полихроматофильных эритроцитов с микроядрами в костном мозге в группах животных, получавших инозин и растворы кобальт(II)инозината, через 48 ч после облучения в дозе 1,5 Гр.

Ключевые слова: инозин; кобальт(II)инозинат; радиомодификатор; γ -облучение; мыши C₅₇Bl/6.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке ГКНТ Беларуси и Национальной академии наук Азербайджана (договор с БРФФИ № Б18А3Г-002 от 14 апреля 2018).

RADIOMODIFYING EFFECT OF THE INOZINE COMPLEX WITH CO (II) IN THE IRRADIATION C57BL/6 LINE MICE

N. N. VEYALKINA^a, A. M. KADUKOVA^a, A. V. TSUKANOVA^a,
K. N. SHAFAROST^a, K. M. FABUSHEVA^a, A. S. ABDULLAYEV^b, E. N. SHAMILOV^b

^aInstitute of Radiobiology of National Academy of Sciences of Belarus,
4 Fiadzyuninskaya Street, Gomel 246007, Belarus

^bInstitute of Radiation Problems, National Academy of Sciences of Azerbaijan,
9 B.Vahabzade Street, Baku AZ1143, Azerbaijan

Corresponding author: N. N. Veyalkina (veyalkina@mail.ru)

The study of new radioprotective compounds modifying the damaging effects of ionizing radiation is important issue of radiobiology.

The aim of this research was to study of the anti-radiation properties of inosine and inosinate cobalt (II) after acute single exposure γ -radiation.

The experiment was performed in C57Bl/6 mice of both sexes. To assess the radioprotective effect of the test compound the animals were irradiated to different dosages 5Gy, 6Gy, 7Gy, 8Gy, the observation was carried out for 30 days. To assess the effect of the test compound on the level of micronuclei in polychromatophilic erythrocytes of the bone marrow and the level of cell death of peripheral blood lymphocytes, the animals were irradiated of dose 1.5 Gy, the animals were euthanized 48 h post irradiation. Solutions of inosine and Co(II)inosinate were administered intraperitoneally at a dose of 45 mg/kg 15 minutes after irradiation. The Co(II)inosinate, was provided by the Institute of Radiation Problems of the National Academy of Sciences of Azerbaijan. There was an increase in the survival of animals which were injected the solution of inosine and Co(II)inosinate when compared to the radiation group alone. No significant effect was found on the restoration of the cellular composition of peripheral blood leukocytes in animals one month after irradiation at dose of 5 Gy. The decrease in the number of cells with micronuclei and a reduced number of lymphocytes at the stage of early and late apoptosis was observed in groups of animals which were injected the solution of inosine and Co(II) inosinate.

Key words: Inosine; Co(II) inosinate; radiomodification; γ -radiation; C57Bl/6 mice.

Acknowledgments. The work was supported by the joint project of the State Committee for Science and Technology Belarus and the National Academy of Sciences of Azerbaijan.

Введение

Развитие технологий на современном этапе ведет к тому, что человек все чаще сталкивается с воздействием ионизирующего излучения. В настоящее время невозможно избежать людей, проживающих на радиационно-загрязненных территориях и работающих на ядерных объектах, пациентов, проходящих

лучевую терапию, от воздействия ионизирующего облучения. Вместе с тем, по нашему мнению, человека можно защитить от последствий такого облучения или существенно уменьшить радиационно-индуцируемые эффекты. Для снижения отрицательных последствий сверхнормативного облучения проводятся широкомасштабные работы по поиску, созданию и испытанию новых высокоэффективных радиозащитных препаратов и средств ранней терапии лучевых поражений [1; 2], способных модифицировать повреждающие эффекты ионизирующего излучения, обусловленные повреждением биологических макромолекул – ДНК, белков, липидов, которые приводят к патологическим последствиям.

В середине прошлого столетия было обнаружено, что препараты РНК защищали от радиационно-индуцированных повреждений и увеличивали выживаемость облученных животных при введении их как до, так и после облучения [3]. Затем было показано, что из основных природных рибонуклеозидов, входящих в состав РНК, инозин и гуанозин обладают ярко выраженными антиоксидантными и радиозащитными свойствами. Причем наиболее эффективные радиозащитные свойства они проявляли при введении их в организм вскоре после облучения [4].

С. В. Гудковым с соавторами выявлено, что пуриновые нуклеозиды, особенно гуанозин и инозин, являются природными антиоксидантами и защищают ДНК *in vitro* от повреждений активными формами кислорода, индуцируемыми ионизирующим излучением и теплом. Эти нуклеозиды уменьшают генерацию в водных растворах под влиянием тепла таких активных форм кислорода, как перекись водорода и гидроксильные радикалы. Установлено, что гуанозин и инозин – это радиопротекторы, увеличивающие выживаемость мышей при воздействии летальных доз γ -излучения. Однако они эффективны при их введении в организм животных вскоре после облучения. Выявлен также существенный радиомодифицирующий эффект на мышах, потреблявших в постлучевой период нуклеозиды с питьевой водой [5].

Металлы, относящиеся к микроэлементам, и их комплексы с органическими лигандами играют важную роль в таких биохимических системах, как ферментативный катализ, перенос ионов металлов через клеточные мембраны. Особое внимание уделяется комплексам металлов с лигандами, которые важны в биологических системах, поскольку их включение в металлоорганические соединения открывает широкие возможности для разработки перспективных соединений для фармакологии. Металлосодержащие комплексы имеют важное диагностическое и терапевтическое применение в медицинской практике. Поэтому в последние годы осуществляется синтез комплексов металлов с более эффективными хелатирующими лигандами. Предпочтение отдается природным малотоксичным и легко метаболизирующимся в организме веществам, в частности пуриновым основаниям. Инозин как нуклеозид пурина является предшественником аденозинтрифосфата (АТФ) и с ионами металлов образует малотоксичные и мембранопроницаемые комплексы [6; 7]. Кобальт относится к биогенным металлам и микроэлементам, необходимым для нормальной жизнедеятельности живых организмов. Для соединений кобальта отмечен ряд важных биологических свойств, среди которых стимуляция кроветворения и регенеративной функции.

В связи с этим актуальным является изучение радиозащитных свойств комплексов инозина с биогенными металлами, которые будут обладать минимальной токсичностью, способностью снижать негативное действие ионизирующего излучения и широким спектром физиологического действия.

Цель исследования – сравнительный анализ радиомодифицирующих свойств инозина и комплексной соли инозината кобальта (II) при однократном остром облучении мышей линии C₅₇Bl/6.

Материалы и методы исследования

Эксперименты проводились на лабораторных мышах линии C₅₇Bl/6 обоего пола в возрасте 2–2,5 мес. Животные содержались в стационарных условиях вивария ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси» на полноценном стандартном пищевом рационе по установленным нормам и при свободном доступе к воде.

До начала эксперимента животные находились под карантинным наблюдением в течение двух недель. Компоновку по группам наблюдения проводили в зависимости от пола и массы тела.

Все экспериментальные работы в лаборатории выполнялись в соответствии с общепринятыми нормами обращения с животными и правилами Директивы 2010/63/EU Европейского Парламента и Совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях, от 22 сентября 2010 г.

Общее однократное равномерное облучение животных проводили с помощью закрытого источника γ -излучения на установке ИГУР-1 (источник излучения – радионуклид ¹³⁷Cs). Для оценки влияния исследуемого соединения на выживаемость животных после облучения животные были облучены в дозах 5, 6, 7 и 8 Гр. Для оценки влияния исследуемого соединения на уровень микроядер в полихроматофильных эритроцитах (ПХЭ) костного мозга и уровень клеточной гибели лимфоцитов периферической крови животные были облучены в дозе 1,5 Гр.

Исследуемые растворы готовили непосредственно перед введением их животным, растворяя в 9 % NaCl. В качестве препарата-сравнения использовали «Рибоксин» – раствор для инъекций, производимый ОАО «Борисовский завод медицинских препаратов». Действующее вещество – инозин (100 мг в 5 мл раствора).

Комплексная соль инозина, кобальт(II)инозинат, аморфный порошок, хорошо растворимый в воде, был предоставлен организацией-соисполнителем по проекту – Институтом радиационных проблем НАН Азербайджана.

Растворы инозина и кобальт(II)инозинат вводили животным опытных групп внутривентрально в дозе 45 мг/кг через 15 мин после облучения.

Животные контрольной группы и групп, подверженных облучению без введения исследуемых соединений, получали внутривентральные инъекции 9 %-го раствора NaCl в соответствующем объеме. Наблюдение за животными проводилось в течение 30 сут.

Периферическую кровь получали при декапитации под наркозом на 30-е сут. после облучения. Лейкоциты и эритроциты подсчитывали в камере Горяева.

Приготовление цитологических препаратов для микроядерного анализа проводили по стандартной методике [8], извлекали бедренную кость задней конечности, из которой вымывали клетки костного мозга и готовили суспензию в эмбриональной сыворотке крови крупного рогатого скота. Суспензию прокапывали на стекла и делали мазки. После высушивания на воздухе препараты фиксировали этанолом и окрашивали краской Гимза по Романовскому. При помощи светового микроскопа проводили подсчет полихроматофильных эритроцитов (ПХЭ) с микроядрами. Критерием уровня цитогенетического повреждения служил процент ПХЭ костного мозга, содержащих микроядра.

Лимфоциты выделяли из цельной гепаринизированной крови на градиенте плотности HISTOPAQUE-1077 (Sigma-Aldrich, США). Кровь, отобранную в объеме 2 мл в пробирки с гепарином в качестве антикоагулянта, разводили фосфатно-солевым буфером (ФСБ) в соотношении 1:1 и наслаивали на градиенте плотности HISTOPAQUE-1077. Образцы центрифугировали в течение 30 мин при 400 g. Слой мононуклеаров, содержащий 70–90 % лимфоцитов, отбирали с поверхности раздела, дважды отмывали ФСБ центрифугированием в течение 10 мин при 250 g.

Проводили анализ количества апоптотических лимфоцитов на проточном цитофлюориметре Cytomics FC 500 (Beckman Coulter, США) с использованием набора ANNEXIN V – FITC Apoptosis Kit (Invitrogen, США), содержащим аннексин V и йодид пропидия. Данная методика окраски позволяет определить количество клеток, вступивших в апоптоз (аннексин V-положительные клетки); количество клеток, погибших/гибущих по пути некроза (клетки, положительные по йодиду пропидия); оценить «ранний» апоптоз (клетки, положительные только по аннексину V) и «поздний» апоптоз (клетки, положительные и по аннексину V, и по йодиду пропидия).

Полученные результаты были проанализированы с помощью методов вариационной статистики. Достоверность различий между группами устанавливали с использованием критериев Стьюдента с поправкой Бонферони. При оценке выживаемости использовали точный критерий Фишера. Критический уровень значимости (p) при проверке статистических гипотез в данном исследовании принимался равным 0,05. Фактор изменения дозы (ФИД) для исследуемых растворов рассчитывали методом пробит анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Внутривентральное введение инозина в дозе 45 мг/кг через 15 мин после воздействия ионизирующего излучения повышало выживаемость животных, облученных в дозе 7 Гр, более чем на 20 %, по сравнению с группами облученных животных (табл. 1).

При внутривентральном введении раствора соли кобальт(II)инозинат выживаемость мышей при облучении в дозе 7 Гр возросла на 30 % по сравнению с соответствующей группой облученных животных. При этом расчетные уровни ЛД_{50/30} составили $6,37 \pm 0,17$ Гр в группе «Облучение», $7,57 \pm 0,29$ Гр в группе «Облучение + Инозин» и $8,34 \pm 0,33$ Гр в группе «Облучение + кобальт(II)инозинат». ФИД для инозина и комплексной соли инозина с кобальтом (II) по критерию 30-суточной выживаемости животных, составил 1,2 и 1,3 соответственно.

При наблюдении за животными в течение 30 сут. после облучения проводился контроль прироста массы тела животных. Животные контрольной группы, не подверженные облучению, имели положительный прирост массы тела на протяжении всего периода наблюдения. Однако в группах облученных животных на 7 и 15-е сут. после облучения наблюдалось резкое снижение массы тела животных (табл. 2).

Введение раствора инозина после облучения положительно влияло на весовые показатели мышей, возрастание массы тела отмечалось с 14-х сут., а к 30-м сут. данные группы животных имели положительный прирост массы тела.

Таблица 1

Выживаемость мышей линии C₅₇Bl к 30-ым суткам постлучевого периода

Table 1

The survival of C57Bl mice by the 30th day of the post-radiation period

Группы/ доза облучения		Самцы		Самки		Средняя выживаемость, % (95 % ДИ)
		Поставлено в опыт	Выживаемость, % (95 % ДИ)	Поставлено в опыт	Выживаемость, % (95 % ДИ)	
Контроль		20	100 (95,8–100)	20	100 (95,8–100)	100 (97,9–100)
Облучение	5Гр	18	83,3 (78,2–86,9)	16	81,3 (75,6–85,3)	82,4 (79,3–84,7)
	6Гр	16	62,5 (56,9–67,5)	15	73,3 (67,3–78,1)	67,7 (64,4–70,7)
	7Гр	17	35,3 (30,6–40,7)	16	43,8 (38,6–49,3)	39,4 (36,4–42,6)
	8Гр	16	0 (0–5,21)	16	0 (0–5,2)	0 (0–2,64)
Облучение + Инозин	5Гр	16	87,5 (81,9–91,1)	16	93,8 (88,3–96,6)	90,6 (87,6–92,6)
	6Гр	18	66,7 (61,5–71,1)	19	78,9 (73,9–82,7)	73 (70,0–75,4)
	7Гр	17	64,7 (59,3–69,4)	18	61,1 (56,0–65,7)	62,9 (59,8–65,7)
			*		*	*
Облучение + Кобальт(II) инозинат	5Гр	18	94,4 (89,6–96,9)	17	88,2 (82,9–91,6)	91,4 (88,6–93,2)
	6Гр	17	88,2 (82,9–91,6)	18	83,3 (78,2–86,9)	85,7 (82,8–87,8)
	7Гр	18	61,1 (56,0–65,7)	16	81,3 (75,6–85,3)	70,6 (67,4–73,3)
			*		*	*

*Различия со значением в группе «Облучение» достоверны при $p < 0,05$.

Таблица 2

Прирост массы тела мышей линии C₅₇Bl/6 в течении 30 сут после облучения (%)

Table 2

The body weight gain of C57Bl/6 mice within 30 days after irradiation (%)

Группы, доза облучения		Сутки после облучения			
		7-е	15-е	22-е	30-е
Контроль		2,49	5,37	7,61	11,84
Облучение	5Гр	0,28	-1,15	3,88	6,03
	6Гр	-1,17	-6,93	-0,23	4,40
	7Гр	-3,03	-5,44	-8,09	-0,11
Облучение + инозин	5Гр	1,20*	3,13*	7,73*	9,54*
	6Гр	-0,76	2,86*	4,19*	6,09
	7Гр	-2,65	1,14*	3,17*	5,22*
Облучение + Кобальт(II) инозинат	5Гр	1,70*	-1,08	6,21*	9,30*
	6Гр	1,43	-4,47	3,14*	4,78
	7Гр	-0,44	-8,85	0,63*	8,22*

*Различия со значением в группе «Облучение» достоверны при $p < 0,05$.

Восстановление положительного прироста массы тела животных, которым вводили растворы кобальта(II)инозинат, отмечалось на 22- и 30-е сут. после облучения.

Количество лейкоцитов в периферической крови мышей на 30-е сут. после облучения в дозе 5 Гр оставалось значительно сниженным, по сравнению с уровнем интактного контроля (на 50,0 %). У мышей, которым после облучения вводили кобальта(II)инозинат, количество лейкоцитов за это время также было сни-

жено по отношению к уровню контроля на 64,5 % ($p < 0,05$). Вышеназванное свидетельствует об отсутствии влияния исследуемого соединения на лейкоцитарный росток гемопоэза облученных животных.

Количество эритроцитов в периферической крови мышей, облученных в дозе 5 Гр, через 30 сут. оставалось достоверно сниженным по сравнению с уровнем контроля на 17,3 % ($p < 0,05$) (табл. 3). Количество эритроцитов у мышей, которым после облучения в дозе 5 Гр вводили инозин, также на 30-е сут. было снижено по отношению к значению в контроле на 16,3 % ($p < 0,05$). В то же время у мышей, которым после облучения в дозе 5 Гр вводили кобальта(II)инозинат, количество эритроцитов соответствовало уровню контроля, что свидетельствует о некоторой эритропоэтической активности исследуемого соединения (табл. 3).

Таблица 3

Количество эритроцитов в периферической крови мышей (самцы), 30-е сутки после облучения в дозе 5 Гр ($M \pm m$)

Table 3

The number of red blood cells in the peripheral blood of mice (males), 30 days after irradiation at a dose of 5 Gy

Группа	Количество эритроцитов 106/мкл
Контроль	4,92 ± 0,60
Облучение	4,07 ± 0,43*
Облучение + инозин	4,12 ± 0,51*
Облучение + кобальт(II)инозинат	4,39 ± 0,83

*Различия со значением в группе Облучение достоверны при $p < 0,05$.

Для оценки влияния исследуемых соединений на генотоксический эффект ионизирующего излучения использовали микроядерный тест на клетках костного мозга. Был проведен подсчет количества полихроматофильных эритроцитов с микроядрами у интактных и облученных в дозе 1,5 Гр животных, а также при последующем введении инозина или раствора комплексной соли инозина с кобальтом в дозе 45 мг/кг облученным животным.

Таблица 4

Доля клеток костного мозга с микроядрами мышей линии C₅₇Bl/6 в контрольных и опытных группах, ($M \pm m$)

Table 4

The level of bone marrow cells with micronuclei of C57Bl / 6 mice in the control and experimental groups

Группа	Количество		Доля ПХЭ с микроядрами (%)
	животных	ПХЭ	
Контроль	5	10000	0,22±0,06
Облучение	5	10000	1,8±0,45*
Облучение + Инозин	5	10000	1,04±0,25*
Облучение + кобальта(II) инозинат	5	10000	0,90±0,32*

*Различия со значением в группе «Облучение» достоверны при $p < 0,05$.

Доля клеток костного мозга с микроядрами в контрольной группе животных составила 0,22±0,06 %. На вторые сутки после облучения отмечено значительное повышение содержания ПХЭ с микроядрами в костном мозге животных до 1,8±0,45 %.

При введении раствора инозина облученным животным наблюдалось снижение количества ПХЭ с микроядрами. Данный показатель значимо отличался от такового в группе облученных животных и составил 1,04±0,25 %, хотя по сравнению с необлученными животными количество ПХЭ с микроядрами в данной группе оставалось повышенным. Следует отметить, что снижение количества клеток с микроядрами отмечено в группах животных, которым вводили кобальта(II)инозинат до 0,90±0,32 %.

Лимфоциты периферической крови являются важным компонентом иммунной системы и влияют на иммунный статус животных [9]. Одним из ключевых компонентов патогенетических изменений при нарушениях окислительного метаболизма является изменение уровня клеточной гибели.

При оценке влияния инозина и кобальта(II)инозината на уровень апоптоза лимфоцитов периферической крови подопытных мышей было показано, что в контрольной группе животных данные клеточной гибели лимфоцитов периферической крови по окончании срока наблюдения составили $7,64 \pm 2,78$, $4,66 \pm 0,92$ и $0,74 \pm 0,15$ % соответственно для клеток на стадии раннего апоптоза, позднего апоптоза и некроза (табл. 5).

Таблица 5

Показатели клеточной гибели лимфоцитов периферической крови мышей линии C₅₇Bl/6 в контрольных и опытных группах, (M $\pm$ m)

Table 5

The level of cell death of peripheral blood lymphocytes of C₅₇Bl/6 mice in the control and experimental groups

Группа	Живые	Ранний апоптоз	Поздний апоптоз	Некроз
Контроль	90,37 $\pm$ 0,72	4,775 $\pm$ 1,33	3,975 $\pm$ 0,92	0,875 $\pm$ 0,39
Облучение	79,9 $\pm$ 2,79*	13,14 $\pm$ 2,26*	5,26 $\pm$ 1,09*	1,7 $\pm$ 0,71
Облучение + Инозин	83,64 $\pm$ 3,13	10,78 $\pm$ 3,90*	4,58 $\pm$ 1,22	1,00 $\pm$ 0,56
Облучение + кобальт(II) инозинат	85,00 $\pm$ 2,22	8,94 $\pm$ 2,74*	4,46 $\pm$ 1,79	1,60 $\pm$ 0,83

*Различия со значением в группе «Облучение» достоверны при $p < 0,05$.

Влияние ионизирующего излучения в дозе 1,5 Гр вызвало повреждение клеток крови с уменьшением количества лимфоцитов в периферической крови. В данном эксперименте у облученных животных на 2-е сут. после облучения отмечено снижение количества жизнеспособных лимфоцитов и повышение лимфоцитов на стадии раннего апоптоза до $13,14 \pm 2,26$ % и позднего апоптоза до $5,26 \pm 1,09$ %, а также на стадии некроза до $1,7 \pm 0,71$ %.

В группе, животные которой после облучения получали внутрибрюшинную инъекцию инозина, отмечено повышенное количество жизнеспособных лимфоцитов – $83,64 \pm 3,13$ %, а также сниженное количество лимфоцитов на стадии раннего и позднего апоптоза $10,78 \pm 3,90$ и $4,58 \pm 1,22$ % по сравнению с группой облученных животных. Однако содержание клеток на стадии апоптоза и некроза оставалось повышенным по сравнению с группой животных без облучения. В группах животных, которым вводили раствор кобальта(II)инозината, отмечено снижение количества лимфоцитов на стадии раннего и позднего апоптоза до $8,94 \pm 2,74$ и $4,46 \pm 1,79$ % соответственно.

Заключение

Радиозащитную активность кобальт(II)инозината при внутрибрюшинном введении мышам линии C₅₇Bl/6 в дозе 45 мг/кг анализировали на двух уровнях: целого организма и клеточном. Результаты настоящего исследования позволяют предположить, что кобальт(II)инозинат обладает радиомодифицирующим действием, которое проявляется в снижении гено- и цитотоксического эффекта ионизирующего излучения, некоторой эритропоэтической активности и повышении выживаемости животных после острого облучения в сублетальных дозах. При внутрибрюшинном введении кобальт(II)инозината выживаемость мышей при облучении в дозе 7 Гр возросла практически на 30 % по сравнению с соответствующей группой облученных животных. Отмечено восстановление положительного прироста массы тела облученных животных при однократном внутрибрюшинном введении исследуемого соединения после облучения.

Не выявлено значимого влияния исследуемого соединения на восстановление клеточного состава лейкоцитов периферической крови животных через месяц после облучения в дозах 5 и 6 Гр. Однако отмечено снижение уровня апоптоза лимфоцитов периферической крови и полихроматофильных эритроцитов с микроядрами в костном мозге через 48 ч после облучения в дозе 1,5 Гр в группах животных, получавших инозин и кобальт(II)инозинат. Таким образом, полученные результаты указывают на возможность использования кобальт(II)инозината для коррекции последствий лучевого поражения у экспериментальных животных, а также на перспективность дальнейших исследований биологической активности данного соединения.

Библиографические ссылки

1. Бутомо НВ, Гребенюк АН, Легеза ВИ и др. *Основы медицинской радиобиологии*. Ушаков ИБ, редактор. Санкт-Петербург: Фолиант; 2004. с. 384.
2. Васин МВ. *Противолучевые лекарственные средства*. Москва: Государственный институт усовершенствования врачей Министерства обороны Российской Федерации; 2010. с. 180.

3. Гребенюк АН, Зацепин ВВ, Тимошевский АА. Принципы, средства и методы медицинской противорадиационной защиты. *Медицина катастроф*. 2007;59(3): 32–35.
4. Гудков СВ, Штаркман ИН, Смирнова ВС и др. Гуанозин и инозин как природные антиоксиданты и радиопротекторы для мышей при действии летальных доз γ -облучения. *Доклады Российской академии наук*. 2006;407(1):115–118.
5. Gudkov SV, Gudkova OY, Chernikov AV, Bruskov VI. Protection of mice against X-ray injuries by the post-irradiation administration of guanosine and inosine. *International Journal of Radiation Biology*. 2009;85(2):116–125. DOI: 10.1080/09553000802641144.
6. Азизов ИВ, Абдуллаев АС, Шамилов ЭН, Рзаева ИА. Влияние комплексов железа на формирование фотосинтетического аппарата и выхода генетических изменений у гамма-облученных семян пшеницы. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Медицина*. 2010;2(18):90–95.
7. Gasimova GE, Aghayeva AS, Abdullayev AS, Shamilov EN, Qahramanova ShI, Jalaladdinov FF. Synthesis and study of the radioprotective properties of a Co(II) complex of zinc with tryptophan. *Journal of Radiation Researches*. 2018;5(2): 241–246.
8. Schmid W. The micronucleus test. *Mutation research*. 1975;31(1):9–15. DOI: 10.1016/0165-1161(75)90058-8.
9. Shirazi A, Mihandoost E, Mohseni M, Ghazi-Khansari M, Rabie Mahdavi S. Radio-protective effects of melatonin against irradiation-induced oxidative damage in rat peripheral blood. *Physica Medica*. 2013;29(1):65–74. DOI:10.1016/j.ejmp.2011.11.007.

References

1. Butomo NV, Grebenjuk AN, Legeza VI, et al. *Osnovy medicinskoj radiobiologii* [Bases of medical radiobiology]. Ushakov IB, editor. Saint-Petersburg: Foliant; 2004. p. 384. Russian.
2. Vasin MV. *Protivoluchevye lekarstvennye sredstva* [Anti-radiation medicines]. Moscwa: State Institute for Advanced Medical Studies of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2010. p. 180. Russian.
3. Grebenjuk AN, Zacepin VV, Timoshevskij AA. *Principy, sredstva i metody medicinskoj protivoradiacionnoj zashhity* [Principles, means and methods of medical antiradiation protection]. *Medicina katastrof*. 2007;59(3):32–35. Russian.
4. Gudkov SV, Shtarkman IN, Smirnova VS, et al. *Guanozin i inozin kak prirodnye antioksidanty i radioprotektory dlja myshej pri dejstvii letal'nyh doz γ -obluchenija* [Guanosine and inosine as natural antioxidants and radioprotectors for mice exposed to lethal doses of γ -radiation]. *Doklady Rossijskoj akademii nauk*. 2006;407(1):115–118. Russian.
5. Gudkov SV, Gudkova OY, Chernikov AV, Bruskov VI. Protection of mice against X-ray injuries by the post-irradiation administration of guanosine and inosine. *International Journal of Radiation Biology*. 2009;85(2):116–125. DOI: 10.1080/09553000802641144.
6. Azizov IV, Abdullaev AS, Shamilov JeN, Rzaeva IA. *Vlijanie kompleksov zheleza na formirovanie fotosinteticheskogo apparata i vyhoda geneticheskikh izmenenij u gamma-obluchennyh semjan pshenicy* [Influence of complexes of iron on formation of the photosynthetic device and output of genetic variations at scale-irradiated of seeds of wheat]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Biologija. Medicina*. 2010;2(18):90–95. Russian.
7. Gasimova GE, Aghayeva AS, Abdullayev AS, Shamilov EN, Qahramanova ShI, Jalaladdinov FF. Synthesis and study of the radioprotective properties of a Co(II) complex of zinc with tryptophan. *Journal of Radiation Researches*. 2018;5(2):241–246.
8. Schmid W. The micronucleus test. *Mutation research*. 1975;31(1):9–15. DOI: 10.1016/0165-1161(75)90058-8.
9. Shirazi A, Mihandoost E, Mohseni M, Ghazi-Khansari M, Rabie Mahdavi S. Radio-protective effects of melatonin against irradiation-induced oxidative damage in rat peripheral blood. *Physica Medica*. 2013;29(1):65–74. DOI:10.1016/j.ejmp.2011.11.007.

Статья поступила в редакцию 03.12.2019.
Received by editorial board 03.12.2019.

УДК 621.039; 621.039.52

BENCHMARK EXPERIMENTS AT YALINA-THERMAL SUBCRITICAL ASSEMBLY

H. I. KIYAVITSKAYA^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daubhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

Description of the benchmark at the subcritical assembly YALINA-Thermal in the JIPNR-Sosny NAS of Belarus is presented at this paper. The results of the international benchmark in the frame of the IAEA* Research Contract and the International Science&Technology Center B-070 “Experimental and theoretical investigations of the peculiarities of transmutation of long-lived fission products and minor actinides in a subcritical uranium-polyethylene assembly driven by a neutron generator” are described in this work.

Key words: subcritical systems; benchmark; uranium-polyethylene assembly YALINA-Thermal; kinetic characteristics; neutron spectrum; nuclear fuel cycle; transmutation.

Acknowledgements. It is a great pleasure to thank the colleagues S. Sadovich, V. Bourmos, Ch. Rutkovskaya, Y. Fokov (JINPR-Sosny NAS of Belarus); Y. Gohar and A. Talamo (ANL, USA), W. Gudowski and C. Berglof (RIT, Sweden), C. Broders (KFZ, Germany) for the fruitful work in the ISTC Projects B-070, B-1341 and B-1732.

БЕНЧМАРК-ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ ЯЛИНА-ТЕПЛОВАЯ

А. И. КИЕВИЦКАЯ¹⁾

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

Настоящее исследование посвящено анализу реперного эксперимента (benchmark) на подкритической уран-полиэтиленовой сборке «ЯЛИНА-Тепловая» ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны НАН Беларуси». Представлены результаты международного бенчмарка, который проводился в рамках Исследовательского контракта МАГАТЭ и проекта Международного научно-технического центра В-070 «Экспериментальные и теоретические исследования особенностей трансмутации долгоживущих продуктов деления и минор-актинидов в подкритической сборке, управляемой генератором нейтронов».

Ключевые слова: подкритические системы; бенчмарк; уран-полиэтиленовая сборка «ЯЛИНА-Тепловая»; кинетические характеристики; спектр нейтронов; ядерный топливный цикл; трансмутация.

Благодарность. Выражаем признательность коллегам В. Бурносу, С. Садовичу, К. Рутковской, Ю. Фокову (ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны НАН Беларуси»), Й. Гохару и А. Таламо (Аргоннская национальная лаборатория, США), В. Гудовскому и К. Берглофу (КТИ, Швеция), К. Бродерсу (KFZ, Германия) за совместную плодотворную работу в проектах Международного научно-технического центра В-070, В-1341 и В-1732, по материалам которых подготовлена данная работа.

Образец цитирования:

Киевицкая АИ. Бенчмарк-эксперименты на подкритической сборке ЯЛИНА-тепловая. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2020;1:54–60. (На англ.).

For citation:

Kiyavitskaya HI. Benchmark experiments at YALINA-Thermal subcritical assembly. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2020;1:54–60.

Автор:

Анна Ивановна Киевицкая – доктор физико-математических наук; заведующий кафедрой ядерной и радиационной безопасности.

Author:

Hanna I. Kiyavitskaya, doctor of science (physics and mathematics); head of the department of nuclear and radiation safety.

Introduction

The world faces today the problem of growing energy demands in the world. Nuclear energy plays an important role in developed countries as a reliable energy source. Future nuclear power industry must be somewhat different, addressing increased safety consciousness and technological development, for example, by using closed nuclear fuel cycle, decreased volumes of radioactive waste, and other improvements. Such factors led to extensive investigation and development of fast reactors (GENERATION IV) and subcritical nuclear installations driven by external neutron sources (ADS) [1].

ADS may play an important role in future nuclear fuel cycles to reduce the long-term radio-toxicity and volume of spent nuclear fuel, to produce energy and incinerate radioactive waste [2; 3]. This technology was called Accelerator Driven Transmutation Technology (ADTT). The most important problems of this technology are monitoring of a reactivity level in on-line regime, a choice of neutron spectrum appropriate for incineration of Minor Actinides (MA) and transmutation of Long Lived Fission Products (LLFP) etc. Before designing and construction of an installation it is necessary to carry out R&D to get validated codes, nuclear data libraries and other instrumentations. IAEA had taken the initiative to start a set of benchmarks related to ADS [4]. In this work, the YALINA benchmark, as the part of the IAEA Coordinated Research Projects (CRPs) «*Analytical and Experimental Analysis of Accelerator Driven Systems*» is presented [5].

The benchmark was based on Yalina facility located in the Joint Institute for Power and Nuclear Research «Sosny» (Minsk, Belarus). This facility consists of neutron generator used as external neutron source and two different subcritical assemblies (Yalina Thermal and Yalina Booster) [6–9].

The main objective of this benchmark was to compare the results from different calculation methods, performed by different research institutes, with each other and with experimental data (when available). The detailed description of the benchmark was described at [5].

YALINA-Thermal benchmark description

The YALINA facility was designed, constructed and put into operation to study the ADS neutronics and to investigate the transmutation reaction rates of MA and LLFP in ADS [6–8]. It was put in operation in 2000. The benchmark was based on the Yalina-Thermal configurations (with different number of loaded fuel rods), which provides the opportunity to verify prediction capability of the different methods [5]. The experimental data have been received in the frame of the ISTC Projects #B070 «Experimental and theoretical research of the peculiarities of transmutation of long-lived fission products and minor actinides in a subcritical assembly driven by a neutron generator».

The YALINA-Thermal assembly consists of the core (uranium oxide fuel with 10% enrichment on ^{235}U placed in the polyethylene grid) surrounded by graphite reflector. Polyethylene grid allows changing the configuration of the core, loading different number of fuel rods.

The cross-section of YALINA-Thermal assembly is shown on fig. 1. There are three experimental channels in the core (EC1, EC2 and EC3) and three in the reflector (EC5, EC6 and EC7).

Three configurations of the YALINA-Thermal assembly (216, 245 and 280 fuel rods) were proposed for simulation in the frame of this benchmark [5]. The core loading is presented on fig. 2.

Detailed list of tasks for benchmarks can be found in the specification [5]. Below the general scope of tasks is provided:

1. Kinetic parameters: effective multiplication factor, source multiplication factor, mean neutron generation time, prompt neutron lifetime, mean neutron lifetime, effective delayed neutron fraction.
2. Neutron energy spectra in the experimental channels.
3. Axial (radial) distribution of different reaction rates: $^3\text{He}(n,p)$, $^{235}\text{U}(n,f)$, $^{115}\text{In}(n,\gamma)$, $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$, $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)$ in the experimental channels.

In this work kinetic parameters are presented. The complete list of participants provided of Yalina-Thermal benchmark is: Argentina, Belarus, India, Korea, Poland, Serbia, USA. The combination of codes and libraries of the different solutions is presented in the tabl 1.

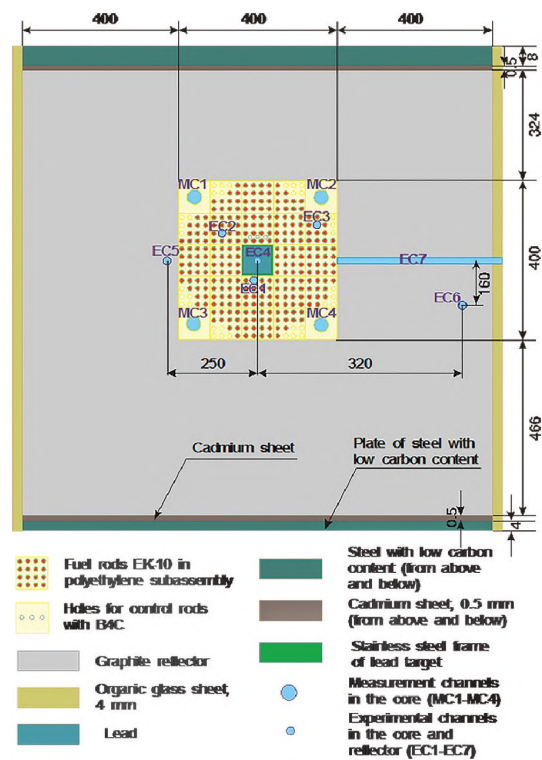


Fig. 1. The cross-section of YALINA-Thermal assembly

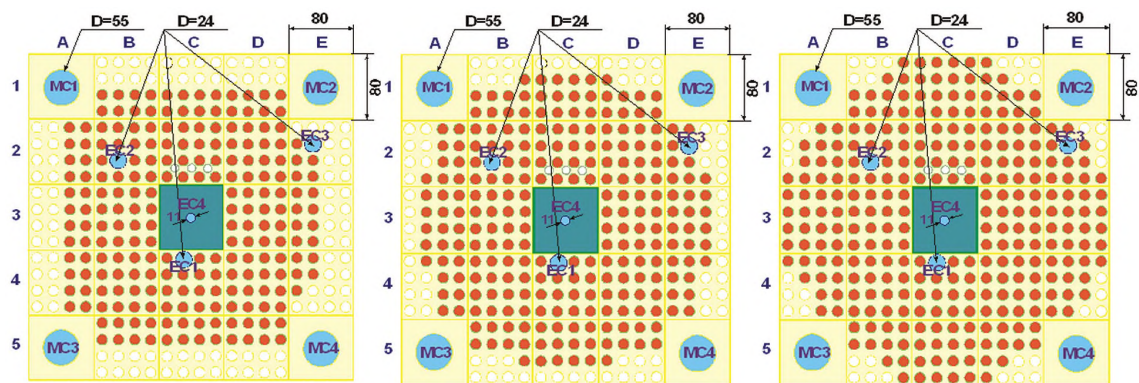


Fig. 2. YALINA-Thermal cores (with 216, 245 and 280 fuel rods) for benchmarking

Table 1

The Codes and the Libraries used in the Benchmark

			Libraries			
			ENDF/B			WINS
			VI.6	VI.8	VII.0	
codes	Deterministic	ERANOS				
		PARTISN				
		ATES3				
	Monte Carlo	McCARD				
		MCNP	4			
			5			
			X			

MCNP. The MCNP code is a general-purpose Monte Carlo N-Particle code that can be used for neutron, photon, electron, or coupled neutron/photon/electron transport, including the capability to calculate eigenvalues for critical systems. Different versions of this code were used by 10 teams of participants: MCNP4c, MCNP5, and MCNPX [10].

McCard. McCARD is a Monte Carlo (MC) neutron-photon transport simulation code designed by Seoul National University (SNU, Korea) exclusively for neutronics analyses of various nuclear reactor and fuel systems [11].

ERANOS. The European Reactor ANalysis Optimized calculation System, ERANOS, has been developed and validated with the aim of providing a suitable basis for reliable neutronic calculations of current as well as advanced fast reactor cores [12].

PARTISN. The PARTISN (PARallel, Time-Dependent SN) code package is a modular computer program package designed to solve the time-independent or dependent multigroup discrete ordinates form of the Boltzmann transport equation in several different geometries [13].

ATES3. The code ATES3 (Anisotropic Transport Equation Solver in 3D) had been developed in BARC (India) for the deterministic solution of 3-D steady-state neutron transport problems. The code makes use of advanced Krylov subspace based schemes for the solution [14].

Methodology used by participants

All the participants had to provide the theoretical approaches used for calculation (especially for kinetic parameters). In the MCNP codes k_{eff} value was calculated in KCODE mode as well as k_{prompt} .

The effective delayed neutron fraction in most Monte Carlo codes was calculated using following equation, proposed in [5]:

$$\beta_{eff} = \left(1 - \frac{k_p}{k_{eff}} \right). \quad (1)$$

The evaluation of neutron flux as function of time after the neutron pulse insertion is simulation of classical PNS experiment that is widely used in reactor physics and physics of subcritical systems. Analyzing evaluation of neutron flux in time, several techniques (area-ratio method, slope fitting method) can be applied for determination reactivity.

If the neutron pulse is injected in the subcritical core, the neutrons will multiply in the fuel in exponential decaying fission chain reaction. Using solution of the point kinetic equations it can be shown that the neutron flux after a neutron pulse can be represented as a constant plus one term with exponential time-dependence:

$$n(t) = n_0(\beta_{eff}\lambda' + \rho\alpha e^{\alpha t}), \quad (2)$$

where

$$\lambda' = \frac{\rho\lambda}{\rho - \beta_{eff}},$$

λ is the one-group delayed neutron precursor decay constant,

α is the prompt neutron decay constant given by

$$\alpha = \frac{\rho - \beta_{eff}}{\Lambda}. \quad (3)$$

By measuring the neutron flux after a pulse injection it is therefore possible to find the reactivity of the system by fitting an exponential function with a decay constant α to the slope.

Data comparison: kinetic parameters

The following parameters of a subcritical assembly (task 6 from [5]) were requested for calculation:

Effective multiplication factor, k_{eff} .

Source multiplication factor, k_s .

Mean neutron generation time, Λ .

Prompt neutron lifetime, l_p , and mean neutron lifetime, l .

Effective delayed neutron fraction, β_{eff} .

These parameters should allow testing the code and nuclear data library effects on the reactivity, kinetics and should also allow explaining differences observed in the following calculations. Fig. 3–4, tabl. 2 show the dependence of effective multiplication factor on the number of fuel rods obtained by the participants. The results for effective delayed neutron fraction are presented in tabl. 3 and fig. 5. Mean neutron generation time is shown on fig. 6.

Table 2

Participant	Code	Library	YALINA-Thermal configuration					
			216		245		280	
			value	err	value	err	Value	err
Argentina	MCNP 5	ENDF/B-VI.6	0,88048	0,00011	0,92049	0,00011	0,95962	0,00011
Belarus	MCNP 4c	ENDF/B-VI.6	0,87901	0,00006	0,92002	0,00006	0,96080	0,00006
Serbia	MCNP 5 1.2	ENDF/B-VI.6	0,88101	0,00016	0,92070	0,00016	0,95902	0,00015
USA	MCNPX	ENDF/B-VI.6	0,87914	0,00002	0,91916	0,00002	0,95836	0,00003
Poland	MCNP 5	ENDF/B-VI.8	0,87283	0,00100	0,91439	0,00100	0,95431	0,00090
USA	ERANOS	ENDF/B-VI.8			0,91348		0,95210	
USA	PARTISN	ENDF/B-VI.8	0,88004		0,91905		0,95830	
Korea	McCARD	ENDF/B-VII.0	0,89098	0,00007	0,93115	0,00007	0,96954	0,00007
India	ATES3	WINS	0,8934		0,9325		0,9702	
USA	ERANOS	JEF3.1			0,91550		0,95401	

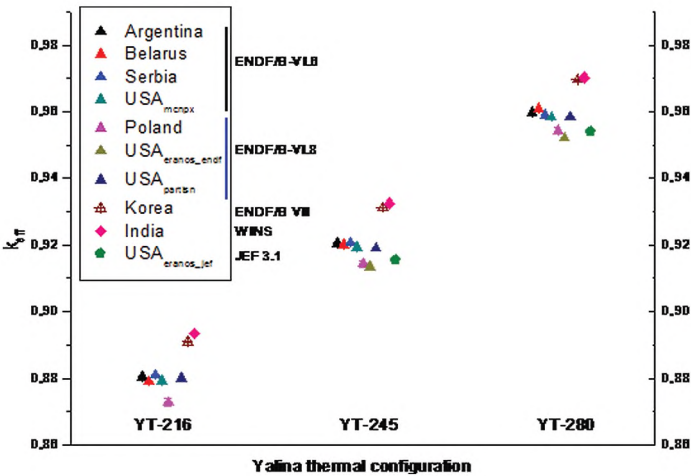


Fig. 3. Results of the calculations for keff by the participants grouped by cross section libraries

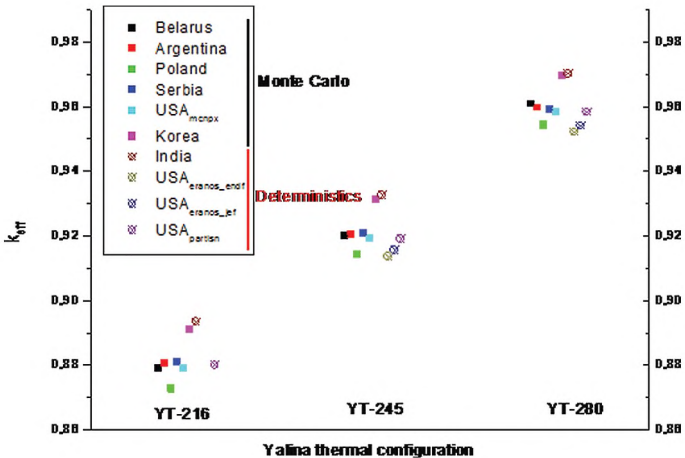


Fig. 4. Results for keff of the different solutions, grouped by simulation method

Table 3

Results for β_{eff} and λ of the different solutions

Laboratory	Code	Library	Yalina Thermal configuration											
			β_{eff}						Λ					
			216		245		280		216		245		280	
			value	err pcm	value	err pcm	value	err pcm	value	err pcm	value	err pcm	value	err pcm
Argentina	MCNP5	ENDF/B-VI.6	784	15	767	15	752	14	79	3	70	2	59	1
Belarus	MCNP4c	ENDF/B-VI.6												
India	ATES3	WINS												
Korea	McCARD	ENDF/B-VII.0	790	5	789	5	770	5	87	0.06	89	0.09	96	0.11
Poland	MCNP5	ENDF/B-VI.8	694		699		701							
Serbia	MCNP5 1.2	ENDF/B-VI.6	826	22	826	22	790	22	288,09	0,12	270,28	0,12	246,94	0,12
USA	ERANOS	ENDF/B-VI.8			788		779				88,1		87,5	
USA	ERANOS	JEF3.1			788		779				87,7		87,0	
USA	MCNPX	ENDF/B-VI.6	785	1,6	774	1,5	767	1,5	84,5		85,7		85,0	
USA	PARTISN	ENDF/B-VI.8	783		774		764		83,4		81,9		83,8	

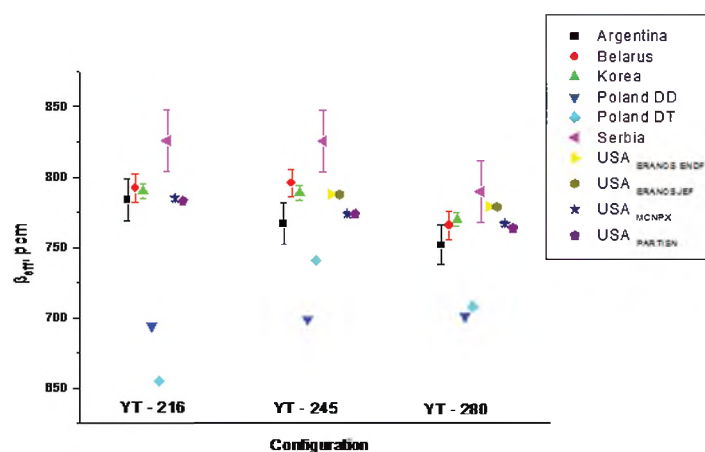


Fig. 5. β_{eff} for YALINA-Thermal assembly with different number of fuel rods

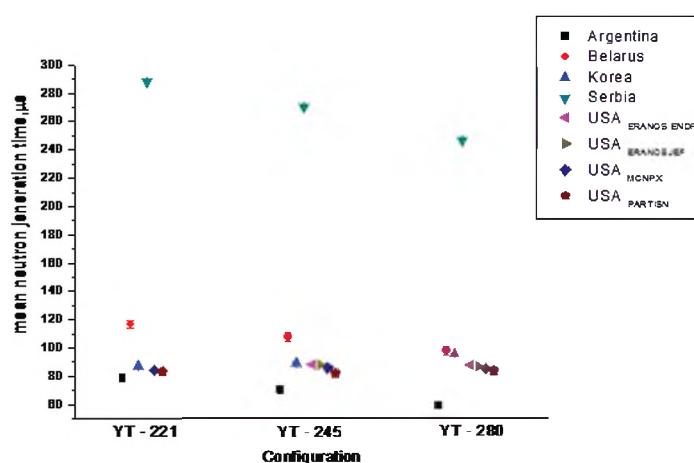


Fig. 6. Mean neutron generation time for YALINA-Thermal assembly with different number of fuel rods

In general it is not obvious any correlation between k_{eff} and used computer code or nuclear data library, but nevertheless some remarks can be done. Thus, for calculations with ENDF/B-VI library difference between minimum and maximum values is about 800 pcm comparing to about 2000 pcm for all libraries for Yalina-216 configuration. For Yalina-280 configuration these values are 650 pcm and 1800 pcm respectively. In consideration

of simulation method it can be noted that there is no any dependence on k_{eff} . But talking about MCNP code the difference between minimum and maximum values is 1800 pcm comparing to 2000 pcm for Yalina-216 configuration. For Yalina-280 configuration these values are 1500 and 1800 respectively.

The other tendency can be noted: the more criticality is the less difference between maximum and minimum value for configuration is.

Conclusions

Calculated results for YALINA-Thermal benchmark obtained from 8 participants were analyzed and compared with experiments (when available). This comparison can be very helpful in identifying the benefits and weak points of different simulation methodologies and nuclear data libraries.

At present time not all discrepancies in YALINA-Thermal benchmark can be explained. Due to lack of experimental data not all calculated results can be compared with experimental one. Additional comparisons between simulation data and experimental results would be certainly of a great interest.

Библиографические ссылки / References

1. Status of Fast Reactor Research and Technology Development: IAEA-TECDOC-1691. Vienna; 2012. 830 p.
2. OECD/NEA, Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles. In: *A Comparative Study*. [Place unknown]; 2002.
3. Salvatores M, et al. Long-lived, radioactive waste transmutation and the role of accelerator driven (hybrid) systems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1998;5(20).
4. Analytical and Experimental Benchmark Analyses of Accelerator Driven Systems. In: *Working Material, Research Coordinated Meeting of the Coordinated Research Project, 5–9 December 2005, Minsk, Belarus, IAEA-RC-1003.1, TWG-FR/127*. Vienna; 2006.
5. Kiyavitskaya H. (coordinator) YALINA-Booster Benchmark. Specifications for the IAEA Coordinated Research Projects on Analytical and Experimental Benchmark Analysis on Accelerator Driven Systems and Low Enriched Uranium Fuel Utilization in Accelerator Driven Sub-Critical Assembly Systems. [Internet]. IAEA. 2007. Available from: <http://www-nfcis.iaea.org>.
6. Chigrinov SE, et al. Booster Subcritical Assembly, Driven by a Neutron Generator (in Russian), JIPNR 14, Preprint of National Academy of Sciences of Belarus. Power and Minsk: Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny; 2004.
7. Kiyavitskaya H. The YALINA Experimental program YALINA to support the projects of the subcritical systems driven by external neutron sources. *Research and technology review national nuclear center of the Republic of Kazakhstan*. 2017;3:5–10.
8. Kiyavitskaya AI. Neutronics of Subcritical Systems: YALINA Facility [dissertation]. Minsk: Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus; 2017. 193 p.
9. Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development, IAEA TECDOC-1766. Vienna, 2015. p. 329.
10. Briesmeister JF, editor. MCNP – a general Monte Carlo n-particle transport code. Version 4 C: Technical Report LA-13709-M. Los Alamos: National Laboratory; 2000.
11. Shim HJ, Kim CH. Error Propagation Module Implementation in the MC-CARD Monte Carlo Code. *Transactions of the American Nuclear Society*. 2002;86.
12. Rimpault G, et al. The ERANOS Code and Data System for Fast Reactor Neutronic Analyses. *Proceedings International Conference PHYSOR 2002*, Seoul, Korea; 2002.
13. Anurag Gupta and R. S. Modak ATES3: Anisotropic Transport Equation Solver in 3D. In: *Proceedings Of 16th Annual Meeting of Indian Nuclear Society (INCAS-05)*. Mumbai, India; 2005.
14. Azmy YY. Communication Strategies for Angular Domain Decomposition of Transport Calculations on Message Passing Multi-processors. In: *Joint International Conference on Mathematical Methods and Supercomputing for Nuclear Applications, 1997 October 5–9, Saratoga Springs. New York*; 1997. Volume 1. p. 404.

Статья поступила в редакцию 30.01.2020.
Received by editorial board 30.01.2020.

УДК 575.117.5:575.113.2

РОЛЬ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ЗАВИСИМОСТИ: АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЛНОГЕНОМНОГО ПОИСКА АССОЦИАЦИЙ

Е. В. СНЫТКОВ¹⁾, В. Н. КИПЕНЬ²⁾, С. Б. МЕЛЬНОВ^{1, 3)}

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

²⁾Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь

³⁾Белорусский государственный университет физической культуры,
пр. Победителей, 105, 220020, г. Минск, Беларусь

Образец цитирования:

Снытков ЕВ, Кипень ВН, Мельнов СБ. Роль генетической компоненты в различных типах зависимости: анализ результатов полногеномного поиска ассоциаций. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;1:61–74.

For citation:

Snytkov EV, Kipen VN, Melnov SB. The role of genetic component in various types of addiction: the analysis of the results of genome-wide association studies. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;1:61–74. Russian.

Авторы:

Евгений Владимирович Снытков – преподаватель кафедры общей биологии и генетики.

Вячеслав Николаевич Кипень – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории генетической и клеточной инженерии.

Сергей Борисович Мельнов – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры экологической медицины и радиобиологии¹⁾, профессор кафедры анатомии³⁾.

Author:

Evgeny V. Snytkov, teacher at the department of general biology and genetics.

evsnytkov@gmail.com

Viachaslau N. Kipen, PhD (biology); researcher at the laboratory of genetic and cellular engineering.

v.kipen@igc.by

Sergey B. Melnov, doctor of science (biology), full professor, professor at the department of environmental medicine and radiobiology^{a)}, professor at the department of anatomy^{c)}.

Представлены результаты исследований, проведенных за 10 лет, полногеномного поиска ассоциаций (GWAS, genome-wide association studies), которые направлены на поиск генетических маркеров, ассоциированных с повышенным риском развития различных типов зависимости (алкоголизм, наркомания, табакокурение), патологической игровой зависимости и шизофрении. Для ряда заболеваний в своем этиопатогенезе имеются генетические маркеры с доказанной клинической значимостью: для алкогольной зависимости – гены *GABRA2*, *ADH1B*, *ADH1C*, *TAS2R16*, *HTR2A*; для наркотической зависимости – *OPRM1*, *OPRD1*; для никотиновой зависимости – *SLC6A3*, *GPR51*, *GPR51*, *CYP2A6*, *CHRNA4*; для шизофрении – *SCZD12*, *MTHFR*, *CHI3L1*, *DISC2*, *SYN2*, *DRD3* и др. Следовательно, открытие новых полиморфных вариантов, ассоциированных с тем или иным заболеванием, позволит обнаружить ранее не выявленные зависимости и закономерности. Результаты GWAS помогут установить возможные общие сигнальные пути в этиопатогенезе рассматриваемых в данном исследовании нозологий.

Ключевые слова: алкоголизм; табакокурение; игровая зависимость; наркотическая зависимость; шизофрения; генетика; геном; однонуклеотидный полиморфизм; полногеномный поиск ассоциаций.

THE ROLE OF GENETIC COMPONENT IN VARIOUS TYPES OF ADDICTION: THE ANALYSIS OF THE RESULTS OF GENOME-WIDE ASSOCIATION STUDIES

E. V. SNYTKOV^a, V. N. KIPEN^b, S. B. MELNOV^{a,c}

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarussian State University
23/1 Daihabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

^bInstitute of Genetics and Cytology, National Academy of Sciences of Belarus,
27, Akademichnaja Street, Minsk 220072, Belarus

^cThe Belarusian State University of Physical Culture,
105 Peramožcay Avenua, Minsk 220020, Belarus

Corresponding author: E. V. Snytkov (evsnytkov@gmail.com)

The article presents the analysis of the results of genome-wide association studies (GWAS), conducted over the past 10 years and aimed at finding genetic markers associated with increased risk of developing various types of addiction (alcoholism, drug addiction, smoking), pathological gambling and schizophrenia. For a number of diseases that have genetic markers with proven clinical significance in their etiopathogenesis: for alcohol dependence – *GABRA2*, *ADH1B*, *ADH1C*, *TAS2R16*, *HTR2A* genes; for drug addiction – *OPRM1*, *OPRD1* genes; for nicotine addiction – *SLC6A3*, *GPR51*, *GPR51*, *CYP2A6*, *CHRNA4* genes; for schizophrenia – *SCZD12*, *MTHFR*, *CHI3L1*, *DISC2*, *SYN2*, *DRD3* genes, the discovery of new polymorphic variants associated with a particular disease will allow us to identify previously not described dependencies and patterns. GWAS results will help identify possible common signaling pathways in the etiopathogenesis of the nosologies discussed in this study.

Key words: alcoholism; tobacco smoking; gambling; drug addiction; schizophrenia; genetics; genome; single nucleotide polymorphism; genome-wide association studies (GWAS).

Введение

Каждая болезнь (патологическое состояние) характеризуется определенным сочетанием генетических маркеров, а ее конкретные полиморфные варианты могут значимо модифицировать риск развития данного заболевания. Следует подчеркнуть, что для таких форм зависимости, как алкоголизм, наркомания и табакокурение, основной негативный (патогенетический) эффект ассоциирован с небольшим количеством генетических локусов. Однако для психических расстройств (патологическая игровая зависимость и шизофрения) такой подход не состоятелен ввиду не до конца выясненного патогенеза. Совокупный молекулярно-генетический анализ риск-ассоциированных локусов позволяет не только рассчитать вероятность развития того или иного социально значимого заболевания для конкретного пациента, но и персонифицировать подходы к лечению уже развившегося патологического состояния.

Разные популяции или этносы имеют свой специфический набор генотипов и аллелей, а также характеризуются определенным типом питания (диетой), образом жизни, влиянием экологических факторов различной этиологии. В этой связи результаты молекулярно-генетических исследований, касающихся ассоциации вариантов полиморфных локусов с многофакторными заболеваниями, полученные на одной популяции, далеко не всегда совпадают с результатами в других этнических группах. Соответственно, для выявления генетических факторов повышенного риска развития социально значимых заболеваний

целесообразно исследовать каждую популяцию в отдельности. Одним из важнейших результатов проекта 1000 Genomes Project (<http://www.internationalgenome.org/>) является то, что на уровне не только отдельных рас человека, но даже на популяционном уровне в пределах нескольких соседствующих государств, существуют значимые различия в частоте распространенности того или иного полиморфизма. Как правило, они оказываются наиболее выраженными для полиморфных вариантов, располагающихся в некодирующих участках ДНК. Для функционально значимых же полиморфных вариантов (например, отвечающих за изменение активности ферментов) различия носят менее выраженный характер. Но ввиду их влияния на изменение физиологического ответа конкретного пациента в пределах нормы реакции, тщательный анализ представляется наиболее актуальной задачей для целей персонализированной медицины.

Основную угрозу здоровью любой нации в XXI в. составляют так называемые социально значимые заболевания. Это широко распространенные и опасные для жизни, обусловленные социально-экономическими факторами болезни, вызванные неблагоприятной внешней средой (экологический), пристрастием в диете, традиционной кухней (алиментарный), планированием семейной жизни и традиционными взглядами на культуру табакокурения, употреблением спиртных напитков (социальный). К числу таких заболеваний относятся сердечно-сосудистые и онкологические, психические расстройства, расстройства поведения, алкоголизм, наркомания и т. д. Для психического расстройства и расстройства поведения вклад средовой и генетической компоненты не является равновесным, влияние каждой из них дополнительно может модифицироваться рядом сопутствующих факторов.

В данном исследовании уделяется внимание оценке существующего состояния проработки проблемы, связанной с наличием ассоциации генетических маркеров (в первую очередь – однонуклеотидного полиморфизма (ОНП), с повышенным риском развития различных типов зависимости (алкоголизм, наркомания, табакокурение), патологической игровой зависимости и шизофрении. В работе приведены данные, полученные рядом ученых с использованием новейших технологий массового параллельного секвенирования (next-generation sequencing, NGS), а также результаты исследований полногеномного поиска ассоциаций (Genome-Wide Association Studies, GWAS).

Таким образом, цель настоящей работы – проанализировать имеющиеся в научной литературе результаты GWAS, относящиеся к поиску генетических локусов, ассоциированных с повышенным риском развития зависимостей (аддикций) различной этиологии (алкоголизм, наркомания, табакокурение), патологической игровой зависимости (гемблинга) и шизофрении. Так как результатов исследований по типу GWAS накоплено достаточно много (имеются специализированные базы данных, например, The NHGRI-EBI Catalog of published genome-wide association studies, <https://www.ebi.ac.uk/gwas/>), а также учитывая наличие межпопуляционных и этнографических особенностей в частоте распространенности того или иного однонуклеотидного полиморфизма (ОНП), нами отобраны только те генетические маркеры, которые соответствовали следующим критериям: нижняя граница 95 % доверительного интервала (ДИ) для значения ОШ (отношение шансов) $\geq 1,0$; значение уровня статистической значимости ассоциации локуса с заболеванием на уровне генома – $p \leq 1,00E-06$; пациенты из основной группы исследования – выходцы из Европы, Северной Америки или Австралии (представители только европеоидной расы).

Материалы и методы исследования

Генетические маркеры, ассоциированные с повышенным риском развития предрасположенности к алкогольной зависимости. Алкогольная зависимость (алкоголизм) – комплекс поведенческих, познавательных и физиологических симптомов, который возникает после повторного использования алкоголя и обычно включает сильное желание принять его снова; трудности в контроле употребления алкоголя; упорное продолжение его использования, несмотря на пагубные последствия; предпочтение употребления алкоголя в ущерб другим видам деятельности и выполнению обязанностей; возрастание допустимых пределов употребления, а иногда состояние абстиненции (МКБ-10, F10.2).

Известно, что алкоголизм (OMIM [Online Mendelian Inheritance in Man, <http://omim.org>] ID – 103780) является мультифакториальным, генетически предрасположенным заболеванием. Так, в исследовании Goodwin D., et al. было отмечено, что для усыновленных в разных семьях родных братьев алкогольная культура в большей степени соответствовала алкогольной культуре биологических, а не приемных родителей [1]. При хроническом употреблении алкоголя наблюдаются специфические деструктивные изменения некоторых внутренних органов. Например, для таких пациентов показана высокая частота встречаемости кардиомиопатий, цирроза печени, панкреатита и др. (синдром Вернике–Корсакова [2], сочетанный с гиперлипидемией V типа панкреатит [3]).

Хроническое употребление алкоголя может привести к наркомании, которая ассоциирована с поведенческими реакциями и ремоделированием нейронов [17]. Алкоголь является фактором риска развития по меньшей мере шести типов рака (рак печени, толстой кишки, прямой кишки, полости рта, гортани и пи-

щевода), а в возрасте полового созревания – один из факторов повышенного риска развития рака молочной железы у женщин [18].

В 2000–2015 гг. уровень заболеваемости алкоголизмом в Республике Беларусь вырос на 29,2 % (с 152,2 до 196,6 чел. на 100 тыс. населения), уровень распространенности алкоголизма вырос в 1,5 раза (с 1364,4 до 2038,1 чел. на 100 тыс. населения) [19].

С 2009 г. в мире проведено более 30 исследований GWA (genome-wide association), посвященных поиску ассоциированных с повышенным риском развития алкоголизма ОНП, на уровне генома (<https://www.ebi.ac.uk/gwas>). Результаты данных исследований, с учетом ранее обозначенных критериев отбора ОНП, отражены в табл. 1.

Таблица 1

Полиморфные варианты, ассоциированные с повышенным риском развития алкогольной зависимости

Table 1

Polymorphic variants associated with an increased risk of developing alcohol dependence

rs ID ¹	Хромосомная позиция	Ген (NCBI Gene ID ²)	Участие в сигнальных путях (KEGG pathway ID ³)	p-уровень	Ссылка
rs7590720	2:216033935	Peroxisomal Trans-2-Enoyl-CoA Reductase, <i>PECR</i> , (55825)	Биосинтез ненасыщенных жирных кислот – Biosynthesis of unsaturated fatty acids (map01040)	1,00E-08	[20]
rs1109501	4:70463773	Mucin 7 secreted, <i>MUC7</i> , (4589)	Слюнная секреция – Salivary secretion (map04970)	5,00E-06	[21]
rs1864982	5:146941260	Protein Phosphatase 2 Regulatory Subunit B beta, <i>PPP2R2B</i> , (5521)	Адренергическая сигнализация в кардиомиоцитах – Adrenergic signaling in cardiomyocytes (map04261)	3,00E-06	[20]
rs6902771	6:151836746	Estrogen Receptor 1, <i>ESR1</i> (2099)	Эндокринная устойчивость – Endocrine resistance (map01522)	8,00E-06	
rs237238	7:75582098	Huntingtin Interacting Protein 1, <i>HIP1</i> (3092)	Сигнальный путь цАМФ – cAMP signaling pathway (map04024)	7,00E-06	[21]
rs10908907	9:89634669	–	–	6,00E-06	
rs768048	18:52759028	Deleted In Colorectal Carcinoma, <i>DCC</i> , (1630)	Колоректальный рак – Colorectal cancer (map05210)	8,00E-06	
rs4293630	21:46025877	–	–	7,00E-06	
rs12388359	X:10263651	–	–	4,00E-06	[20]

¹ID локуса в базе dbSNP (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/snp>).

²ID гена в базе NCBI Gene (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/gene>).

³ID сигнального пути в базе KEGG: Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (<http://www.genome.jp/kegg/pathway>).

Генетические маркеры, ассоциированные с повышенным риском развития никотиновой зависимости. Никотиновая зависимость (табакокурение) – комплекс поведенческих, познавательных и физиологических симптомов, который возникает после повторного использования табака и обычно включает сильное желание принять его повторно; трудности в контроле употребления табака; упорное продолжение его использования, несмотря на пагубные последствия; предпочтение употребления табака в ущерб другим видам деятельности и выполнению обязанностей; возрастание допустимых пределов употребления, а иногда состояние абстиненции (МКБ-10, F17.2).

В развитии никотиновой зависимости (OMIM ID – 188890) показано наличие как средовой, так и генетической компоненты [4; 5; 6]. Важная причина ее возникновения – это повышенный уровень стресса (современный ритм жизни крайне высок, связан с повышенным уровнем беспокойства и нервозностью). Доказательство наличия генетического вклада в развитие никотиновой зависимости было выявлено в исследовании [7], а также в мета-анализе, включающем результаты исследования более 1000 пар близнецов [8].

Многие вещества в табачном дыме вызывают химические реакции в нервных окончаниях, приводящие к усилению сердечного ритма, повышенной возбудимости. В результате этих процессов происходит высвобождение дофамина и эндорфинов, что вызывает эмоциональное удовлетворение у курящего.

По данным Министерства статистики и анализа Республики Беларусь, в стране курят 54,4 % мужчин. В возрасте 30–39 лет количество курящих составляет 64,8 % у мужчин и 14,9 % – у женщин. В возрасте 14–17 лет курящие составляют 34,2 %.

С 2006 г. в мире проведено 12 исследований GWA, посвященных поиску ассоциированных с повышенным риском развития никотиновой зависимости ОНП, на уровне генома (<https://www.ebi.ac.uk/gwas>). Результаты данных исследований, с учетом ранее обозначенных критериев отбора ОНП, отражены в табл. 2.

Таблица 2

Полиморфные варианты, ассоциированные с повышенным риском развития никотиновой зависимости

Table 2

Polymorphic variants associated with an increased risk of nicotine addiction

rs ID ¹	Хромосомная позиция	Ген (NCBI Gene ID ²)	Участие в сигнальных путях (KEGG pathway ID ³)	p-уровень	Ссылка
rs34684276	15:78520813	Hydroxyllysine Kinase, <i>HYKK</i> (123688)	Катализирует GTP-зависимое фосфорилирование 5-гидрокси-L-лизина – catalyzes the GTP-dependent phosphorylation of 5-hydroxy-L-lysine.	4,00E-17	[22]
rs2273500	20:63355597	Cholinergic Receptor Nicotinic Alpha 4 Subunit, <i>CHRNA4</i> (1137)	Нейроактивное взаимодействие лиганд-рецептор – Neuroactive ligand-receptor interaction (map04080)	8,00E-09	

¹ID локуса в базе dbSNP (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/snp>).

²ID гена в базе NCBI Gene (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/gene>).

³ID сигнального пути в базе KEGG: Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (<http://www.genome.jp/kegg/pathway>).

Генетические маркеры, ассоциированные с повышенным риском развития наркотической зависимости. Наркотическая зависимость (наркомания) – заболевание, вызванное употреблением наркотических веществ (МКБ-10, Z72.2). Это хроническое, часто рецидивирующее заболевание мозга, которое провоцирует компульсивный поиск и употребление наркотических веществ. Оно приводит к изменениям в структуре и функции мозга, что наносит ущерб самоконтролю, способности человека принимать самостоятельные и обоснованные решения.

Наркотическая зависимость (OMIM ID – 610064, 600018) характеризуется компульсивностью к наркотикам, которая наносит непоправимый физический и психологический ущерб человеку. Зачастую она, как и табакокурение или алкоголизм, является результатом неспособности индивида адаптироваться к постоянному воздействию стрессов различной природы. Вклад генетического фактора в развитие данной патологии изучается в [9]. В ряде исследований было показано, что в раннем подростковом возрасте начало табакокурения, употребление алкоголя и наркотических веществ связано в большей степени с семейными и социальными факторами, значимость которых постепенно снижается при взрослении человека – во взрослом возрасте максимальный вклад в устойчивость (или предрасположенность) организма к данным факторам начинает вносить именно генетическая компонента [10].

Наркомания может вызвать серьезные долгосрочные последствия, включая проблемы с физическим и психическим здоровьем, межличностными отношениями, трудовой занятостью и законом. В большинстве развитых и развивающихся стран употребление и распространение наркотических веществ запрещено на правовом уровне.

В Республике Беларусь на начало 2015 г. под наблюдением врачей психиатров-наркологов находилось более 15 тыс. чел. (162,6 на 100 тыс. населения). По данным Министерства здравоохранения Республики Беларусь, среди употребляемых наркотических средств в 57,7 % остаются вещества опиоидной природы,

каннабис – в 16,1 %, героин – в 2,5 %, психостимуляторы – в 4,1 % случаях. Среди потребителей наркотических средств лица до 18 лет составляют 8,8 %, с 19 до 25 лет – 28,6 %, старше 30 лет – 62,6 %.

С 2006 г. в мире проведено более 20 GWA-исследований, посвященных поиску ассоциированных с повышенным риском развития наркотической зависимости ОНП, на уровне генома (<https://www.ebi.ac.uk/gwas>). Результаты данных исследований, с учетом ранее обозначенных критериев отбора ОНП, отражены в табл. 3.

Таблица 3

Полиморфные варианты, ассоциированные с повышенным риском развития наркотической зависимости

Table 3

Polymorphic variants associated with an increased risk of drug addiction

rs ID ¹	Хромосомная позиция	Ген (NCBI Gene ID ²)	Участие в сигнальных путях (KEGG pathway ID ³)	p-уровень	Ссылка
rs2377339	2:105840835	Growth Factor Receptor-Bound Protein 4, <i>NCK2</i> (8440)	Аксонное управление – Axon guidance (map04360)	1,00E-11	[24]
rs9829896	3:20135980	Lysine Acetyltransferase 2B, <i>KAT2B</i> (8850)	Сигнальный путь Notch – Notch signaling pathway (hsa04330)	4,00E-10	[25]
rs9458975	6:157968709	–	–	7,00E-06	[23]
rs9900808	17:13159478	–	–	2,00E-06	

¹ID локуса в базе dbSNP (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/snp>)

²ID гена в базе NCBI Gene (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/gene>)

³ID сигнального пути в базе KEGG: Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (<http://www.genome.jp/kegg/pathway>)

Генетические маркеры, ассоциированные с повышенным риском развития патологической игровой зависимости. Патологическое влечение к азартным играм (патологический гемблинг) – это импульсное расстройство контроля поведения, которое рассматривается как поведенческая зависимость. Его суть заключается в частых повторных эпизодах азартной игры, которые доминируют в жизни пациента в ущерб социальным, профессиональным, материальным и семейным ценностям и обязательствам [МКБ-10]. В МКБ-10 патологическая игровая зависимость (гемблинг) не выделяется в самостоятельную рубрику и может быть отнесена в раздел F 63.8 «Другие расстройства привычек и влечений», однако унифицированных критериев, классификации и конкретного определения новых форм зависимого поведения на данный момент не существует.

Патологическая игровая зависимость (патологический гемблинг, англ. pathological gambling, OMIM ID – 606349) определяется как хроническая, прогрессирующая неспособность противостоять импульсам к началу игровой деятельности различного рода: азартные, компьютерные игры и др. Показано, что в развитие данной зависимости, как и в случае с другими аддикциями, вносят свой вклад средовые и генетические факторы [11]. Лица, склонные к патологической игровой зависимости, чаще всего являются мужчинами в возрасте 18–30 лет с низким социальным статусом, относительно невысоким фиксированным доходом и ограниченными перспективами карьерного роста [12]. На вклад генетического фактора в развитие патологического гемблинга указывают наблюдения за пациентами с болезнью Паркинсона, которые начали активную игровую деятельность после лечения дофаминергическими агонистами. Таким образом, был сделан вывод об участии генов дофаминовой системы в развитии данной патологии [13].

Широкая информатизация населения, неограниченный доступ в мировую паутину имеют не только позитивное значение, но и несут ряд скрытых угроз, к числу которых следует отнести игровую зависимость. Такие игровые жанры, как массовая многопользовательская ролевая онлайн-игра (Massively multiplayer online role-playing game, MMORPG), онлайн-шутеры и др. втягивают миллионы людей, а существующие варианты онлайн-казино и карточных игр способствуют развитию патологической зависимости от азартных игр у широких масс населения.

В научной литературе приводятся данные, которые свидетельствуют, что 6–9 % молодых людей сталкиваются с проблемами, связанными с азартными играми, а это является более высоким показателем по сравнению со взрослым населением.

С 2011 г. в мире проведено два GWAS, посвященных поиску ассоциированных с повышенным риском развития патологической игровой зависимости ОНП, на уровне генома (<https://www.ebi.ac.uk/gwas>). Результаты данных исследований, с учетом ранее обозначенных критериев отбора ОНП, отражены в табл. 4.

Таблица 4

Полиморфные варианты, ассоциированные с повышенным риском развития патологической игровой зависимости

Table 4

Polymorphic variants associated with an increased risk of pathological gambling developing

rs ID ¹	Хромосомная позиция	Ген (NCBI Gene ID ²)	Участие в сигнальных путях (KEGG pathway ID ³)	p-уровень	Ссылка
rs7591351	2:45836267	Protein Kinase C Epsilon, <i>PRKCE</i> (5581)	Медиаторное регулирование воспалительного канала TRP – Inflammatory mediator regulation of TRP channels (map04750)	6.00E-06	[26]
rs3943418	16:17243867	Xylosyltransferase 1, <i>XYLT1</i> (64131)	Биосинтез гликозаминогликана - хондроитинсульфат / дерматансульфат – Glycosaminoglycan biosynthesis - chondroitin sulfate/dermatan sulfate (map00532)	7.00E-06	
rs6065904	20:45906012	Phospholipid Transfer Protein, <i>PLTP</i> (5360)	Сигнальный путь PPAR – PPAR signaling pathway (map03320)	1.00E-06	

¹ID локуса в базе dbSNP (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/snp>).

²ID гена в базе NCBI Gene (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/gene>).

³ID сигнального пути в базе KEGG: Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (<http://www.genome.jp/kegg/pathway>).

Генетические маркеры, ассоциированные с повышенным риском развития шизофрении. Шизофренические расстройства обычно характеризуются существенными и характерными искажениями мышления и восприятия, а также неадекватными аффектами. Ясное сознание и интеллектуальные способности обычно сохраняются, хотя с течением времени может иметь место определенное снижение познавательных способностей (МКБ-10, F20).

Шизофрения (OMIM ID – 181500) – это психическое расстройство, характеризующееся нарушением мыслительного процесса, когнитивной функции, которое оказывает влияние на эмоциональное состояние пациента. Доказано, что данная патология имеет наследственную составляющую, однако реализация ее на уровне генома носит крайне сложный характер. Множественные исследования продемонстрировали, что риск развития шизофрении для родственников пробанда с данной патологией выше, чем в условиях ее отсутствия [14]. Следует отметить, что вклад генетического фактора в развитие шизофрении был выявлен и при исследовании близнецовых пар [15]. К факторам окружающей среды, связанным с шизофренией, относят употребление наркотиков, пренатальные стрессоры (например, материнский стресс во время беременности [16]), и в меньшей степени – влияние неблагоприятных условий окружающей среды.

Шизофрения – серьезное когнитивное расстройство. В ее патологии участвуют механизмы экспрессии генов, цитоскелетная организация, нейротрансмиттерные системы и т. д. Для шизофрении показано наличие выраженной генетической составляющей [27]. Она, как правило, поражает лиц обоих полов одинаково часто, но у мужчин обычно начинается раньше – в 20–28 лет, и у женщин – в 26–32 года. В детском возрасте развивается редко, распространена примерно у 4 человек на 1000 населения с одинаковой частотой во всем мире [28].

В Республике Беларусь в структуре первичной заболеваемости психическими расстройствами доля пограничных нервно-психических расстройств выросла с 78,3 % в 2002 г. до 83,9 % в 2013 г. В то же время уменьшилась доля впервые выявленных пациентов с шизофренией – с 2,2 до 1,0 %.

С 2007 г. в мире проведено более 100 GWAS, посвященных поиску ассоциированных с повышенным риском развития шизофрении ОНП на уровне генома (<https://www.ebi.ac.uk/gwas>). Результаты данных исследований, с учетом ранее обозначенных критериев отбора ОНП, отражены в табл. 5.

Полиморфные варианты, ассоциированные с повышенным риском развития шизофрении

Table 5

Polymorphic variants associated with an increased risk of schizophrenia

rs ID ¹	Хромосомная позиция	Ген (NCBI Gene ID ²)	Участие в сигнальных путях (KEGG pathway ID ³)	p-уровень	Ссылка
rs14403	1:243500591	AKT Serine/Threonine Kinase 3, <i>AKT3</i> (10000)	Долгосрочный регулирующий путь – Longevity regulating pathway (map04211)	2.00E-08	[34]
rs4648845	1:2455662	Phospholipase C Eta 2, <i>PLCH2</i> (9651)	Инозитолфосфатный обмен – Inositol phosphate metabolism (map00562)	9.00E-10	[31]
rs11210892	1:43634413	–	Молекулы адгезии клеток – Cell adhesion molecules, CAMs (map04514)	3.00E-10	
rs2252865	1:8362616	Arginine-Glutamic Acid Dipeptide Repeats, <i>RERE</i> (473)	Фокальная адгезия – Focal adhesion (map04510)	3.00E-06	[33]
rs1702294	1:98036428	MicroRNA 137 Host Gene, <i>MIR137HG</i> (400765)	–	3.00E-19	[31]
rs1625579	1:98037378			2.00E-11	[33]
rs12991836	2:144383974	Zinc Finger E-Box Binding Homeobox 2, <i>ZEB2</i> (9839)	МикроРНК при раке – MicroRNAs in cancer (map05206)	1.00E-08	[34]
rs2909457	2:161989345	–	Расщепление и абсорбция белка – Protein digestion and absorption (map04974)	5.00E-08	[31]
rs6434928	2:197439853	–	Сплайсососма – Spliceosome (map03040)	2.00E-11	
rs11685299	2:224526579	Cullin 3, <i>CUL3</i> (8452)	Путь передачи сигналов Hedgehog – Hedgehog signaling pathway (map04340)	1.00E-08	
rs13025591	2:235886699	ArfGAP With GTPase Domain. Ankyrin Repeat And PH, <i>AGAP1</i> (116987)	Эндоцитоз – Endocytosis (map04144)	6.00E-06	[33]
rs3768644	2:72134376	Cytochrome P450 Family 26 Subfamily B Member 1, <i>CYP26B1</i> (232174)	Метаболизм ретинола – Retinol metabolism (map00830)	7.00E-09	[31]
rs7432375	3:136569563	Stromal Antigen 1, <i>STAG1</i> (10274)	Клеточный цикл – Cell cycle (map04110)	7.00E-11	
rs9841616	3:181449797	SOX2 Overlapping Transcript, <i>SOX2-OT</i> (347689)	–	2.00E-08	
rs832187	3:63847374	Functional Spliceosome-Associated Protein 24, <i>THOC7</i> (80145)	Транспорт РНК – RNA transport (map03013)	1.00E-08	
rs35518360	4:102225733	–	–	8.00E-15	
rs4388249	5:109700365	Mannosidase Alpha Class 2A Member 1, <i>MAN2A1</i> (4124)	Биосинтез N-гликанов – N-Glycan biosynthesis (map00510)	3.00E-08	
rs3849046	5:138515503	Eukaryotic Translation Termination Factor 1, <i>ETF1</i> (2107)	Путь контроля мРНК – mRNA surveillance pathway (map03015)	5.00E-09	
rs111294930	5:152797561	Long Intergenic Non-Protein Coding RNA 1470, <i>LINC01470</i> (101927134)	–	1.00E-10	

Продолжение табл. 5

Continuation table 5

rs ID ¹	Хромосомная позиция	Ген (NCBI Gene ID ²)	Участие в сигнальных путях (KEGG pathway ID ³)	p-уровень	Ссылка
rs2910032	5:153160794	–	–	4.00E-08	[34]
rs17504622	5:153274919	–	–	3.00E-09	
rs11740474	5:154301187	Polypeptide N-Acetylgalactosaminyltransferase 10, <i>GALNT10</i> (55568)	Биосинтез О-гликана муцинового типа – Mucin type O-glycan biosynthesis (map00512)	3.00E-08	[31]
rs16867576	5:89450514	MEF2C Antisense RNA 1, <i>MEF2C-AS1</i> (101929423)	–	5.00E-09	[31]
rs115329265	6:28744470	–	–	3.00E-31	[31]
rs114002140	6:32464185	–	–	9.00E-14	[34]
rs4530903	6:32614112	–	–	5.00E-06	[30]
rs1339227	6:72445999	–	–	3.00E-08	[31]
rs117074560	6:96011775	uncharacterized LOC107986626, LOC107986626 (107986626)	–	2.00E-09	
rs211829	7:110408836	uncharacterized LOC105375451, LOC105375451 (105375451)	–	4.00E-08	
rs13240464	7:111258859	Inner Mitochondrial Membrane Peptidase Subunit 2, <i>IMMP2L</i> (83943)	Экспорт протеинов – Protein export (map03060)	3.00E-13	
rs3735025	7:137390098	Diacylglycerol Kinase Iota, <i>DGKI</i> (9162)	Вирусная инфекция Эпштейна–Барра – Epstein-Barr virus infection (map05169)	3.00E-09	
rs6461049	7:1977810	Mitotic Arrest Deficient 1-Like Protein 1, <i>MAD1L1</i> (8379)	Клеточный цикл – Cell cycle (map04110)	6.00E-13	[34]
rs12704290	7:86798310	Glutamate Metabotropic Receptor 3, <i>GRM3</i> (2913)	Глутаматергический синапс – Glutamatergic synapse (map04724)	3.00E-10	[31]
rs73229090	8:27584610	epoxide hydrolase 2, <i>EPHX2</i> (2053)	Метаболизм арахидоновой кислоты – Arachidonic acid metabolism (hsa00590), пероксисома – peroxisome (hsa04146)	2.00E-08	
rs6984242	8:59787910	–	–	6.00E-09	
rs7819570	8:88576397	uncharacterized LOC105375629, LOC105375629 (105375629)	–	1.00E-08	
rs11995572	8:88579854	–	–	3.00E-08	[34]
rs7085104	10:102869116	Arsenite Methyltransferase, <i>AS3MT</i> (57412)	–	4.00E-13	
rs11191580	10:103146454	5'-Nucleotidase, Cytosolic II, <i>NT5C2</i> (22978)	Метаболизм – Metabolic pathways (map01100)	3.00E-08	[33]
rs17691888	10:18445599	Calcium Voltage-Gated Channel Auxiliary Subunit Beta 2, <i>CACNB2</i> (783)	Сигнальный путь MAPK – MAPK signaling pathway (map04010)	1.00E-10	[34]
rs7893279	10:18456176			2.00E-12	[31]
rs16915157	10:60586880	Ankyrin 3, <i>ANK3</i> (288)	Биосинтез пантотената и CoA – Pantothenate and CoA biosynthesis (map00770)	5.00E-06	[33]
rs2514218	11:113522272	–	–	3.00E-11	[31]

rs ID ¹	Хромосомная позиция	Ген (NCBI Gene ID ²)	Участие в сигнальных путях (KEGG pathway ID ³)	p-уровень	Ссылка
rs548181	11:125591814	STT3A Antisense RNA 1, <i>STT3A-AS1</i> (105369550)	–	1.00E-06	[33]
rs4356203	11:17138601	Phosphatidylinositol-4-Phosphate 3-Kinase Catalytic Subunit Type 2 Alpha, <i>PIK3C2A</i> (5286)	Сигнальная система фосфатидилинозитола – Phosphatidylinositol signaling system (map04070)	1.00E-07	
rs4766428	12:110285440	ATPase Sarcoplasmic/Endoplasmic Reticulum Ca ²⁺ Transporting 1, <i>ATP2A2</i> (488)	Путь передачи кальция – Calcium signaling pathway (map04020)	1.00E-09	[31]
rs2007044	12:2235794	Calcium Voltage-Gated Channel Subunit Alpha 1 C, <i>CACNA1C</i> (775)	Сигнальный путь MAPK – MAPK signaling pathway (map04010)	3.00E-18	[31]
rs1006737	12:2236129			5.00E-12	[34]
rs4765905	12:2240418			2.00E-06	[33]
rs12826178	12:57228588	Serine Hydroxymethyltransferase 2, <i>SHMT2</i> (6472)	Углеродный обмен – Carbon metabolism (map01200)	2.00E-12	[3]
rs2068012	14:29721110	Protein Kinase D1, <i>PRKD1</i> (5587)	Сигнальный путь Rap1 – Rap1 signaling pathway (map04015)	1.00E-08	
rs2693698	14:99252882	Radiation-Induced Tumor Suppressor Gene 1 Protein, <i>BCL11B</i> (64919)	Нарушение транскрипции при раке – Transcriptional misregulation in cancer (map05202)	5.00E-09	
rs56205728	15:40275036	BUB1B-PAK6 Readthrough, <i>BUB1B-PAK6</i> (106821730)	–	4.00E-09	
rs1869901	15:40303426	Phospholipase C Beta 2, <i>PLCB2</i> (5330)	Сигнальная система фосфатидилинозитола – Phosphatidylinositol signaling system (map04070)	3.00E-06	[33]
rs8042374	15:78615690	Cholinergic Receptor Nicotinic Alpha 3 Subunit, <i>CHRNA3</i> (1136)	Нейроактивное взаимодействие лиганд-рецептор – Neuroactive ligand-receptor interaction (map04080)	2.00E-13	[31]
rs4702	15:90883330	Paired Basic Amino Acid Residue-Cleaving Enzyme, <i>FURIN</i> (5045)	Грипп А – Influenza A (map05164)	8.00E-14	
rs7405404	16:13656002	–	–	1.00E-09	
rs8044995	16:68155437	Nuclear Factor Of Activated T-Cells 3, <i>NFATC3</i> (4775)	Сигнальный путь MAPK – MAPK signaling pathway (map04010)	2.00E-08	[31]
rs9922678	16:9852462	Glutamate Ionotropic Receptor NMDA Type Subunit 2A, <i>GRIN2A</i> (2903)	Нейроактивное взаимодействие лиганд-рецептор – Neuroactive ligand-receptor interaction (map04080)	1.00E-08	[31]
rs4523957	17:2305605	Serine Racemase, <i>SRR</i> (63826)	Сигнальные пути, регулирующие плюрипотентность стволовых клеток – Signaling pathways regulating pluripotency of stem cells (map04550)	3.00E-10	
rs4523957	17:2305605			6.00E-08	[34]

rs ID ¹	Хромосомная позиция	Ген (NCBI Gene ID ²)	Участие в сигнальных путях (KEGG pathway ID ³)	p-уровень	Ссылка
rs4798896	18:78152922	–	–	4.00E-06	[30]
rs7267348	20:49514499	Prostaglandin I2 Synthase, <i>PTGIS</i> (5740)	Синтез арахидоновой кислоты – Arachidonic acid metabolism (map00590)	5.00E-08	[31]
rs9611198	22:39559868	–	–	8.00E-06	[32]
rs9607782	22:41191552	EP300 antisense RNA 1, <i>EP300-ASI</i> (101927279)	–	2.00E-11	[31]
rs4129148	X:1029445	–	–	4.00E-07	[29]
rs12845396	X:6111492	Neurologin 4, X-Linked, <i>NLGN4X</i> (57502)	Молекулы адгезии клеток – Cell adhesion molecules (map04514)	2.00E-08	

¹ID локуса в базе dbSNP (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/snp>).

²ID гена в базе NCBI Gene (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/gene>).

³ID сигнального пути в базе KEGG: Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (<http://www.genome.jp/kegg/pathway>).

Заключение

Таким образом, новейшие подходы к поиску генетических маркеров, ассоциированных с различными типами аддикции (алкоголизм, наркомания, табакокурение), патологическим гемблингом и шизофренией, основанные на анализе всего генома пациента – GWAS, открывают перед исследователями новые горизонты. Для ряда заболеваний, имеющих в своем этиопатогенезе генетические маркеры с доказанной клинической значимостью (для алкогольной зависимости – гены *GABRA2*, *ADH1B*, *ADH1C*, *TAS2R16*, *HTR2A*; для наркотической зависимости – *OPRM1*, *OPRD1*; для никотиновой зависимости – *SLC6A3*, *GPR51*, *GPR51*, *CYP2A6*, *CHRNA4*; для шизофрении – *SCZD12*, *MTHFR*, *CHI3L1*, *DISC2*, *SYN2*, *DRD3* и др.), открытие новых ОНП, ассоциированных с тем или иным заболеванием, позволит определить ранее не выявленные зависимости и закономерности. В то же время патогенез патологической игровой зависимости как заболевания XXI в. и вклад генетической компоненты в ее генез остается активно дискуссируемым вопросом в мировой научной литературе.

Результаты GWAS помогут выяснить возможные общие сигнальные пути в этиопатогенезе рассматриваемых в данном обзоре нозологий. Однако для ряда генов (*MIR137*, *GRIA1*, *IMMP2L*, *MMP16*, *CACNA1C*, *SRR*) показано наличие микроагломераций, ассоциированных с риском развития шизофрении. Подобные микроагломерации при дальнейших углубленных молекулярно-генетических исследованиях наверняка будут найдены и для других нозологий. С учетом того факта, что GWAS, как правило, проводятся с использованием микрочиповых технологий (например, Illumina© Human chips), а обнаруженные генетические ассоциации на уровне генома ($p \leq 1,00E-06$) необходимо в дальнейших популяционных исследованиях проверять дополнительно, то выявленные закономерности не должны приниматься как категорически доказанные. Результаты GWAS направлены на то, чтобы обозначить для исследователя область поиска в геноме для определения локусов (генов), являющихся потенциальными мишенями при лечении пациентов.

Следует отметить, что по причине широкого распространения в геноме человека межгенных взаимодействий неаллельных генов, представляется возможной оценка риска развития того или иного заболевания с учетом данного эффекта. Как показано в исследовании [35; 36], роль низко- и среднепенетрантных генов и их совокупный вклад в генез заболеваний со слабо выраженной генетической компонентой может быть сопоставима с эффектом мутаций или патогенетически значимых полиморфных вариантов в высокопенетрантных генах. В этой связи, на наш взгляд, представляется целесообразным оценить именно совокупного вклада ОНП, ассоциированных с различными типами аддикции (алкоголизмом, наркоманией, табакокурением), патологическим гемблингом и шизофренией, в увеличение риска развития конкретного заболевания.

Библиографические ссылки

1. Goodwin D. Drinking problems in adopted and nonadopted sons of alcoholics. *Archives of General Psychiatry*. 1974;31(2):164–169.
2. Blass JP, Gibson GE. Genetic factors in Wernicke-Korsakoff syndrome. *Alcohol. Clinical and Experimental Research*. 1979;3:126–134.
3. Wyngaarden JB. Familial hyperlipoproteinemia. In: *The Metabolic Basis of Inherited Disease*. 2nd editor. New York: McGraw-Hill; 1966.
4. Mackillop J. The Role of Genetics in Nicotine Dependence: Mapping the Pathways from Genome to Syndrome. *Current Cardiovascular Risk Reports*. 2010;4:446–453.
5. Tyndale RF. Genetics of alcohol and tobacco use in humans. *Annals of Medicine*. 2003;35:94–121.
6. Davies GE, Soundy TJ. The genetics of smoking and nicotine addiction. *South Dakota Medicine*. 2009;43:9.
7. Carmelli D. Genetic influence on smoking – a study of male twins. *New England Journal of Medicine*. 1992;326:829–833.
8. Heath AC. Behavior genetic approaches in behavioral medicine. In: *Behavior Genetic Influences on Smoking Behavior*. New York: Plenum; 1995. p. 37–48.
9. Goldman D, Oroszi G, Ducci F. The genetics of addiction: uncovering the genes. *Nature Reviews Genetics*. 2005;6:521–532.
10. Prescott CA, et al. Genetic and environmental influences on alcohol, caffeine, cannabis, and nicotine use from early adolescence to middle adulthood. *Archives of General Psychiatry*. 2008;65:674–682.
11. Mather M, Lighthall N. Both risk and reward are processed differently in decisions made under stress. *Current Directions in Psychological Science*. 2012;21:36–41.
12. Subramaniam M, et al. Prevalence and determinants of gambling disorder among older adults: a systematic review. *Addictive Behaviors*. 2014;41:199–209.
13. Voon V, et al. Factors associated with dopaminergic drug-related pathological gambling in Parkinson disease. *Archives of Neurology*. 2007;64:212–216.
14. Kendler K. Schizophrenia: genetics. *Comprehensive Textbook of Psychiatry*. Baltimore: Williams and Wilkins; 1985. p. 942–957.
15. Moldin S. Sponsoring initiatives in the molecular genetics of mental disorders. In: *Genetics and Mental Disorders. Report of the NIMH Genetics*. Bethesda: Md.; 1998.
16. Negrón-Oyarzo I, et al. Schizophrenia and reelin: a model based on prenatal stress to study epigenetics, brain development and behavior. *Biological Research*. 2016;49:659–676.
17. Robinson A, Nestler E. Transcriptional and epigenetic mechanisms of addiction. *Nature Reviews Neuroscience*. 2011;12:623–37.

18. International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Personal habits and indoor combustion: consumption of alcoholic beverages, 2012 October 24. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer. 2016. Volume 100E. 598 p.
19. Разводовский ЮЕ. Продажа алкоголя и эпидемиологические параметры алкоголизма в Беларуси. *Тюменский медицинский журнал*. 2016;18(4):3–8.
20. Treutlein J, et al. Genome-wide association study of alcohol dependence. *Archives General Psychiatry*. 2009;66:773–784.
21. Heath A, et al. A quantitative-trait genome-wide association study of alcoholism risk in the community: findings and implications. *Biological Psychiatry*. 2011;70:508–513.
22. Hancock D, et al. Genome-wide meta-analysis reveals common splice site acceptor variant in CHRNA4 associated with nicotine dependence. *Translational Psychiatry*. 2015;6:651.
23. Verweij K, et al. The genetic aetiology of cannabis use initiation: a meta-analysis of genome-wide association studies and a SNP-based heritability estimation. *Addiction Biology*. 2013;18:846–850.
24. Liuz Z, et al. NCK2 is significantly associated with opiates addiction in African-origin men. *Scientific World Journal*. 2013;10:74–89.
25. Johnson E, et al. KAT2B polymorphism identified for drug abuse in African Americans with regulatory links to drug abuse pathways in human prefrontal cortex *Addiction Biology*. 2016;21:1217–1232.
26. Lang M, et al. Genome-wide association study of pathological gambling. *European Psychiatry*. 2016;36:38–46.
27. Sullivan P. Kendler K. Neale M. Schizophrenia as a complex trait: evidence from a meta-analysis of twin studies. *Archives of General Psychiatry*. 2003;60:1187–1192.
28. Bhugra D. The global prevalence of schizophrenia. *PLOS Medicine*. 2005;2:151–175.
29. Lencz T. Converging evidence for a pseudoautosomal cytokine receptor gene locus in schizophrenia. *Molecular Psychiatry*. 2007;12:572–580.
30. Fanous A, et al. Genome-wide association study of clinical dimensions of schizophrenia: polygenic effect on disorganized symptoms. *American Journal of Psychiatry*. 2012; 169:1309–1317.
31. Biological insights from 108 schizophrenia-associated genetic loci. Schizophrenia Working Group of the Psychiatric Genomics Consortium. *Nature*. 2014;24:421–427.
32. Genome-wide association study implicates HLA-C*01:02 as a risk factor at the major histocompatibility complex locus in schizophrenia. Irish Schizophrenia Genomics Consortium and the Wellcome Trust Case Control Consortium 2. *Biological Psychiatry*. 2012;72:620–628.
33. Genome-wide association study identifies five new schizophrenia loci. Schizophrenia Psychiatric Genome-Wide Association Study (GWAS) Consortium. *Nature Genetics*. 2011; 18:969–976.
34. Ripke S, et al. Genome-wide association analysis identifies 13 new risk loci for schizophrenia. *Nature Genetics*. 2013;10:1150–1159.
35. Kipen VN. The role of low-penetrance alleles in predisposing the development of sporadic breast cancer. *Russian Journal of Genetics*. 2017;53(7):804–808.
36. Исакова ЖТ, Кипень ВН, Талайбекова ЭТ, и др. Роль и взаимодействие полиморфных вариантов неаллельных генов KCNJ11, ADIPOQ, ITPN1, LEP, TCF7L2 и PPARG в увеличении риска развития сахарного диабета типа 2 в Кыргызской Республике. *Молекулярная медицина*. 2019;17(4):34–44.

References

1. Goodwin D. Drinking problems in adopted and nonadopted sons of alcoholics. *Archives of General Psychiatry*. 1974;31(2):164–169.
2. Blass JP, Gibson GE. Genetic factors in Wernicke-Korsakoff syndrome. *Alcohol. Clinical and Experimental Research*. 1979;3:126–134.
3. Wyngaarden JB. Familial hyperlipoproteinemia. In: Stanbury. In: *The Metabolic Basis of Inherited Disease*. 2nd editor. New York: McGraw-Hill; 1966.
4. Mackillop J. The Role of Genetics in Nicotine Dependence: Mapping the Pathways from Genome to Syndrome. *Current Cardiovascular Risk Reports*. 2010;4:446–453.
5. Tyndale RF. Genetics of alcohol and tobacco use in humans. *Annals of Medicine*. 2003;35:94–121.
6. Davies GE, Soundy TJ. The genetics of smoking and nicotine addiction. *South Dakota Medicine*. 2009;43:9.
7. Carmelli D. Genetic influence on smoking – a study of male twins. *New England Journal of Medicine*. 1992;329:829–833.
8. Heath AC. Behavior genetic approaches in behavioral medicine. In: *Behavior Genetic Influences on Smoking Behavior*. New York: Plenum; 1995. p. 37–48.
9. Goldman D, Oroszi G, Ducci F. The genetics of addiction: uncovering the genes. *Nature Reviews Genetics*. 2005;6:521–532.
10. Prescott CA, et al. Genetic and environmental influences on alcohol, caffeine, cannabis, and nicotine use from early adolescence to middle adulthood. *Archives of General Psychiatry*. 2008;65:674–682.
11. Mather M, Lighthall N. Both risk and reward are processed differently in decisions made under stress. *Current Directions in Psychological Science*. 2012;21:36–41.
12. Subramaniam M, et al. Prevalence and determinants of gambling disorder among older adults: a systematic review. *Addictive Behaviors*. 2014;41:199–209.
13. Voon V, et al. Factors associated with dopaminergic drug-related pathological gambling in Parkinson disease. *Archives of Neurology*. 2007;64:212–216.
14. Kendler K. Schizophrenia: genetics. *Comprehensive Textbook of Psychiatry*. Baltimore: Williams and Wilkins; 1985. p. 942–957.
15. Moldin S. Sponsoring initiatives in the molecular genetics of mental disorders. In: *Genetics and Mental Disorders. Report of the NIMH Genetics Workgroup*. Bethesda: Md.; 1998.
16. Negrón-Oyarzo I, et al. Schizophrenia and reelin: a model based on prenatal stress to study epigenetics, brain development and behavior. *Biological Research*. 2016;49:659–676.
17. Robinson A, Nestler E. Transcriptional and epigenetic mechanisms of addiction. *Nature Reviews Neuroscience*. 2011;12:623–37.

18. International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Personal habits and indoor combustion: consumption of alcoholic beverages, 2012 October 24. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer. 2016. Volume 100E. 598 p.
19. Razvodovsky YuE. *Prodazha alkogola i epidemiologicheskie parametry alkogolizma v Belarusi* [Alcohol sale and epidemiological parameters of alcoholism in Belarus]. *Tumensiy meditsinskiy zhurnal* [Tyumen Medical Journal]. 2016;18(4):3–8. Russian.
20. Treutlein J, et al. Genome-wide association study of alcohol dependence. *Archives General Psychiatry*. 2009;66:773–784.
21. Heath A, et al. A quantitative-trait genome-wide association study of alcoholism risk in the community: findings and implications. *Biological Psychiatry*. 2011;70:508–513.
22. Hancock D, et al. Genome-wide meta-analysis reveals common splice site acceptor variant in CHRNA4 associated with nicotine dependence. *Translational Psychiatry*. 2015;6:651.
23. Verweij K, et al. The genetic aetiology of cannabis use initiation: a meta-analysis of genome-wide association studies and a SNP-based heritability estimation. *Addiction Biology*. 2013;18:846–850.
24. Liuz Z, et al. NCK2 is significantly associated with opiates addiction in African-origin men. *Scientific World Journal*. 2013;10:74–89.
25. Johnson E, et al. KAT2B polymorphism identified for drug abuse in African Americans with regulatory links to drug abuse pathways in human prefrontal cortex *Addiction Biology*. 2016;21:1217–1232.
26. Lang M, et al. Genome-wide association study of pathological gambling. *European Psychiatry*. 2016;36:38–46.
27. Sullivan P. Kendler K. Neale M. Schizophrenia as a complex trait: evidence from a meta-analysis of twin studies. *Archives of General Psychiatry*. 2003;60:1187–1192.
28. Bhugra D. The global prevalence of schizophrenia. *PLOS Medicine*. 2005;2:151–175.
29. Lencz T. Converging evidence for a pseudoautosomal cytokine receptor gene locus in schizophrenia. *Molecular Psychiatry*. 2007;12:572–580.
30. Fanous A, et al. Genome-wide association study of clinical dimensions of schizophrenia: polygenic effect on disorganized symptoms. *American Journal of Psychiatry*. 2012; 169:1309–1317.
31. Biological insights from 108 schizophrenia-associated genetic loci. Schizophrenia Working Group of the Psychiatric Genomics Consortium. *Nature*. 2014;24:421–427.
32. Genome-wide association study implicates HLA-C*01:02 as a risk factor at the major histocompatibility complex locus in schizophrenia. Irish Schizophrenia Genomics Consortium and the Wellcome Trust Case Control Consortium 2. *Biological Psychiatry*. 2012;72:620–628.
33. Genome-wide association study identifies five new schizophrenia loci. Schizophrenia Psychiatric Genome-Wide Association Study (GWAS) Consortium. *Nature Genetics*. 2011; 18:969–976.
34. Ripke S, et al. Genome-wide association analysis identifies 13 new risk loci for schizophrenia. *Nature Genetics*. 2013;10:1150–1159.
35. Kipen VN. The role of low-penetrance alleles in predisposing the development of sporadic breast cancer. *Russian Journal of Genetics*. 2017;53(7):804–808.
36. Isakova ZhT. [The role and relationships of polymorphic variants of non-allelic genes KCNJ11, ADIPOQ, ITLN1, LEP, TCF7L2 and PPARGb with an increased risk of type 2 diabetes in the Kyrgyz Republic]. *Molecular medicine*. 2019; 17(4):34–44. Russian.

Статья поступила в редакцию 26.07.2019.
Received by editorial board 26.07.2019.

АНТИОКСИДАНТНАЯ АКТИВНОСТЬ МОЛОЧНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ДЕТСКОГО ПИТАНИЯ

Е. И. ТАРУН¹⁾, М. А. ЮШКЕВИЧ¹⁾

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

Проведено сравнительное изучение антиоксидантной активности молочных смесей для детского питания. Получены зависимости интенсивности флуоресценции флуоресцеина от логарифма концентрации молочных смесей, из которых графически определены показатели IC_{50} . Наблюдается подавление действия свободных радикалов и возращание флуоресценции флуоресцеина до 78–96 % при концентрации образцов 0,5 мг/мл. Максимальная антиоксидантная активность (АОА) получена для молочной смеси «NAN Optipro 1+», показатель IC_{50} которой составляет $0,58 \cdot 10^{-2}$ мг(белка)/мл. Минимальные показатели IC_{50} в расчете на сухое вещество ($5,89-6,03 \cdot 10^{-2}$ мг/мл) получены для молочных смесей «NAN Optipro HA 1+», «NAN Optipro 1+» и «ГА гипоаллергенная 3+».

Ключевые слова: антиоксидантная активность; молочные смеси для детского питания; флуоресцеин.

ANTIOXIDANT ACTIVITY OF DAIRY MIXTURES FOR CHILD NUTRITION

E. I. TARUN^a, M. A. YUSHKEVICH^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute,
Belarusian State University,
23/1 Daubrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: E. I. Tarun (ktarun@tut.by)

The comparative study of the antioxidant activity of dairy mixtures for child nutrition was conducted. Fluorescein fluorescence intensity dependencies are obtained on the logarithm of the concentration of infant formula, from which IC_{50} values are graphically determined. A suppression of the action of free radicals and an increase in fluorescence of fluorescein up to 78–96 % with a concentration of samples of 0,5 mg / ml are observed. The maximum antioxidant activity (AOA) was obtained for the «NAN Optipro 1+» milk formula, with an IC_{50} of $0,58 \cdot 10^{-2}$ mg (protein)/ ml. The minimum IC_{50} based on dry matter ($5,89-6,03 \cdot 10^{-2}$ mg / ml) was obtained for the milk mixtures «NAN Optipro HA 1+», «NAN Optipro 1+» and «HA hypoallergenic 3+».

Key words: antioxidant activity; dairy mixtures for child nutrition; fluorescein.

Введение

Молоко является уникальным продуктом, обеспечивающим организм необходимыми питательными веществами, а также обладающим антиокислительными свойствами.

Образец цитирования:

Тарун ЕИ, Юшкевич МА. Антиоксидантная активность молочных смесей для детского питания. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;1:75–82.

For citation:

Tarun EI, Yushkevich MA. Antioxidant activity of dairy mixtures for child nutrition. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;1:75–82. Russian.

Авторы:

Екатерина Ивановна Тарун – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры экологической химии и биохимии.
Мария Александровна Юшкевич – студентка.

Authors:

Ekaterina I. Tarun, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of environmental chemistry and biochemistry.
ktarun@tut.by
Mariya A. Yushkevich, student.
mariacotic@gmail.com

Ферментативный гидролиз белкового компонента молока направлен на получение продуктов с низким аллергенным потенциалом и высокой питательной ценностью [1–3]. Ферментативные гидролизаты белков коровьего молока вносят в специализированные продукты детского, спортивного и диетического питания [4]. Положительный физиологический эффект при употреблении белковых гидролизатов и ферментированных продуктов достигается за счет лучшего усвоения пептидов в кишечном тракте, чем нативных белков и аминокислот, а также широкого спектра биологически активных свойств [5]. В связи с повышенным содержанием иммуноглобулинов, легкоусвояемых сывороточных белков и антиоксидантов (Zn, Se, витамины А и Е) коровье молоко относят к перспективным источникам получения биологически ценных гидролизатов [6; 7]. Гидролиз сывороточных белков, а также степень гидролиза оказывают положительное влияние на повышение АОА белков молока [8]. Представляет интерес сравнение АОА молочных смесей для детского питания, содержащих частично гидролизованый сывороточный белок молока, и молочных смесей с негидролизованным белком молока.

Проведено сравнительное исследование антиоксидантной активности 8 молочных смесей для детского питания разных производителей: «ГА гипоаллергенная 1+», «ГА гипоаллергенная 2+», «ГА гипоаллергенная 3+», «Иммунис 1+», «Комфорт», «Антирефлюксная» фирмы «Беллакт» (Беларусь), «NAN Optipro HA 1+» (гипоаллергенная), «NAN Optipro 1+» фирмы «Nestle» (Швейцария). Смеси «ГА гипоаллергенная 1+», «ГА гипоаллергенная 2+», «ГА гипоаллергенная 3+», «Комфорт» и «NAN Optipro HA 1+» (гипоаллергенная) содержали частично гидролизованый сывороточный белок молока. В смеси «Иммунис 1+», «Антирефлюксная» и «NAN Optipro 1+» входили негидролизованный белок молока с преобладанием белков молочной сыворотки.

Метод определения АОА по отношению к активированным формам кислорода (АФК) основан на измерении интенсивности флуоресценции окисляемого соединения и ее уменьшении под воздействием АФК. В настоящей работе для детектирования свободных радикалов использован флуоресцеин, обладающий высоким коэффициентом экстинкции и близким к 1 квантовым выходом флуоресценции. Генерирование свободных радикалов осуществляли при использовании системы Фентона, в которой образуются гидроксильные радикалы при взаимодействии комплекса железа (Fe^{2+}) с этилендиаминтетрауксусной кислотой (EDTA) и пероксида водорода [9–11]. При взаимодействии флуоресцеина со свободными радикалами происходит тушение его флуоресценции, восстановить которую можно при добавлении в систему веществ, проявляющих антиоксидантные свойства.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе проведена сравнительная характеристика антиоксидантных свойств 8 молочных смесей для детского питания разных производителей.

Приготовление раствора молочных смесей. Взвешивали 0,2 г сухого порошка молочной смеси, добавляли 2 мл дистиллированной воды, нагретой до 50 °С и перемешивали. Получали раствор молочной смеси с концентрацией 100 мг/мл. Из полученного раствора готовили ряд разведений молочной смеси, соответствующий концентрациям 0,1–10 мг/мл. Концентрации в пробе уменьшались в 10 раз и составляли 0,01–1 мг/мл.

Методика определения антиоксидантной активности молочных смесей. Общий объем пробы, помещаемый в кювету составлял 2 мл. В кювету вносили 0,02 мл флуоресцеина (10^{-6} М) и 1,98 мл 0,1 М Na-фосфатного буфера. Прописывали спектр. Полученные значения пика флуоресценции принимали за 100 %.

В кювету вносили 0,02 мл флуоресцеина (10^{-6} М), 0,2 мл Fe^{2+} с этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТА) (10^{-3} М), 1,58 мл 0,1 М Na-фосфатного буфера и 0,2 мл пероксида водорода (10^{-2} М). При взаимодействии Fe^{2+} с H_2O_2 (реакция Фентона) образующиеся радикалы подавляли свечение флуоресцеина. Полученные значения пика флуоресценции принимали за минимальное.

В кювету вносили 0,02 мл флуоресцеина (10^{-6} М), 0,2 мл Fe^{2+} с ЭДТА (10^{-3} М), 0,2 мл раствора молочной смеси (0,1–10 мг/мл) и 1,38 мл 0,1 М Na-фосфатного буфера. Реакцию начинали добавлением 0,2 мл пероксида водорода (10^{-2} М).

Конечные концентрации: флуоресцеин – 10^{-8} М, Fe^{2+} – 10^{-4} М, ЭДТА – 10^{-4} М, H_2O_2 – 10^{-3} М, раствор молочной смеси – 0,01–1 мг/мл.

Измерения флуоресценции проводили на флуориметре RF-5301 PC («Shimadzu», Япония). Регистрировали интенсивность флуоресценции на длине волны 514 нм. Длина волны возбуждения – 490 нм.

Статистическая обработка экспериментальных данных. Построение графиков и математическую обработку результатов исследований осуществляли при помощи компьютерной программы «Microsoft Office Excel 2003» (Microsoft Corporation, США). Результаты независимых экспериментов представлены как среднее арифметическое значение $\pm$ доверительный интервал. Достоверность различий между выборками данных определяли методом доверительных интервалов.

Результаты исследования и их обсуждение

Для всех образцов получены зависимости интенсивности флуоресценции флуоресцеина от логарифма концентрации молочных смесей. На рис.1 представлены зависимости интенсивности флуоресценции от логарифма концентрации молочных смесей «NAN Optipro HA 1+» (1) и «NAN Optipro 1+» (2). Исследования проведены в широком диапазоне концентраций 0,01–1 мг/мл. Образцы молочных смесей начинали проявлять АОО при концентрации 0,01 мг/мл. При последующем увеличении концентрации молочных смесей наблюдается увеличение подавления действия свободных радикалов и возрастание флуоресценции флуоресцеина до 82–95 % при концентрации образцов 0,5 мг/мл (табл. 1). Графически определены показатели IC_{50} – концентрация молочных смесей, при которой достигается 50 % ингибирования свободных радикалов. Известно, что антиоксидантная активность белков молока обусловлена восстанавливающими свойствами аминокислотных радикалов триптофана, тирозина, метионина и гистидина [1]. В связи с этим расчет IC_{50} для молочных смесей осуществляли как на содержание сухого вещества, так и количество белковой фракции (табл. 1), с учетом процентного содержания белка в сухих молочных смесях (табл. 2).

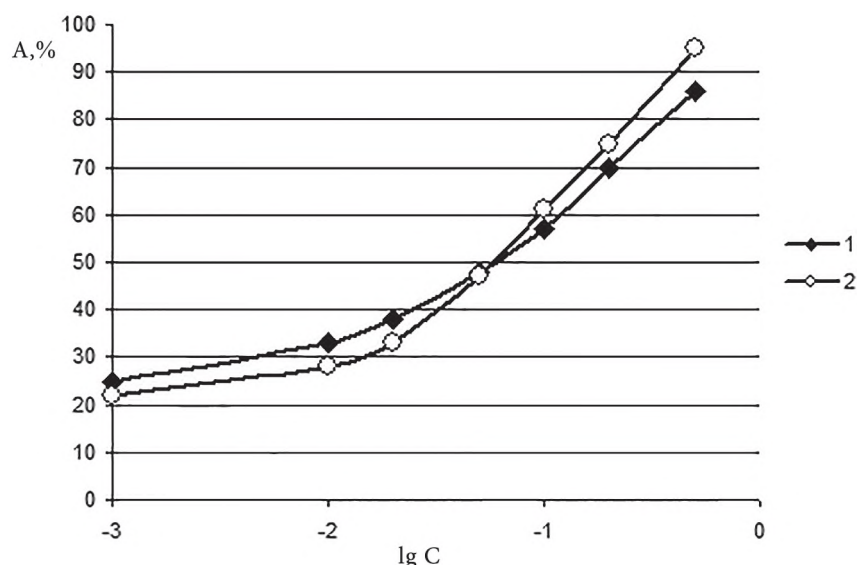


Рис. 1. Зависимость интенсивности флуоресценции флуоресцеина (А) от логарифма концентрации (С) молочной смеси «NAN Optipro HA 1+» (1) и «NAN Optipro 1+» (2)

Fig. 1. The fluorescence intensity of fluorescein (A) depends on the logarithm of the concentration of milk mixture «NAN Optipro HA 1+» (1) and «NAN Optipro 1+» (2)

Максимальная АОО получена для молочной смеси «NAN Optipro 1+». Подавление свободных радикалов достигается до 95 %. Показатель IC_{50} составляет $0,58 \cdot 10^{-2}$ мг/мл. Образец молочной смеси «NAN Optipro HA 1+» подавлял действие свободных радикалов на 86 %, тогда как его показатель IC_{50} ($0,57 \cdot 10^{-2}$ мг/мл) сравним с аналогичным показателем для молочной смеси «NAN Optipro 1+».

Таблица 1

Показатели антиоксидантной активности молочных смесей

Table 1

Indicators of antioxidant activity of milk mixture

Молочные смеси	A_{max} , %	C_{max} мг (сухого вещества)/мл	$IC_{50} \cdot 10^{-2}$, мг (сухого вещества)/мл	$IC_{50} \cdot 10^{-2}$, мг (белка)/мл
«NAN Optipro HA 1+»	86	0,5	5,89	0,57
«NAN Optipro 1+»	95	0,5	6,03	0,58
«ГА гипоаллергенная 3+»	96	0,5	6,03	0,94
«ГА гипоаллергенная 2+»	96	0,5	7,08	0,83
«ГА гипоаллергенная 1+»	81	0,5	10	1,09
«Антирефлюксная»	93	0,5	7,76	0,85
«Комфорт»	78	0,5	10	1,17
«Иммунис 1+»	78	0,5	14,7	1,6

Таблица 2

Содержание белка в молочных смесях

Table 2

Protein content in milk formulas

Молочные смеси	Содержание белка, г/100 г сухой смеси
«NAN Optipro HA 1+»	9,72
«NAN Optipro 1+»	9,6
«ГА гипоаллергенная 3+»	15,5
«ГА гипоаллергенная 2+»	11,7
«ГА гипоаллергенная 1+»	10,9
«Антирефлюксная»	10,9
«Комфорт»	11,7
«Иммунис 1+»	10,9

На рис. 2 представлены зависимости интенсивности флуоресценции от логарифма концентрации молочных смесей «ГА гипоаллергенная 1+» (1), «ГА гипоаллергенная 2+» (2) и «ГА гипоаллергенная 3+» (3). Гипоаллергенные смеси «ГА гипоаллергенная 3+» и «ГА гипоаллергенная 2+» восстанавливали флуоресценцию флуоресцеина на 96 %. Показатель IC_{50} по белку, полученный для молочной смеси «ГА гипоаллергенная 2+» ($0,83 \cdot 10^{-2}$ мг/мл), в 1,1 раза ниже аналогичного показателя для молочной смеси «ГА гипоаллергенная 3+» ($0,94 \cdot 10^{-2}$ мг/мл) и в 1,5 раза выше при сравнении с молочной смесью «NAN Optipro HA 1+». Наиболее низкую АОА из гипоаллергенных смесей показал образец «ГА гипоаллергенная 1+». Он восстанавливал флуоресценцию флуоресцеина на 81 %. Показатель IC_{50} , полученный для молочной смеси «ГА гипоаллергенная 1+» ($1,09 \cdot 10^{-2}$ мг/мл), в 1,9; 1,3 и 1,2 раз выше, чем аналогичные показатели для молочных смесей «NAN Optipro HA 1+», «ГА гипоаллергенная 2+» и «ГА гипоаллергенная 3+» соответственно. Показатель IC_{50} по белку молочной смеси «ГА гипоаллергенная 3+» в 1,6 раз выше, чем аналогичный показатель молочной смеси «NAN Optipro HA 1+», тогда как показатель IC_{50} по сухому веществу ($6,03 \cdot 10^{-2}$ мг/мл) совпадает с аналогичными показателями для молочных смесей «NAN Optipro HA 1+» и «NAN Optipro 1+». Таким образом, можно предположить, что не только гидролиз белков молока оказывает влияние на повышение антиоксидантной активности молочной смеси, но и другие компоненты, входящие в состав молочных смесей.

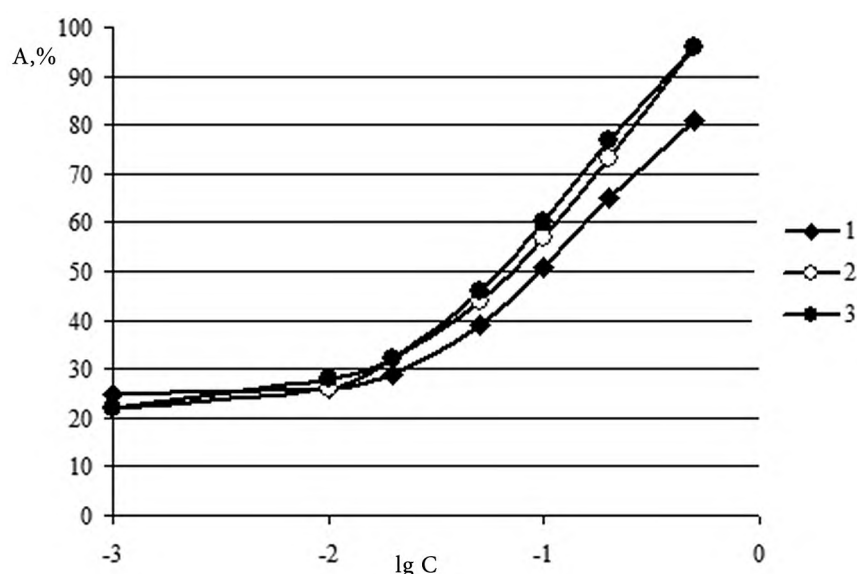


Рис. 2. Зависимость интенсивности флуоресценции флуоресцеина (А) от логарифма концентрации (С) молочной смеси «ГА гипоаллергенная 1+» (1), «ГА гипоаллергенная 2+» (2) и «ГА гипоаллергенная 3+» (3)

Fig. 2. The fluorescence intensity of fluorescein (A) depends on the logarithm of the concentration (C) of milk mixture «HA hypoallergenic 1+» (1), «HA hypoallergenic 2+» (2) and «HA hypoallergenic 3+» (3)

На рис. 3 представлены зависимости интенсивности флуоресценции от логарифма концентрации молочных смесей «Иммунис 1+» (1), «Комфорт» (2) и «Антирефлюксная» (3). Молочная смесь «Антирефлюксная» восстанавливала флуоресценцию флуоресцеина на 93 %, что сравнимо с образцами молочных смесей «NAN Optipro 1+», «ГА гипоаллергенная 3+» и «ГА гипоаллергенная 2+». Показатель IC_{50} по белку ($0,85 \cdot 10^{-2}$ мг/мл) сравним с аналогичным показателем для молочной смеси «ГА гипоаллергенная 2+» и в 1,5 раза выше показателя IC_{50} для молочной смеси «NAN Optipro 1+».

Образцы молочных смесей «Комфорт» и «Иммунис 1+» подавляли действие свободных радикалов до 78 %, что на 18 % ниже аналогичных показателей для молочных смесей «NAN Optipro 1+», «ГА гипоаллергенная 3+» и «ГА гипоаллергенная 2+». Показатель IC_{50} по белку молочной смеси «Комфорт» ($1,17 \cdot 10^{-2}$ мг/мл) сравним с аналогичным показателем для молочной смеси «ГА гипоаллергенная 1+». Максимальный показатель IC_{50} по белку получен для молочной смеси «Иммунис 1+» ($1,6 \cdot 10^{-2}$ мг/мл). Он в 1,4 и 2,8 раза превышает показатели IC_{50} молочной смеси «Комфорт» и «NAN Optipro 1+» соответственно. Это свидетельствует о самой низкой АОА образца молочной смеси «Иммунис 1+».

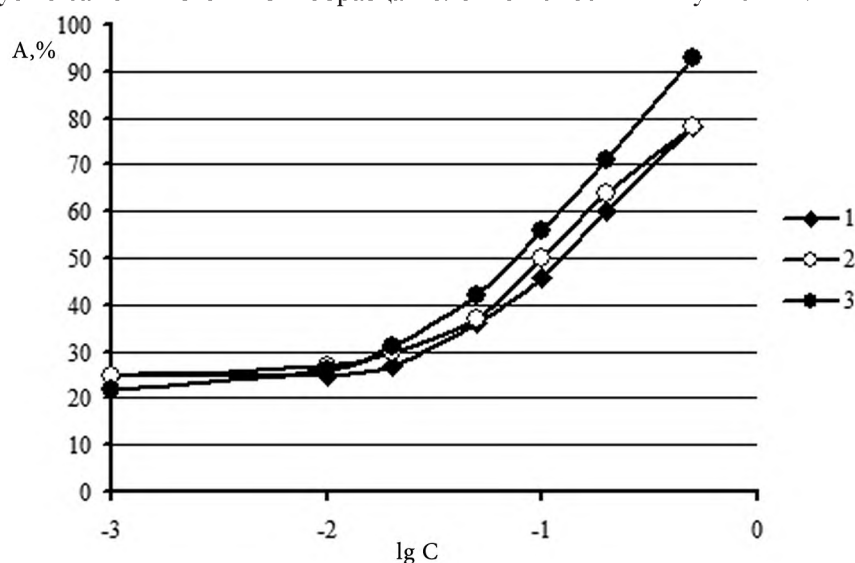


Рис. 3. Зависимость интенсивности флуоресценции флуоресцеина (А) от логарифма концентрации (С) молочной смеси «Иммунис 1+» (1), «Комфорт» (2) и «Антирефлюксная» (3)

Fig. 3. The fluorescence intensity of fluorescein (A) depends on the logarithm of the concentration of milk mixture «Immunis» (1), «Comfort» (2) и «Antireflux» (3)

Молочные смеси «NAN Optipro HA 1+», «ГА гипоаллергенная 1+», «ГА гипоаллергенная 2+», «ГА гипоаллергенная 1+» и «Комфорт» содержат частично гидролизованный сывороточный белок, тогда как молочные смеси «NAN Optipro 1+», «Антирефлюксная» и «Иммунис 1+» – негидролизованные сывороточные белки. Гидролиз сывороточных белков, а также степень гидролиза оказывают положительное влияние на повышение АОА белков молока [8]. Однако молочная смесь «NAN Optipro 1+», не содержащая гидролизованный белок, показывает более высокую АОА по сравнению с молочной смесью «NAN Optipro HA 1+». Молочная смесь «Антирефлюксная», не содержащая гидролизованный белок, имеет более высокую АОА, чем молочные смеси «ГА гипоаллергенная 1+» и «Комфорт».

Молочные смеси – это достаточно сложный набор компонентов. В частности, в их состав входят смесь ненасыщенных жирных кислот, углеводы (сахара, лактоза и мальтодекстрин), микроэлементы (цинк, железо, медь, селен) и витамины (А, Е и С), способные оказать влияние на антиоксидантную активность. Каждая из молочных смесей имеет различия в содержании по нескольким из перечисленных компонентов, что усложняет анализ их влияния на АОА.

В табл. 3 представлено содержание углеводов и линолевой кислоты в молочных смесях. Максимальное количество сахаров (58–59 %) содержится в молочных смесях «NAN Optipro HA 1+», «NAN Optipro 1+», «ГА гипоаллергенная 3+» и «Антирефлюксная». Максимальное количество линолевой кислоты – в молочных смесях «Иммунис 1+» (4,55 %), «NAN Optipro HA 1+» и «NAN Optipro 1+» (4,1 %).

В табл. 4 представлено наличие витаминов А, Е и С в молочных смесях. Содержание витамина А в молочных смесях фирмы «Беллакт» выше, чем в смесях «Nestle». Содержание витамина Е выше в молочных смесях фирмы «Nestle». Максимальное количество витамина С отмечается в молочных смесях «ГА гипоаллергенная 3+» (0,0907 %) и «NAN Optipro 1+» (0,087 %). Возможно, более высокое количество витамина С в смеси «NAN Optipro 1+», чем в смеси «NAN Optipro HA 1+» способствует более высоким показателям АОА смеси «NAN Optipro 1+».

Таблица 3

Содержание углеводов и линолевой кислоты в молочных смесях

Table 3

The content of carbohydrates and linoleic acid in milk formulas

Молочные смеси	Содержание углеводов, г/100 г сухой смеси	Содержание линолевой кислоты, г/100 г сухой смеси
«NAN Optipro HA 1+»	59,35	4,1
«NAN Optipro 1+»	57,8	4,1
«ГА гипоаллергенная 3+»	58,2	3,5
«ГА гипоаллергенная 2+»	54,3	3,36
«ГА гипоаллергенная 1+»	53	3,8
«Антирефлюксная»	58,1	3,8
«Комфорт»	51,3	3,8
«Иммунис 1+»	51,6	4,55

Таблица 4

Содержание витаминов А, Е и С в молочных смесях

Table 4

The content of vitamins A, E and C in milk formula

Молочные смеси	Витамин А, мкг/100 г сухой смеси	Витамин Е, мг/100 г сухой смеси	Витамин С, мг/100 г сухой смеси
«NAN Optipro HA 1+»	510	8,7	78
«NAN Optipro 1+»	527	8,5	87
«ГА гипоаллергенная 3+»	547	7,1	90,7
«ГА гипоаллергенная 2+»	547	7,03	78
«ГА гипоаллергенная 1+»	547	6,25	78
«Антирефлюксная»	547	6,25	78
«Комфорт»	547	6,25	78
«Иммунис 1+»	547	6,25	78

В табл. 5 представлено содержание микроэлементов в молочных смесях. Максимальное количество цинка ($5-5,5 \cdot 10^{-3} \%$) содержится в молочных смесях «ГА гипоаллергенная 2+», «ГА гипоаллергенная 3+», «NAN Optipro HA 1+» и «NAN Optipro 1+».

Таблица 5

Содержание микроэлементов в молочных смесях

Table 5

The content of trace elements in milk mixtures

Молочные смеси	Цинк (Zn), мг/100 г сухой смеси	Железо (Fe), мг/100 г сухой смеси	Медь (Cu), мкг/100 г сухой смеси	Селен (Se), мкг/100 г сухой смеси
«NAN Optipro HA 1+»	5	5,3	400	16
«NAN Optipro 1+»	5,4	4,6	400	11
«ГА гипоаллергенная 3+»	5,43	10	542,6	—
«ГА гипоаллергенная 2+»	5,5	10,85	547	19,5
«ГА гипоаллергенная 1+»	3,12	6,25	312	19,5
«Антирефлюксная»	3,12	6,25	312	19,5
«Комфорт»	3,12	6,25	312	19,5
«Иммунис 1+»	3,12	6,25	312	19,5

Максимальное количество железа (0,01 %) отмечено в молочных смесях «ГА гипоаллергенная 2+», «ГА гипоаллергенная 3+».

Максимальное количество меди ($0,54 \cdot 10^{-3}$ %) содержится в молочных смесях «ГА гипоаллергенная 2+», «ГА гипоаллергенная 3+».

Максимальное количество селена ($19,5 \cdot 10^{-6}$ %) присутствует в молочных смесях фирмы «Беллакт».

Таким образом, анализируя данные табл. 3–5, можно сделать вывод, что максимальное содержание сахаров в молочных смесях «NAN Optipro HA 1+», «NAN Optipro 1+», «ГА гипоаллергенная 3+» и «Антирефлюксная», линолевой кислоты в молочных смесях «NAN Optipro HA 1+», «NAN Optipro 1+» и «Антирефлюксная», витамина С в смесях «ГА гипоаллергенная 3+» и «NAN Optipro 1+», витамина Е в смесях «NAN Optipro HA 1+», «NAN Optipro 1+», «ГА гипоаллергенная 3+» и «ГА гипоаллергенная 2+», железа и меди в смесях «ГА гипоаллергенная 3+» и «ГА гипоаллергенная 2+» влияет на более высокий уровень антиоксидантной активности, полученный для данных смесей.

Заключение

Молочные смеси «ГА гипоаллергенная 3+», «ГА гипоаллергенная 2+», «NAN Optipro 1+» и «Антирефлюксная» показали наиболее высокую антиоксидантную активность, восстанавливая флуоресценцию флуоресцеина до 93–96 %.

Минимальные показатели IC_{50} в расчете на белок получены для молочных смесей «NAN Optipro HA 1+» и «NAN Optipro 1+», а на сухое вещество – для молочных смесей «NAN Optipro HA 1+», «NAN Optipro 1+» и «ГА гипоаллергенная 3+».

Смеси «ГА гипоаллергенная 3+», «ГА гипоаллергенная 2+», «NAN Optipro 1+», «NAN Optipro HA 1+» и «Антирефлюксная» содержат более высокое количество углеводов, линолевой кислоты, витаминов Е и С, а также микроэлементов по сравнению с другими молочными смесями, что, возможно, оказывает влияние на повышение их антиоксидантной активности.

Библиографические ссылки

1. Zulueta A, Garsia-Gonzalez N, Asensio-Vegas A, Riso D, et al. Antioxidant capacity of cow milk, whey and deproteinized milk. *International Dairy Journal*. 2009;19(6–7):380–185.
2. Halavach TM, Kurchenko VP, Albulov AI. Enzymatic hydrolysis of milk proteins as a basis of specialized food products biotechnology. *Nauka i studia*. 2016;3:1196–1207.
3. Hernández-Ledesma B, Quiros A, Amigo L, Recio I, et al. Identification of bioactive peptides after digestion of human milk and infant formula with pepsin and pancreatin. *International Dairy Journal*. 2007;17(1):42–49.
4. Tsaouri S, Douros K, Priftis KN. Cow's milk allergenicity. *Endocrine, Metabolic and Immune Disorder – Drug Targets*. 2014;14(1):16–26.
5. Sánchez A, Vázquez A. Bioactive peptides: A review. *Journal Food Safety and Food Quality*. 2017;1:29–46.
6. Dzik S, Micinski B, Aitzhanova I, Pogorzelska Ja, et al. Properties of bovine colostrum and the possibilities of use. *Polish Annals of Medicine*. 2017;24(2):295–299.
7. McGrath BA, Fox PF, McSweeney PLH, et al. Composition and properties of bovine colostrum: a review. *Dairy Science and Technology*. 2015;96(2):133–158.
8. Тарун ЕИ, Зайцева МВ, Кравцова ОИ и др. Влияние пептидов сывороточных белков молока на восстановление уровня флуоресценции в системе с активированными формами кислорода. *Труды БГУ*. 2016;11(1):231–236.
9. Cao GH, Alessio HM, Cutler RG. Oxygen-radical absorbance capacity assay for antioxidants. *Free Radicals in Biology and Medicine*. 1993;3(14):303–311.
10. Wei Y. A novel H_2O_2 -triggered anti-Fenton fluorescent pro-chelator excitable with visible light. *Chemical Communications*. 2009;11:1413–1415.
11. Тарун ЕИ, Чудновская ЕВ. Ингибирование свободных радикалов, генерируемых в системе Фентона, под действием флавоноидов. *Труды БГУ*. 2014;9(1):114–121.

References

1. Zulueta A, Garsia-Gonzalez N, Asensio-Vegas A, Riso D, et al. Antioxidant capacity of cow milk, whey and deproteinized milk. *International Dairy Journal*. 2009;19(6–7):380–185.
2. Halavach TM, Kurchenko VP, Albulov AI. Enzymatic hydrolysis of milk proteins as a basis of specialized food products biotechnology. *Nauka i studia*. 2016;3:1196–1207.
3. Hernández-Ledesma B, Quiros A, Amigo L, Recio I, et al. Identification of bioactive peptides after digestion of human milk and infant formula with pepsin and pancreatin. *International Dairy Journal*. 2007;17(1):42–49.
4. Tsaouri S, Douros K, Priftis KN. Cow's milk allergenicity. *Endocrine, Metabolic and Immune Disorder – Drug Targets*. 2014;14(1):16–26.
5. Sánchez A, Vázquez A. Bioactive peptides: A review. *Journal Food Safety and Food Quality*. 2017;1:29–46.
6. Dzik S, Micinski B, Aitzhanova I, Pogorzelska Ja, et al. Properties of bovine colostrum and the possibilities of use. *Polish Annals of Medicine*. 2017;24(2):295–299.

7. McGrath BA, Fox PF, McSweeney PLH, et al. Composition and properties of bovine colostrum: a review. *Dairy Science and Technology*. 2015;96(2):133–158.
8. Tarun EI, Zaytseva MV, Kravtsova OI et al. *Vliyanie peptidov sivorotochnix belcov moloca na vosstanovlenie urovnya fluorescencii v sisteme s aktivirovannymi formami kisloroda*. [The effect of peptides of whey proteins of milk on the restoration of the level of fluorescence in a system with activated forms of oxygen]. *Trudy BGU* [Proceedings of BSU]. 2016;1:231–236. Russian.
9. Cao GH, Alessio HM, Cutler RG. Oxygen-radical absorbance capacity assay for antioxidants. *Free Radicals in Biology and Medicine*. 1993;3(14):303–311.
10. Wei Y. A novel H₂O₂-triggered anti-Fenton fluorescent pro-chelator excitable with visible light. *Chemical Communications*. 2009;11:1413–1415.
11. Tarun EI, Chudnovskaya EV. *Ingibirovanie svobodnix radicalov, generiruemix v sisteme Fentona, pod deystviem flavonoidov* [Inhibition of free radicals generated in the Fenton system under the influence of flavonoids]. *Trudy BGU* [Proceedings of BSU]. 2014;9(1): 114–121. Russian.

Статья поступила в редакцию 13.02.2020.
Received by editorial board 13.02.2020.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 539.24;539.231;538.91-403

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ БЕССВИНЦОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПАЙКИ НА ОСНОВЕ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШЕЙ ФОЛЬГИ Al-Sn (МИКРОСТРУКТУРА И СТАБИЛЬНОСТЬ)

О. В. ГУСАКОВА¹⁾, А. Н. СКИБИНСКАЯ¹⁾, Ю. М. ШУЛЬЯ¹⁾

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

Изложены результаты исследования микроструктуры фольги сплавов системы Al-Sn с содержанием алюминия до 10 ат. %, полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава при скорости охлаждения расплава 10^5 К/с. Исследуемые сплавы являются перспективными для замены свинец-содержащих припоев при переходе на экологически чистую бессвинцовую пайку. Фольга сплавов эвтектического и около эвтектического составов затвердевает с образованием пересыщенного алюминием твердого раствора на основе олова. При комнатной температуре в результате непрерывного распада твердого раствора на границах и в объеме зерен выделяются частицы алюминия, размер которых не превышает 200 нм.

Образец цитирования:

Гусакова ОВ, Скибинская АН, Шулья ЮМ. Экологически чистые бессвинцовые материалы для пайки на основе быстрозатвердевшей фольги Al-Sn (микроструктура и стабильность). *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;1:83–90.

For citation:

Gusakova OV, Skibinskaya HN, Shulya YuM. Environmentally friendly lead-free soldering materials based on rapidly solidified Al-Sn foil (microstructure and stability). *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;1:83–90. Russian.

Авторы:

Ольга Вадимовна Гусакова – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры ядерной и радиационной безопасности.

Анна Николаевна Скибинская – старший преподаватель кафедры ядерной и радиационной безопасности.

Юлия Михайловна Шулья – старший преподаватель кафедры энергоэффективных технологий.

Authors:

Olga V. Gusakova, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of nuclear and radiation safety.

ol.gusakova@gmail.com

Hanna N. Skibinskaya, senior lecturer at the department of nuclear and radiation safety.

skopets.0804@gmail.com

Yuliya M. Shulya, senior lecturer at the department of energy efficient technologies.

yuliyashulya@gmail.com

Микроструктуры фольги сплавов Al – 94,2 ат. % Sn и Al – 90,7 ат. % Sn, кроме наноразмерных включений Al, содержат крупные включения, размер которых растет по мере удаления от поверхности фольги, прилегающей к кристаллизатору. Быстрозатвердевшая фольга имеет микрокристаллическую структуру. В фольге сплавов Al – 97,8 ат. % Sn и Al – 96,7 ат. % Sn наблюдается образование двойников. С ростом концентрации Al средний размер зерен уменьшается, а количество двойников растет. Старение фольги при комнатной температуре приводит к увеличению концентрации Al на границах зерен в эвтектических и около эвтектических сплавах и образованию усов в фольге сплавов с концентрацией Al, превышающей 3 ат. %.

Ключевые слова: алюминий; олово; высокоскоростное затвердевание; микроструктура; стабильность.

Благодарность. Работа выполнена в рамках проекта № Ф18Р-105 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

ENVIRONMENTALLY FRIENDLY LEAD-FREE SOLDERING MATERIALS BASED ON RAPIDLY SOLIDIFIED AL-SN FOIL (MICROSTRUCTURE AND STABILITY)

O. V. GUSAKOVA^a, H. N. SKIBISKAYA^a, Yu. M. SHULYA^a

*^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daihabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: O. V. Gusakova (ol.gusakova@gmail.com)*

The results of the microstructure of the foil of Al-Sn system alloys with an aluminum content of up to 10 at. % obtained by ultrafast quenching from a melt at a melt cooling rate of 10^5 K/s. The foil of alloys of eutectic and near-eutectic compositions solidifies with the formation of a tin-based solid solution supersaturated with aluminum. Aluminum particles the size of which does not exceed 200 nm precipitate at the grains volume and at the grains boundaries at room temperature, as a result of the continuous decomposition of the solid solution. The microstructure of the Al – 94,2 at. % Sn and Al – 90,7 at. % Sn foil, in addition to, contains not only nanoscale Al inclusions but large ones whose size grows with distance from the surface of the foil adjacent to the mold. A rapidly solidified foil has a microcrystalline structure. The formation of twins is observed in the Al – 97,8 at. % Sn and Al – 96,7 at. % Sn foil. With an increase in Al concentration, the average grain size decreases, and the number of twins increases. Ageing of the foil at room temperature leads to an increase in the Al concentration at the grain boundaries in the eutectic and near-eutectic alloys and to the formation of whiskers in the foil of alloys with an Al concentration exceeding 3 at. %.

Key words: aluminum; tin; rapid solidification; microstructure; stability.

Acknowledgments. This work was carried out as part of project No. F18R-105 of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research.

Введение

Сплавы системы «алюминий – олово» находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Они широко используются для изготовления подшипников скольжения [1], рассматриваются в качестве перспективных материалов в экологически чистой водородной энергетике [2]. Сплавы Al-Sn эвтектического и около эвтектического состава применяются в качестве экологически чистых бессвинцовых припоев для пайки алюминия и изделий из него [3]. С конца прошлого века по инициативе Японии начались работы, направленные на ограничение и исключение использования свинца в электронной промышленности, в частности была поставлена задача замены припоев, содержащих свинец, на бессвинцовые. Известно, что свинец, наряду с ртутью и мышьяком, относится к классу высокоопасных веществ и является сильнейшим ядом. При попадании в организм через дыхательные пути или пищевод свинец поражает большинство органов и систем, при этом он практически не выводится.

Проблема свинцовой пайки состоит в том, что в настоящее время огромное количество бытовой техники выбрасывается на свалки. Оттуда свинец попадает в воду, а затем в организм человека. В 2002 г. Европейское сообщество одобрило «Положение об отходах радиоэлектронного и электрооборудования» (WEEE) и «Положение о применении некоторых опасных веществ в радиоэлектронном и электрооборудовании» (RoHS), согласно которым с 1 июля 2006 г. свинец запрещен к использованию в производстве радиоэлектронной аппаратуры в ЕС. Анализ показал, что единственно возможной заменой свинец-содер-

жащих припоев могут быть сплавы на основе олова, в частности сплавы системы Sn-Al, поскольку обладают достаточно низкой температурой плавления.

В большинстве случаев применения сплавов системы Al-Sn требуется однородное распределение мелкодисперсных компонентов. Пайка алюминия наиболее эффективна при малых перегревах. Однако для массивов при невысоких перегревах невозможно получить однородную микроструктуру расплава. В нем остаются крупные частицы, наличие которых приводит к образованию дефектов в паяном соединении и снижению растекаемости расплава [4]. Использование в качестве припоя быстрозатвердевшей фольги с исходно мелкодисперсной микроструктурой повышает качество паяного соединения, в частности улучшается его радиационная и коррозионная стойкость [5]. Надежным способом измельчения структурных составляющих материалов является повышение скорости затвердевания. Высокоскоростное затвердевание, реализуемое в методе сверхбыстрой закалки из расплава, позволяет достичь скоростей охлаждения расплава до 10^5 – 10^7 К/с. Показано, что твердость быстрозатвердевших сплавов Al-Sn вдвое выше, чем у массивов [6]. Исследования фазового состава сплава Al-Sn, содержащего до 15 ат. % Al, выявили возможность получения аморфной структуры при скорости охлаждения расплава 10^7 К/с [7]. Аморфная фольга обладает высокой хрупкостью и рассыпается в порошок [8]. В связи с этим целесообразно получение и исследование микроструктуры и свойств фольги при скорости охлаждения расплава 10^5 – 10^6 К/с. В низкотемпературной эвтектике Al-Sn могут протекать интенсивные диффузионные процессы, приводящие к изменению микроструктуры и свойств не только при высокой, но и при комнатной температуре. Цель исследования – изучение микроструктуры и свойств фольги, полученной при скорости охлаждения расплава 10^5 – 10^6 К/с, и установление их временной стабильности.

Материалы и методы исследования

Исходные массивные сплавы изготавливались из алюминия (марки А999) и олова (марка 01 пч) путем предварительного сплавления в ампуле и последующего отлива в графитовую изложницу размером 20x10x2 мм. Скорость охлаждения расплава при этом оценивается в 10^2 К/с. Фольгу получали методом сверхбыстрой закалки из расплава. Для получения фольги использовался медный кристаллизатор, вращающийся со скоростью 2000 об/с. Часть массивного образца (~ 0,2 г) расплавлялась в печи при температуре 800 °С и выдерживалась при этой температуре 40–60 с. Расплав выливался на внутреннюю поверхность вращающегося кристаллизатора, растекался по поверхности и затвердевал в виде фольги толщиной 30–60 мкм. Элементный состав исследованных сплавов приведен в табл. 1. Относительная погрешность определения состава не превышала 5 %.

Таблица 1

Состав исследованных сплавов

Table 1

The composition of the investigated alloys

	Концентрация, ат. %				
Al	1,5	2,2	3,3	5,8	9,3
Sn	98,5	97,8	96,7	94,2	90,7

Микроструктура фольги исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP. Определение элементного состава осуществлялось с помощью рентгеновского спектрометра Aztec Energy Advanced X-Max 80. Зеренная структура фольг изучалась методом дифракции обратно отраженных электронов с помощью приставки фазового анализа HKL EBSD Premium System Channel 5 к микроскопу. Исследовались микроструктуры поверхности фольги, прилегающей к кристаллизатору (А) и противоположной свободно затвердевающей поверхности (В), а также изучалась микроструктура поперечного сечения фольги. Для исследования поперечного сечения приготавливались шлифы. Полировка осуществлялась при использовании шлифовально-полировальный машины TegraPol 25 с применением материалов и технологий фирмы Struers.

Измерения микротвердости проводили на микротвердомере 735MVA. Мерой микротвердости служила величина диагонали отпечатка индентора Виккерса. Микротвердость определялась делением нагрузки на площадь боковой поверхности полученного отпечатка. Величина нагрузки составляла 10 г. Исследования проводились на 3 образцах каждого сплава, по 10 отпечатков на каждом. Таким образом, среднее значение микротвердости находилось по 30 отпечаткам. Максимальная погрешность при определении величины микротвердости не превышает 9 %.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены микроструктуры поперечных сечений быстрозатвердевшей фольги эвтектического и около эвтектического составов, полученные на РЭМ в отраженных электронах через 24 ч после изготовления. В выносках приведены участки фольги при большем увеличении.

Микроструктура фольги зависит от концентрации алюминия. В фольге доэвтектического сплава Al – 98,5 ат. % Sn наблюдаются темные выделения, локализованные на границе зерен и декорирующие границы зерен, а также наноразмерные частицы, однородно распределенные в объеме зерна. Размер частиц не превышает 200 нм. Зерна в основном имеют столбчатую структуру и при толщине фольги 30–40 мкм могут прорасти на всю ее толщину.

В быстрозатвердевшей фольге эвтектического сплава Al – 97,8 ат. % Sn наблюдается измельчение зерен, а также образование микродвойников в зерне (показаны стрелками на рис. 1б). В объеме зерна увеличивается плотность частиц, размер частиц не изменяется. Микроструктура фольги заэвтектического сплава Al – 96,7 ат. % Sn сходна с доэвтектической и эвтектической, но отличается измельчением зерна и увеличением количества микродвойников (рис. 1в).

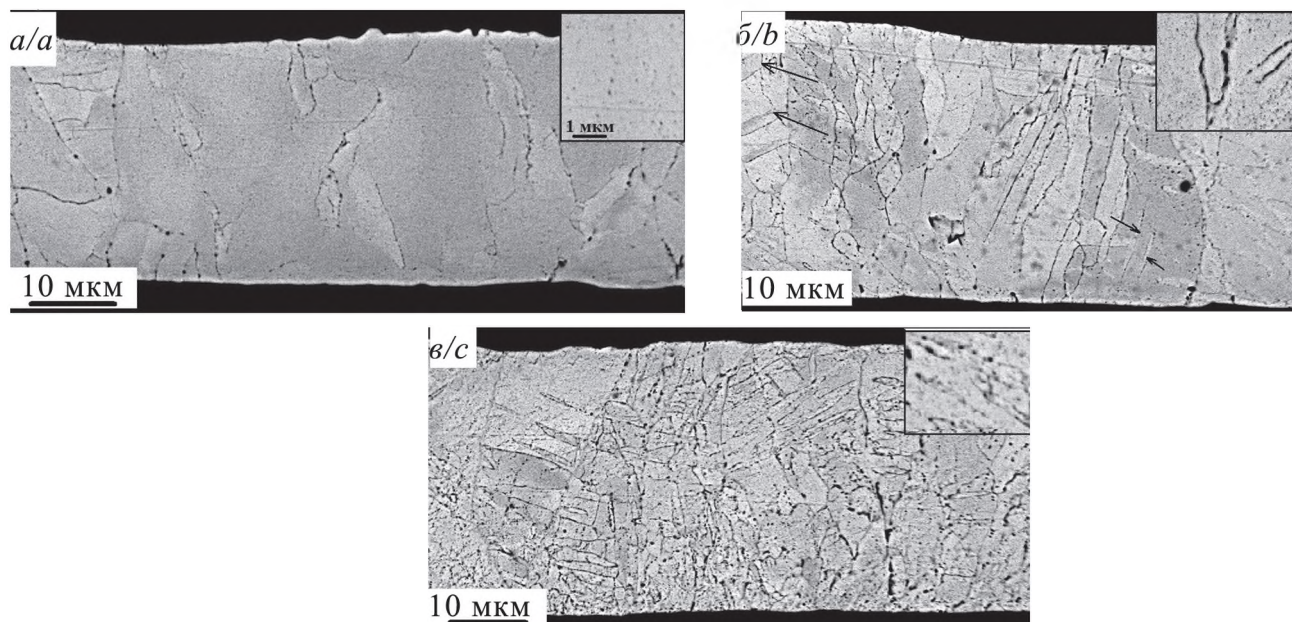


Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения быстрозатвердевшей фольги:
а – сплав Al – 98,5 ат. % Sn; б – Al – 97,8 ат. % Sn; в – Al – 96,7 ат. % Sn

Fig. 1. The microstructure of cross-section of rapidly solidified foil:
а – alloy Al – 98,5 at. % Sn; в – Al – 97,8 at. % Sn; с – Al – 96,7 at. % Sn

На рис. 2 представлено распределение олова и алюминия вдоль линии сканирования L – L¹. При прохождении электронного луча через темные частицы возрастает интенсивность линий алюминия. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, в фольге присутствуют фазы β-Sn и Al. Таким образом, наблюдаемые в фольге всех составов темные включения принадлежат фазе алюминия.

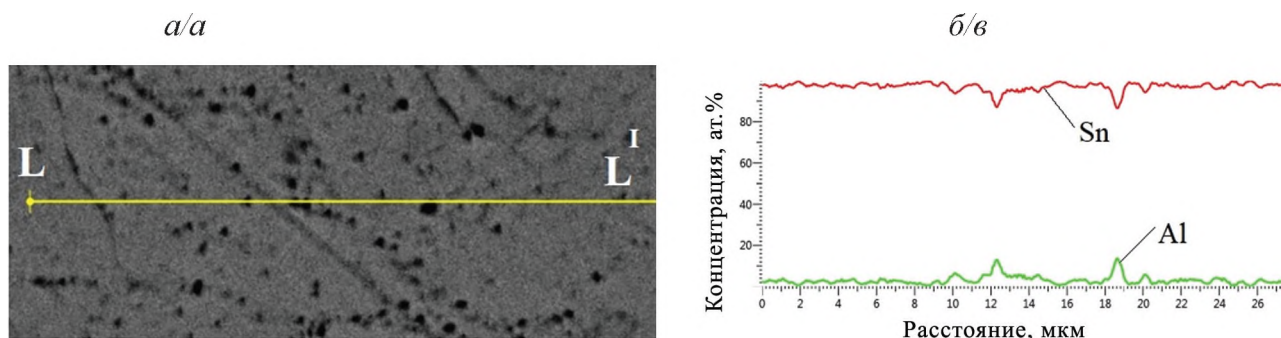


Рис. 2. Микроструктура а и распределение Al и Sn вдоль линии сканирования L–L¹ фольги сплава Al – 96,7 ат. % Sn

Fig. 2. The microstructure а and distribution of Al and Sn along the scan line L–L¹ of the foil of the alloy Al – 96,7 at. % Sn

Установленная зависимость микроструктуры от концентрации компонент связана с механизмом кристаллизации при высокоскоростном затвердевании. В используемом методе получения фольги переохлаждение расплава до начала затвердевания может достигать 100 К [9]. При глубоком переохлаждении расплава и высокой скорости теплоотвода скорость фронта кристаллизации оценивается равной нескольким метрам в секунду [10]. Согласно справочным данным, при равновесном затвердевании растворимость Al в β -Sn ничтожно мала [11]. Однако при высокой скорости движения границы раздела фаз «твердое тело – расплав», сравнимой со скоростью диффузии атомов в переохлажденном расплаве, могут реализоваться бездиффузионные механизмы затвердевания, что приводит к повышению растворимости компонент [12]. Очевидно, что для быстрозатвердевшей фольги сплавов Al-Sn около эвтектического состава с концентрацией алюминия до 3–3,5 ат. %, скорость затвердевания оказывается достаточной для бездиффузионной кристаллизации. Поскольку размеры ионов Al (51 пм) меньше размера ионов Sn (93 пм) [13], то в пересыщенном твердом растворе на основе β -Sn возникают сжимающие напряжения. В результате релаксации напряжений в процессе затвердевания происходит внутризеренная деформация двойникованием, в отличие от фольги чистого олова, где двойникование не наблюдается [14]. Рост концентрации алюминия в твердом растворе обеспечивает увеличение напряжений в решетке олова и приводит к большому количеству двойников.

В пределах ошибки измерения размеры частиц внутри зерен эвтектического и около эвтектического составов можно считать одинаковыми и постоянными по толщине фольги. Наблюдаемые через 25 ч после изготовления фольги частицы Al образуются в результате распада пересыщенных твердых растворов алюминия в β -Sn, который протекает при комнатной температуре с достаточно высокой скоростью. Высокая скорость распада твердого раствора на основе β -Sn при комнатной температуре обусловлена интенсивными диффузионными процессами, так как комнатная температура, равная 273 К, составляет 54 % от температуры плавления Sn (504 К). Повышение концентрации алюминия выше эвтектического до 3,3 ат. % обеспечивает уменьшение размеров зерна и образование большого количества границ двойников внутри зерна. Эти границы служат стоками для избыточной примеси и в объеме зерна концентрации примеси сравнимы.

Микроструктуры быстрозатвердевшей фольги сплавов с содержанием алюминия, которое существенно выше эвтектического, приведены на рис. 3. В микроструктуре фольги с концентрацией алюминия 5,8 и 9,3 ат. % Al обнаруживается увеличение размеров частиц алюминия по мере перемещения от поверхности А к поверхности В.

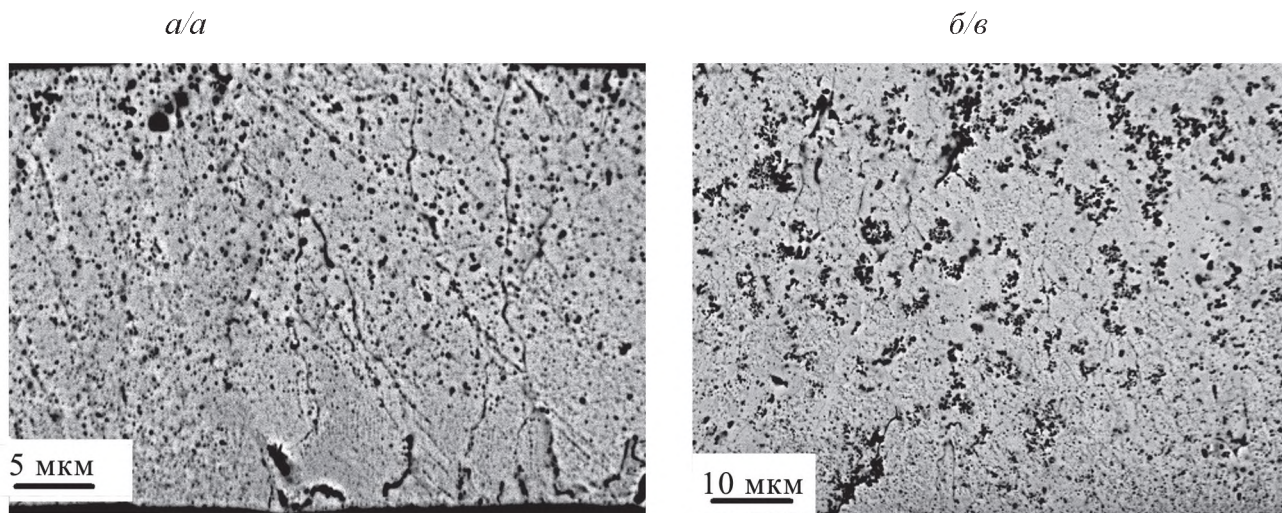


Рис. 3. Микроструктура поперечного сечения быстрозатвердевшей фольги: а – сплав Al – 95,2 ат. % Sn; б – Al – 90,7 ат. % Sn

Fig. 3. The microstructure of cross-section of rapidly solidified foil: a – alloy Al – 95,2 at. % Sn; b – Al – 90,7 at. % Sn

На рис. 4 приведены зависимости среднего размера частиц алюминия от расстояния от поверхности А, примыкающей к кристаллизатору для фольги исследованных составов. Определения размеров частиц проводились методом секущих по фотографиям микроструктуры, полученным на РЭМ при увеличении 10000 и 20000 и разрешении микроскопа 20 нм.

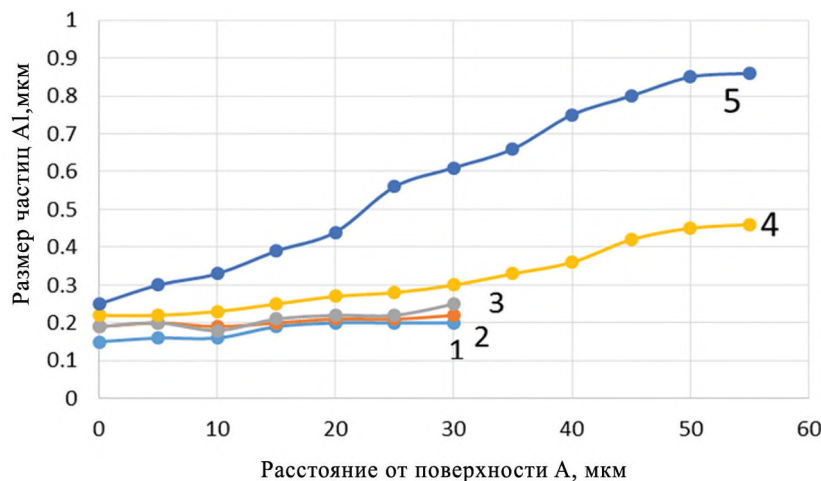


Рис. 4. Зависимость среднего размера частиц Al от расстояния до кристаллизатора для различных составов фольги: 1 – Al – 98,5 ат. % Sn; 2 – Al – 97,8 ат. % Sn; 3 – Al – 96,7 ат. % Sn; 4 – Al – 95,2 ат. % Sn; 5 – Al – 90,7 ат. % Sn

Fig. 4. Dependence of the average Al particle size on the distance to the crystallizer for various foil compositions: 1 – Al – 98,5 at. % Sn; 2 – Al – 97,8 at. % Sn; 3 – Al – 96,7 at. % Sn; 4 – Al – 95,2 at. % Sn; 5 – Al – 90,7 at. % Sn

Отличия в микроструктуре фольги сплавов около эвтектического и заэвтектического составов обусловлены различными условиями затвердевания. Толщина фольги сплавов Al – 95,2 ат. % Sn и Al – 90,7 ат. % Sn почти в 2 раза выше толщины фольги около эвтектических сплавов, что может быть обусловлено меньшей растекаемостью расплава. В относительно толстых фольгах невозможно получить одинаковые условия охлаждения для слоев, прилегающих к кристаллизатору и удаленных от него. После затвердевания нижних слоев выделяется скрытая теплота кристаллизации и переохлаждение расплава на границе раздела твердое тело – расплав уменьшается. Это означает снижение растворимости и выделение относительно крупных частиц Al из расплава. Поэтому средний размер частиц алюминия растет по толщине фольги. Однако в объеме зерна остается достаточно большое количество алюминия, образующего твердый раствор замещения и выделяющегося в виде отдельных включений участка в средней части фольги сплава Al – 90,7 ат. % Sn (рис. 5).

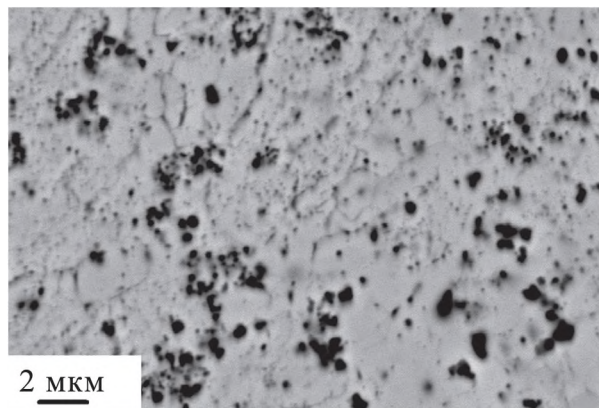


Рис. 5. Микроструктура фольги Al – 90,7 ат. % Sn

Fig. 5. The microstructure of the Al – 90,7 at. % Sn foil

В фольге сплавов Al – 95,2 ат. % Sn и Al – 90,7 ат. % Sn не обнаруживается двойников, что может быть связано с резким уменьшением размеров зерен и релаксацией напряжения за счет зернограничного проскальзывания. На рис. 5 границы зерен декорированы выделившимся слоем Al (их размер составляет 2–3 мкм).

Старение фольги при комнатной температуре для фольг около эвтектического состава проходит с уменьшением числа частиц Al в объеме зерна за счет их растворения и выделения на границах зерен и субзерен (рис. 6а). Однако для сплавов с концентрацией Al выше 3,3 ат. % при старении наблюдается растрескивание по границе зерна и рост усов. Длина усов может достигать нескольких мм (рис. 6б).

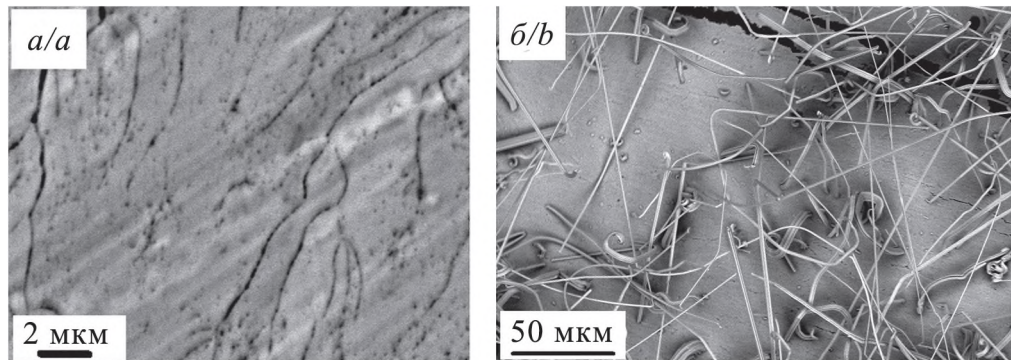


Рис. 6. Микроструктура поверхности быстрозатвердевшей фольги через 125 ч после изготовления:
а – сплав Al – 96,7 ат. % Sn; б – Al – 95,2 ат. % Sn

Fig. 6. The microstructure of surface of rapidly solidified foil after 125 h after its manufacture:
a – alloy Al – 96,7 at. % Sn; b – Al – 95,2 at. % Sn

Рост усов характерен для технически чистого олова, а также обнаруживается в сплавах Sn-Ag [15]. Считается, что основной причиной роста усов в олове является воздействие сжимающих напряжений как внутренних, так и внешних [16]. Обнаруженный рост усов приводит к ограничению использования сплавов Al-Sn заэвтектических составов с концентрацией алюминия выше 3 ат. % в качестве припоев.

Заключение

Микроструктура быстрозатвердевшей фольги сплавов Al – 98,5 ат. % Sn, Al – 97,8 ат. % Sn и Al – 96,7 ат. % Sn формируется в результате распада пересыщенного алюминием твердого раствора на основе β -Sn, что приводит к образованию наноразмерных включений алюминия, равномерно распределенных по объему фольги. В фольге сплавов Al – 95,2 ат. % Sn и 5 – Al – 90,7 ат. % Sn наблюдаются также первичные включения Al. Быстрозатвердевшая фольга сплавов системы Al-Sn микрокристаллична, размер зерен уменьшается с повышением концентрации алюминия. Предложен механизм образования микродвойников в зернах около эвтектического состава и роста усов в фольгах с концентрацией алюминия выше 3 ат. %. Проведенные исследования свидетельствуют, что сверхбыстрая закалка позволяет получать материалы для экологически чистых бессвинцовых припоев с улучшенными характеристиками.

Библиографические ссылки

1. Белов НА, Миронов АЕ, Столярова ОО. *Алюминиевые сплавы антифрикционного назначения*. Москва: Издательский Дом МИСиС; 2016. 222 с.
2. Abbas YM, Hassan Ibrahim A, Mosaad S, Orabi M. Hydrogen production using Al-Sn alloys prepared by rapid solidification. *Journal of Advances in Physics*. 2017;13(6):4971–4984. DOI: 10.24297/jap.v13i6.6194.
3. Alam ME, Gupta M. Development of extremely ductile lead-free Sn-Al solders for futuristic electronic packaging applications. *Electronic Materials Letters*. 2014;10(2):515–524. DOI: 10.1007/s13391-013-3087-1.
4. Далакова НВ, Елекова КМ, Кашежев АЗ, Манукянц АР, Прохоренко АД, Понежев МХ, Созаев ВА. Политермы углов смачивания алюминия и алюминий-литиевого сплава расплавами на основе олова. *Поверхность: Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2014;4:60–63. DOI: 10.7868/S020735281404012X.
5. Пашков ИИ, Пикунов МВ, Таволжский СА, Пашков АИ. Разработка процессов получения и применения сплавов припоев в дисперсионном состоянии с микроскопической или аморфной структурой. *Металлургия*. 2010;6:43–45.
6. Eman Dr, Abel J. Study Microstructure and Mechanical Properties of Rapidly Solidified of Al-Sn oy Melt Spinning. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*. 2015;15(4):53–61.
7. Tarek EA. Amorphous and metastable crystalline structures in rapidly solidified Sn-Al system using melt-spinning technique. *Radiation Effects & Defects in Solids*. 2004;159:535–538. DOI: 10.1080/10420150412331323041.
8. Reeve KN, Choquette SM, Anderson IE, Handwerke CA. Rapid Solidification of Sn-Cu-Al Alloys for High-Reliability, Lead-Free Solder: Part I. Microstructural Characterization of Rapidly Solidified Solders. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2016;47(12):6507–6525. DOI: 10.1007/s11661-016-3738-6.
9. Александров ВД, Постников ВА. Зависимость предкристаллизационного переохлаждения расплава висмута от массы образцов. В: *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2003;29(7):48–54.
10. Herlach DM. Nonequilibrium solidification of undercooled melts. *Materials Science Engineering*. 1994;R12(4–5):177–272. DOI: 10.1063/1.2903920.
11. Лякишева НП, редактор. *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Справочник. Москва: Машиностроение; 1996. 992 с.
12. Галенко ПК, Херлах ДМ. Бездиффузионный рост кристаллов в эвтектической системе при высокоскоростном затвердевании. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2006;130(1):170–180.

13. Никольский БП, Рабинович РА, редакторы. Справочник химика. 2-е издание. Москва –Ленинград: Химия; 1966. Том 1. 1071 с.
14. Gusakova O, Shepelevich V. The influence of melt flow on grain structure of tin and its alloys produced by ultrafast quenching from the melt. In: *Structural and Phase Transformations in Materials: Theory, Computer Modelling and Experiment. International Conference 2017 March 23–27, Ekaterinburg, Russian Federation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Ekaterinburg: [publisher unknown]; 2017. Volume 192. p. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/192/1/012015.
15. Tu KN, Changpin Chen, Albert T. Wu Stress analysis of spontaneous Sn whisker growth. *Journal of Materials Science: Materials Electronics*. 2007;18:269–282. DOI:10.1007/s10854-006-9029-z.
16. Osenbach JW, DeLucca JM, Potteiger BD, Amin A, Baiocchi FA. Sn-whiskers: truths and myths. *Journal Materials Science: Materials Electronics*. 2007;18:283–305. DOI:10.1007/s10854-0069030-6.

References

1. Belov NA, Mironov AE, Stolyarova OO. *Aluminyevye splavy antifriktsionnogo naznacheniy* [Aluminum alloys of antifriction purpose]. Moscow: Izdatelskiy Dom MISiS; 2016. 222 p. Russian.
2. Abbas YM, Hassan Ibrahim A, Mosaad S, Orabi M. Hydrogen production using Al-Sn alloys prepared by rapid solidification. *Journal of Advances in Physics*. 2017;13(6):4971–4984. DOI: 10.24297/jap.v13i6.6194.
3. Alam ME, Gupta M. Development of extremely ductile lead-free Sn-Al solders for futuristic electronic packaging applications. *Electronic Materials Letters*. 2014;10(2):515–524. DOI: 10.1007/s13391-013-3087-1.
4. Dalakova NV, Elekoeva KM, Kashezhev AZ, Manukyants AR, Prokhorenko AD, Ponezhev MKh, Sozaev VA. *Politermy uglov smachivania aluminiya i aluminiiy-litievogo splava rasplavami na osnove olova* [Polytherms of Wetting Angles of Aluminium and Aluminium Lithium Alloys by Tin Based Melts]. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2014; 4:60–63. DOI: 10.7868/S020735281404012X. Russian.
5. Pashkov IN, Pikunov MV, Tavolzhskiy SA, Pashkov AI. *Razrabotka protsessov polucheniya i primeneniya splavov pri poev v dispersionnom sostojanii s mikroskopicheskoy ili amorfnoy strukturoy* [Development of processes for the preparation and use of alloys of solders in the dispersion state with a microscopic or amorphous structure]. *Metallurg*. 2010;6:43–45. Russian.
6. Eman Dr, Abel J. Study Microstructure and Mechanical Properties of Rapidly Solidified of Al-Sn oy Melt Spinning. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*. 2015;15(4): 53–61.
7. Tarek EA. Amorphous and metastable crystalline structures in rapidly solidified Sn-Al system using melt-spinning technique. *Radiation Effects & Defects in Solids*. 2004;159:535–538. DOI: 10.1080/10420150412331323041.
8. Reeve KN, Choquette SM, Anderson IE, Handwerke CA. Rapid Solidification of Sn-Cu-Al Alloys for High-Reliability, Lead-Free Solder: Part I. Microstructural Characterization of Rapidly Solidified Solders. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2016;47(12):6507–6525. DOI: 10.1007/s11661-016-3738-6.
9. Aleksandrov VD, Postnikov VA. *Zavisimost' predkristallizatsionnogo pereokhlazhdeniya rasplava vismuta ot massy obraztsov* [Dependence of precrystallization supercooling of a bismuth melt on the mass of samples]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. 2003;29(7):48–54. Russian.
10. Herlach D.M. Nonequilibrium solidification of undercooled melts. *Materials Science Engineering*. 1994;R12(4–5):177–272. DOI: 10.1063/1.2903920.
11. Lyakisheva NP, editor. *Diagrammy sostojaniya dvoynykh metallicheskih system* [State diagrams of double metal systems. Reference]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1996. 992 p. Russian.
12. Galenko PK, Herlach DM. *Bezdiffuzionnyy rost kristallov v evtekticheskoy sisteme pri vysokoskorostnom zatverdevanii* [Diffusionless crystal growth in a eutectic system during high-speed solidification]. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*. 2006;130(1):170–180. Russian.
13. Nikolsky BP, Rabinovich RA, editors. Handbook of the chemist. 2nd edition. Moscow; Leningrad: Khimia; 1966. Part 1. 1071 p. Russian.
14. Gusakova O, Shepelevich V. The influence of melt flow on grain structure of tin and its alloys produced by ultrafast quenching from the melt. In: *Structural and Phase Transformations in Materials: Theory, Computer Modelling and Experiment. International Conference 2017 March 23–27, Ekaterinburg, Russian Federation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Ekaterinburg: [publisher unknown]; 2017. Volume 192. p. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/192/1/012015.
15. Tu KN, Chen C, Wu AT. Stress analysis of spontaneous Sn whisker growth. *Journal of Materials Science: Materials Electronics*. 2007;18:269–282. DOI:10.1007/s10854-006-9029-z.
16. Osenbach JW, DeLucca JM, Potteiger BD, Amin A, Baiocchi FA. Sn-whiskers: truths and myths. *Journal of Materials Science: Materials Electronics*. 2007;18:283–305. DOI:10.1007/s10854-0069030-6.

Статья поступила в редколлегию 04.12.2019.
Received by editorial board 04.12.2019.

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВОЙ СИСТЕМЫ «ПЫЛЬЦА РАСТЕНИЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ», В КРИМИНАЛИСТИКЕ И ЭКОЛОГИИ

С. С. ПОЗНЯК¹⁾, А. Н. ХОХ²⁾, Б. А. ТОНКОНОГОВ²⁾

¹⁾Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь,
ул. Филимонова, 25, 220114, г. Минск, Беларусь

²⁾Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

Исходными данными для создания справочной информационно-поисковой системы «Пыльца древесных, кустарниковых и травянистых растений, произрастающих на территории Республики Беларусь», послужили цифровые изображения основных таксонов растений. С помощью светового бинокулярного биологического микроскопа МИК-МЕД 6 (ЛОМО-Microsystems) при увеличении $\times 40$ исследовано внешнее строение пыльцевых зерен 32 таксонов, представляющих научный и криминалистический интерес, получены их цифровые изображения. Изучено 50 гербарных и 40 нативных образцов древесных, кустарниковых и травянистых растений. Разработана подсистема инструментальных и интерфейсных средств пользователей, база данных и тестирования, представляющая различные программные единицы и объекты (процедуры, функции, модули и формы).

Тестирование разработанной справочно-информационной поисковой системы подтвердило ее прикладное значение при решении отдельных задач в области криминалистики – выделение наиболее вероятных таксономических групп растений, сравнение найденных в исследуемом образце пыльцевых зерен с имеющимися в базе данных изображениями и эталонными препаратами. В области экологии – это выявление тератоморфных пыльцевых зерен, свидетельствующих о состоянии окружающей среды, при сравнении экспериментально полученного морфологического строения пыльцевых зерен с имеющимися нормальными характеристиками из базы данных «Информационная система идентификации растительных объектов на основе карпологических, палинологических и анатомических данных».

Ключевые слова: пыльцевые зерна; таксономический состав; справочная информационно-поисковая система; система управления базами данных; функциональная структура, алгоритмы, интерфейс.

Образец цитирования:

Позняк СС, Хох АН, Тонконогов БА. Практические аспекты использования информационно-поисковой системы «Пыльца растений, произрастающих в Республике Беларусь», в криминалистике и экологии. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;1:91–97.

For citation:

Pazniak SS, Khokh AN, Tonkonogov BA. Practical aspects of using the information and search system «Pollen of plants growing in the Republic of Belarus», in forensics and ecology. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;1:91–97. Russian.

Авторы:

Сергей Степанович Позняк – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории исследования материалов, веществ и изделий.

Анна Николаевна Хох – магистр биологических наук, заведующий лабораторией исследования материалов, веществ и изделий.

Борис Александрович Тонконогов – кандидат технических наук, доцент, заведующий учебно-методической лабораторией инновационных технологий образования.

Authors:

Sergei S. Pazniak, doctor of science (agriculture), professor; chief research fellow of the laboratory for study of materials, substances and products.

sspazniak@gmail.com

Anna N. Khokh, master of biological sciences, head of the laboratory for study of materials, substances and products.

IannIhoh@gmail.com

Boris A. Tonkonogov, PhD (engineering), docent; head of teaching laboratory of innovative technologies in education.

lito@iseu.by

PRACTICAL ASPECTS OF USING THE INFORMATION AND SEARCH SYSTEM «POLLEN OF PLANTS GROWING IN THE REPUBLIC OF BELARUS», IN FORENSICS AND ECOLOGY

S. S. PAZNIAK^a, A. N. KHOKH^a, B. A. TONKONOGOV^b

^a*Scientific and Practical Centre of the State Forensic Examination Committee of the Republic of Belarus,
25 Philimonava Street, Minsk 220114, Belarus*

^b*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Dauhahrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus*

Corresponding author: S. S. Pazniak (sspazniak@gmail.com)

The source data for the creation of a reference information-search system «Pollen of woody, shrubby and herbaceous plants growing in the Republic of Belarus» were digital images of the main taxa of plants. Using a MIKMED 6 light binocular biological microscope (LOMO-Microsystems) with magnification of x40, the external structure of pollen grains of 32 taxons of scientific and forensic interest was studied, their digital images were obtained. 50 herbarium and 40 native specimens of woody, shrubby and herbaceous plants were studied. A subsystem of user tools and front-end tools, database generation and testing has been developed, which represents various software units and objects (procedures, functions, modules and forms).

Testing of the developed reference and information retrieval system confirmed its efficiency in solving individual problems in the field of forensic science – the selection of the most likely taxonomic groups of plants and the comparison of pollen grains found in the studied sample with the images and reference drugs available in the database, and also in the field of ecology – the identification of teratomorphic pollen grains, indicating the state of the environment, by comparing the experimentally obtained morphological structure of pollen grains with the existing normal characteristics in the «Information System for the Identification of Plant Objects Based on Carpological, Palynological and Anatomical Data» of Moscow State University.

Key words: pollen grains; taxonomic composition; reference information retrieval system; database management system; functional structure, algorithms, interface.

Введение

Деревья, кустарники и травы продуцируют огромное количество пыльцы и спор (до сотен тысяч экземпляров в одном цветке). Оболочка абсолютного большинства пыльцевых и споровых зерен, обладая исключительной стойкостью к механическому, химическому и биохимическому воздействию, сохраняется длительное время. Микроскопические размеры пыльцы и спор, особенности морфологического строения, способствуют их распространению ветром, водой, насекомыми. При этом они оседают на поверхности суши, водоемов, а также на людях, животных, растениях, машинах и т. д. [1]. Изучение пыльцы и спор растений, собранных с поверхности вышеуказанных объектов, в последние годы является новым направлением экологических и криминалистических исследований. Круг решаемых вопросов с помощью метода спорово-пыльцевого анализа разнообразен [2; 3]. Получаемая информация оказывает неоспоримую помощь при раскрытии многих уголовных преступлений, дает возможность ответить на вопросы в тех случаях, когда использование других методов не приводит к достоверным данным.

Организуя работу, связанную с экспериментальным и исследовательским видом деятельности, необходимо уметь с помощью компьютеров и средств связи получать, накапливать, хранить и обрабатывать материалы, обобщая результаты в виде наглядных документов для дальнейшего анализа.

При проведении палинологических исследований, связанных с необходимостью обработки больших объемов информации, зачастую приходится работать с данными, взятыми из разных источников, каждый из которых связан с определенным направлением. Для координации деятельности по обработке этих данных необходимы специальные знания и организационные навыки, которые формализованы в виде информационно-поисковых систем (СИПС), включающих в себя ключ для определения пыльцевых зерен растений, оптические микрофотографии пыльцы и другую техническую информацию [4].

Материалы и методы исследования

В мире существует множество систем управления базами данных (СУБД). Несмотря на то что они могут по-разному работать с объектами и предоставляют пользователю различные функции и средства, большинство из них опирается на единый устоявшийся комплекс основных понятий. Для создания базы данных при проведении палинологических экспертиз была выбрана СУБД Microsoft Access, входящая в пакет Microsoft Office.

Одно из явных преимуществ продукта корпорации Microsoft Access – это возможность объединения сведений из разных источников в одной базе данных. Создаваемые в нем формы, запросы и отчеты позволяют быстро и эффективно обновлять, получать ответы на вопросы, осуществлять поиск нужных данных, анализировать их, печатать отчеты, диаграммы.

В созданной базе данных можно хранить все необходимые сведения. Доступ к ней могут иметь все сотрудники, проводящие исследования в рамках заявленного проекта, но для внесения изменений и новой информации она не будет доступна. Кроме данных, база может содержать методы и средства, позволяющие каждому из сотрудников оперировать только с теми из них, которые входят в его компетенцию. В результате взаимодействия данных, содержащихся в базе, с методами, доступными конкретным сотрудникам, образуется информация, которую они потребляют и на основании которой в пределах собственной компетенции производят их ввод и редактирование.

Понятия «база данных» и «системы управления базой данных» тесно связаны между собой. Это комплекс программных средств, предназначенных для создания структуры новой базы, наполнения ее содержимым, редактирования содержимого и визуализации информации. Под визуализацией информации базы понимается отбор отображаемых данных в соответствии с заданным критерием, их упорядочение, оформление и последующая выдача на устройства вывода или передачи по каналам связи.

Исходными данными для создания СИПС служили цифровые изображения основных таксонов древесных, кустарниковых и травянистых растений, произрастающих на территории Республики Беларусь. Всего было отобрано 50 гербарных и 40 нативных образцов растений. С помощью светового бинокулярного биологического микроскопа МИКМЕД 6 (ЛОМО-Microsystems) при увеличении $\times 40$ изучено внешнее строение пыльцевых зерен 32 таксонов, представляющих экологический и криминалистический интерес, получены их цифровые изображения [5].

Результаты исследования и их обсуждение

Для работы с атласами и эталонными коллекциями необходима качественная базовая подготовка исследователя, знание морфологии пыльцы основных таксономических групп растений, встречающихся в изучаемых образцах. Алгоритм работы сводится к выделению наиболее вероятных таксонов по морфологическим признакам на основе соответствующих знаний и сравнению найденных в образце пыльцевых зерен и спор с имеющимися изображениями и эталонными препаратами (рис. 1).

Рис. 1. Главная форма вкладки «Определитель»

Fig. 1. The main form of the «Qualifier» tab

Существует методика определения пыльцевых зерен по дихотомическим ключам, но возможности ее применения довольно ограничены [6]. Как правило, ключи составляются для какой-либо определенной

таксономической группы, региона или геологического слоя, и если исследователю попадается вид, не описанный в ключе, определить его технически невозможно. Нами предложена расширенная версия ключа, позволяющая с высокой степенью вероятности идентифицировать исследуемый вид растения (рис. 2).

Master key									
Ключ (расширенная версия)									
Table A									
Table B		A2	Зерна с воздушными мешками			Table A			
Table C		A1	Зерна без воздушных мешков						
Table D									
Table E		B2	Сложные (комбинированные) зерна			Table B			
Table F		B1	Олигомерные зерна						
Table F1									
Table F2		C3	Полудрические зерна			Table C			
Table F3		C2	Билатеральные зерна			Table D			
Table F4									
Table F5		C1	Изодиметричные зерна или зерна, где одна ось длиннее короче, редко гетерополярная						
Table F6		D2	Четырехгранные зерна			Table E			
Table F7		D1	Ротационные зерна			Table F			
Table F7 1									
Table F7 2									
Table F7 3									

Рис. 2. Главная форма вкладки «Ключ»

Fig. 2. The main form of the «Key» tab

Работать с базами данных удобнее, если их поиск осуществляется не только по таксономическим, но и морфологическим критериям. Составив краткое описание пыльцевого зерна, основные выявленные морфологические критерии и включив их в поля поиска базы данных, получаем относительно ограниченный набор таксонов, среди которого достаточно легко ориентироваться (рис. 3).

Существует ряд семейств растений, для которых характерна морфологически однообразная пыльца. Например, обнаружив пыльцевые зерна сосны, мы не сможем с уверенностью утверждать, относятся ли они к нашей обычной *Pinus sylvestris*, или к *Pinus brutia*, произрастающей в Средиземноморье [7], а у пыльцевых зерен представителей семейства Маревых (*Chenopodiaceae*) чрезвычайно сложно определить даже родовую принадлежность. Таким образом, при использовании палинологических данных для определения региона необходимо уделять особое внимание пыльцевым зернам с «яркой» морфологией, надежно определяемым таксонам и таксонам с узким ареалом.

a/a

Размер: средний.

Агрегатное состояние: монады.

Форма: изополярные: радиально-симметричные.

Очертание с экватора: эллиптические.

Очертание с полюса: треугольные или округло-треугольные.

Количество апертур: 3–4-поровые.

Характер эктоапертур: –

Характер эндоапертур: поры.

Характер поверхности: гладкая.

б/б

Агрегатное состояние: монады.

Полярность: изополярные.

Размер: средний.

Апертурный тип: 3–4-поровые.

Форма: радиально-симметричные.

Очертание с экватора: эллиптические.

Очертание с полюса: треугольные или округло-треугольные.

Эктоапертуры:

Тип: –

Длина: –

Ширина: –

Концы: –

Края: –

Рис. 3. Типы описаний пыльцевых зерен: а – краткое, б – расширенное

Fig. 3. Types of pollen grain descriptions: a – short description, b – extended

Подсистема инструментальных и интерфейсных средств пользователей СИПС. Система «Пыльца древесных, кустарниковых и травянистых растений, произрастающих на территории Республики Беларусь» разработана с учетом требований, предъявляемых к ее функциональным программным модулям и графическому пользовательскому интерфейсу, а также их особенностям.

Графический пользовательский интерфейс системы состоит из 2 форм – главной (FormJrm Treeview) и подчиненной (Form frm Reqs). При этом подчиненных форм может быть большое количество. Для каждой

из форм и ее компонентов реализован определенный программный функционал в виде процедур, функций и модулей, обуславливающий поведение при загрузке и реакцию на различные события указанных форм и их компонентов.

Для главной формы основным результатом работы вышеприведенных программных единиц является реализация и функционирование информационного многоуровневого древовидного списка, а для подчиненной – вспомогательные операции по представлению информации, визуализации растровых изображений образцов и поиску данных (рис. 4).

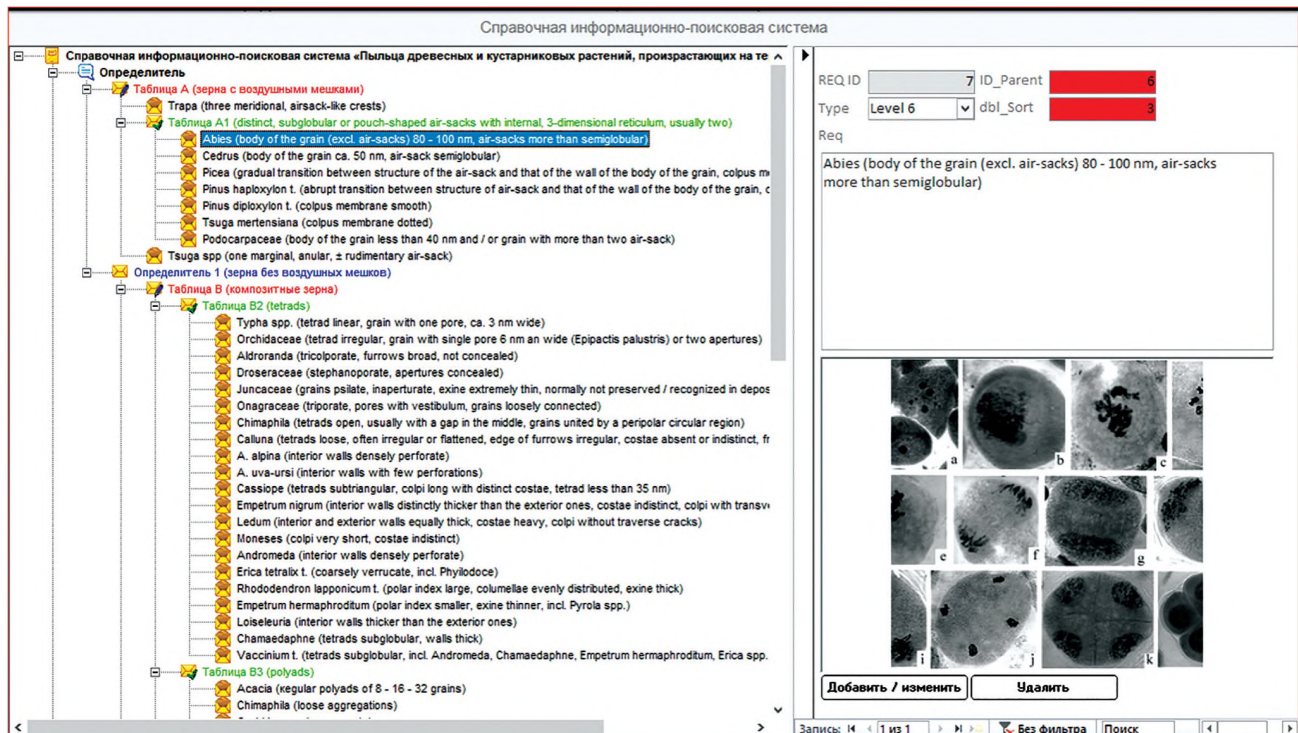


Рис. 4. Общий вид графического пользовательского интерфейса СИПС

Fig. 4. General view of the graphical user interface SIPS

Для программной реализации процедур и функций по формированию и работе с многоуровневым древовидным списком и манипуляции растровыми изображениями были созданы соответствующие алгоритмы и синтаксические конструкции на языке программирования Microsoft Visual Basic for Applications. Например, для подчиненной формы, позволяющей получать дополнительную информацию и манипулировать растровыми изображениями, реализован ряд программных процедур и функций.

Синтаксический вид и содержимое указанных алгоритмов для процедур и функций:

- проверка на наличие и размещение растрового изображения во фрейме;
- добавление ссылки на файл с растровым изображением;
- удаление ссылки на файл с растровым изображением;
- обновление фрейма с растровым изображением;
- переход к другой записи;
- вывод сообщения об ошибке;
- показ фрейма с растровым изображением;
- скрытие фрейма с растровым изображением;
- проверка наличия корректной записи расположения файла.

Формирование базы данных справочной информационно-поисковой системы происходило как путем непосредственного ввода информации в контейнерные объекты многоуровневого древовидного списка, так и с помощью заполнения соответствующих таблиц. В них хранятся следующие данные:

- пыльца древесных и кустарниковых растений с полями:
- ключевое поле контейнерного объекта;
- идентификатор типа;
- описание образца;
- идентификатор родительского объекта;
- принцип сортировки;

- название каталога (локального или сетевого) и файла с растровым изображением;
- уровни древовидного списка с полями:
- ключевое поле уровня;
- название уровня (рис. 5).

PX_Req	ID_Type	mem_Req	ID_Parent	dbl_Sort	Photo
1	1	Справочная информационно-поисковая система «Пыльца древесных и кустарниковых растений, произрастающих на территории Республики Беларусь»		1	
2	2	Определитель	1	1	
3	4	Таблица А (зерна с воздушными мешками)	2	1	
4	6	Трапа (three meridional, air-sack-like crests)	3	1	
5	6	Tsuga spp (one marginal, anular, ± rudimentary air-sack)	3	2	
6	5	Таблица А1 (distinct, subglobular or pouch-shaped air-sacks with internal, 3-dimensional reticulum, usually two)	3	1	
7	6	Abies (body of the grain (excl. air-sacks) 80 - 100 nm, air-sacks more than semiglobular)	6	3	Photo(Meiosis-in-Abies-sibirica-a-primitive-archespo
8	6	Cedrus (body of the grain ca. 50 nm, air-sack semiglobular)	6	4	
9	6	Picea (gradual transition between structure of the air-sack and that of the wall of the body of the grain, colpus membrane smooth)	6	5	
10	6	Pinus haploxylon L. (abrupt transition between structure of air-sack and that of the wall of the body of the grain, colpus membrane dotted)	6	6	
11	6	Pinus diploxylon L. (colpus membrane smooth)	6	7	
12	6	Tsuga mertensiana (colpus membrane dotted)	6	8	
13	6	Podocarpaceae (body of the grain less than 40 nm and / or grain with more than two air-sack)	6	9	
14	3	Определитель 1 (зерна без воздушных мешков)	2	1	
15	4	Таблица В (композиционные зерна)	14	2	
16	6	Scheuchzeria (dyads)	15	10	
17	5	Таблица В2 (tetrads)	15	2	
18	6	Typha spp. (tetrad linear, grain with one pore, ca. 3 nm wide)	17	11	
19	6	Orchidaceae (tetrad irregular, grain with single pore 6 nm an wide (Epipactis palustris) or two apertures)	17	12	
20	6	Aldoranda (tricolporate, furrows broad, not concealed)	17	13	
21	6	Droseraceae (stephanoporate, apertures concealed)	17	14	
22	6	Juncaceae (grains psilate, inaperturate, exine extremely thin, normally not preserved / recognized in deposits)	17	15	
23	6	Onagraceae (triporate, pores with vestibulum, grains loosely connected)	17	16	
24	6	Chimaphila (tetrads open, usually with a gap in the middle, grains united by a peripolar circular region)	17	17	
25	6	Calluna (tetrads loose, often irregular or flattened, edge of furrows irregular, costae absent or indistinct, frustillate-verrucate)	17	18	
26	6	A. alpina (interior walls densely perforate)	17	19	
27	6	A. uva-ursi (interior walls with few perforations)	17	20	
28	6	Cassiope (tetrads subtriangular, colpi long with distinct costae, tetrad less than 35 nm)	17	21	
29	6	Empetrum nigrum (interior walls distinctly thicker than the exterior ones, costae indistinct, colpi with transverse cracks)	17	22	
30	6	Ledum (interior and exterior walls equally thick, costae heavy, colpi without transverse cracks)	17	23	
31	6	Moneses (colpi very short, costae indistinct)	17	24	
32	6	Andromeda (interior walls densely perforate)	17	25	
33	6	Erica tetralix L. (coarsely verrucate, incl. Phyllocladaceae)	17	26	
34	6	Rhododendron lapponicum L. (polar index large, columellae evenly distributed, exine thick)	17	27	
35	6	Empetrum hermaphroditum (polar index smaller, exine thinner, incl. Pyrola spp.)	17	28	
36	6	Loiseleuria (interior walls thicker than the exterior ones)	17	29	
37	6	Chamaedaphne (tetrads subglobular, walls thick)	17	30	
38	6	Vaccinium L. (tetrads subglobular, incl. Andromeda, Chamaedaphne, Empetrum hermaphroditum, Erica spp., Phyllocladaceae, Oxycoccus)	17	31	
39	5	Таблица В3 (polyads)	15	3	
40	6	Acacia (xegular polyads of 8 - 16 - 32 grains)	39	32	

Рис. 5. Таблицы, хранящие фрагментарные данные о пыльце древесных и кустарниковых растений

Fig. 5. Tables storing fragmentary data on pollen from woody and shrub plants

Выполнение процедур тестирования и апробации справочной информационно-поисковой системы сопровождалось оценкой общей производительности базы данных и всех входящих в нее объектов, а также удобства использования графического пользовательского интерфейса. Система была установлена на нескольких персональных компьютерах различной производительности с разными достаточно современными версиями системы управления базами данных Microsoft Office Access и основными элементами управления графической формы Microsoft TreeView Control типа ActiveX.

Процессу функционального тестирования на предмет корректной работы с информацией, хранящейся в базе данных, и соответствующей программной отладки, подвергались различные объекты базы данных, а также программный функционал, реализованный в процедурах, функциях и модулях базы данных опосредованно через графический пользовательский интерфейс информационной системы.

По многоуровневому древовидному списку тестировались возможности быстрого отклика при работе и визуализации вложенности различных уровней и отношений «родитель – потомок», а также навигации по его элементам с одновременным вводом различных текстовых и числовых данных.

Производительность базы данных оценивалась исходя из различных объемов информационных выборок и количества пользователей, обеспечивающих удаленный множественный одновременный к ней доступ. При этом быстродействие может понизиться за счет использования недостаточно мощной и хорошо оптимизированной для эффективной многопользовательской одновременной обработки различных запросов системы управления базами данных Microsoft Office Access. Однако эта проблема не была достаточно актуальной, поскольку с информационной системой планировалась работа небольшого количества пользователей.

Тестирование подчиненной формы производилось на предмет корректной связи с местоположением файлов с растровыми изображениями образцов и их визуализации по указанной форме.

В результате функционального тестирования на предмет корректной работы с информацией, хранящейся в базе данных, и соответствующей программной отладки были выявлены и исправлены некоторые несоответствия и программные синтаксические ошибки, допущенные на стадии разработки исходного программного кода, которые приводили к некорректной и нестабильной работе различных объектов и снижению производительности базы данных.

Заключение

Разработанная подсистема инструментальных и интерфейсных средств пользователей, формирующая базы данных и тестирования, представляет различные программные единицы и объекты (процедуры, функции, модули и формы) и может быть рекомендована для специалистов природоохранного комплекса, учреждений различных отраслей промышленности, занимающихся проблемами криминалистики и охраны окружающей среды, а также студентов, магистрантов и аспирантов учреждений высшего образования биологического и юридического профилей.

Тестирование справочно-информационной поисковой системы подтвердило ее работоспособность при решении отдельных задач в области криминалистики – выделение наиболее вероятных таксономических групп растений и сравнение найденных в исследуемом образце пыльцевых зерен с имеющимися в базе данных изображениями и эталонными препаратами, а также в области экологии – выявление тератоморфных пыльцевых зерен, свидетельствующих о состоянии окружающей среды, при сравнении экспериментально полученного морфологического строения пыльцевых зерен с имеющимися нормальными характеристиками из базы данных «Информационная система идентификации растительных объектов на основе карпологических, палинологических и анатомических данных».

Библиографические ссылки

1. Дзюба ОФ. Изучение пытки из поверхностных проб для оценки качества окружающей среды. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2006;1:42–56.
2. Ибрагимова ЭЭ. Палиноморфологическая и палинотоксикологическая оценка аэротехногенного загрязнения в урбоэкосистемах. *Самарский научный вестник*. 2015;2(11):83–86.
3. Рылова ТБ. О возможности использования спорово-пыльцевого анализа в экспертных исследованиях объектов растительного происхождения. В: Дулов АВ, главный редактор. *Вопросы криминологии, криминалистики и судебной экспертизы. Сборник научных трудов*. Минск: Право и экономика; 2016. Выпуск 2(40). с. 121–126.
4. Хох АН, Позняк СС, Боброва НЛ. К вопросу автоматизации палинологических экспертных исследований. В: Рубис АС, главный редактор. *Вопросы криминологии, криминалистики и судебной экспертизы. Сборник научных трудов*. Минск: Право и экономика; 2018. Выпуск 2(44). с. 289–295.
5. Позняк СС, Прудникова КА, Конопелько ОМ, Хох АН. Перспективы мониторинга состояния природной среды с использованием спорово-пыльцевых зерен растений Республики Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2019;3:9–17.
6. Лобанов АЛ, Кирейчук АГ, Степанынц СД, Смирнов ИС. Диагностические ключи: от текстовых дихотомических до компьютерных. *Труды зоологического института Российской академии наук*. 2013;317:249–268.
7. Мейер-Меликян НР, Токарев ПИ. Особенности строения пыльцевых зерен некоторых представителей Pinaceae по данным электронной микроскопии. *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический*. 2004;109(1):19–21.

References

1. Dziuba OF. *Izuchenie pyltsy iz poverkhnostnykh prob dla otsenki kachestva okruzhayushchey sredy* [Examination of pollen from surface samples to assess environmental quality]. *Neftegazovay geologiy. Teoriy i praktika* [Oil and gas geology. Theory and practice]. 2006;1:42–56. Russian.
2. Ibragimova EE. *Palinomorfoloicheskaya i palinotoksikologicheskaya otsenka aerotekhnogennogo zagryazneniya v urboekosistemah* [Palinomorphic and palinotoxicological assessment of aerotechnogenic pollution in urban ecosystems]. *Samarskiy nauchniy vestnik* [Samara Scientific Herald]. 2015;2(11):83–86. Russian.
3. Rylova TB. *O vmozhnosti ispolsovaniy sporovo-pyltsevoogo analiza v ekspertnykh issledovaniakh ob'ektov rastitel'nogo proiskhozhdeniy* [On the possibility of using spore-pollen analysis in expert studies of plant objects]. In: Dulov AV, general editor. *Voprosy kriminologii, krivinalistiki i sydebnoy ekspertizy. Sbornik nauchnykh trudov* [Issues of criminology, forensics and forensics]. Minsk: Pravo i ekonomika; 2016. Issue 2(40). p.121–126. Russian.
4. Khokh AN, Pazniak SS, Bobrova NL. *K voprosy avtomatizatsii palinologicheskikh ekspertnykh issledovaniy* [On the issue of automation of palynological expert studies]. In: Rubis AS, general editor. *Voprosy kriminologii, krivinalistiki i sydebnoy ekspertizy. Sbornik nauchnykh trudov* [Issues of criminology, forensics and forensics]. Minsk: Pravo i ekonomika; 2018. Issue 2(44). p. 289–295. Russian.
5. Pazniak SS, Prudnikova KA, Konopelko OM, Khokh AN. *Perspektivy monitoring sostojania prirodnoysredy s ispolsovaniem sporovo-pyltsevykh zeren rasteniy Respubliki Belarus* [Prospects for monitoring the state of the environment using spore-pollen grains of plants of the Republic of Belarus]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya* [Journal of Belarusian State University. Ecology]. 2019;3:9–17. Russian.
6. Lobanov AL, Kireychuk AG, Stepanyants SD, Smirnov IS. *Diagnosticheskie klyuchi: ot tekstovykh dikhotomicheskikh do komputernykh* [Diagnostic keys: from text dichotomous to computer]. *Trudy zoologicheskogo instituta Rossijskoj akademii nauk* [Proceedings of the Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences]. 2013;317:249–268. Russian.
7. Meyer-Melikian NP, Tokarev PI. *Osobennosti stroeniya pyiltsevykh zeren nekotorykh predstaviteley Pinaceae po dannym elektronnoy mikroskopii* [The structural features of pollen grains of some representatives of Pinaceae according to electron microscopy]. *Bulleten' Moskovskogo Obshchestva Ispytatelei Prirody. Otdel Biologicheskii*. 2004;109(1):19–21. Russian.

Статья поступила в редакцию 21.02.2020.
Received by editorial board 21.02.2020.

СОДЕРЖАНИЕ

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Шушунова Т. Н. Живой город как критерий экологической и социальной устойчивости городского пространства	4
---	---

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

Волосач М. В. Оценка поврежденности личинками минирующей мухи <i>Chromatomyia aprilina</i> Goureaux, 1851 листовой поверхности жимолости обыкновенной (<i>Lonicera xylosteum</i> L.) в условиях насаждений Центрального ботанического сада НАН Беларуси	13
Жук Е. Ю., Мельник М. В., Бодрова Е. И., Рябцев А. О. Эколого-фаунистическая оценка состояния паразитоценозов животных Минского зоопарка	17
Лосева Л. П., Крупская Т. К., Анучин С. Н., Ануфрик С. С. Комплексная оценка фиторемедиационной способности ряда сельскохозяйственных культур для восстановления загрязненных тяжелыми металлами почв	23
Рогинский А. С. Трофические связи каштановой минирующей моли (<i>Cameraria ohridella</i> Deschka & Dimić) в условиях Беларуси	32
Сушко Г. Г. Методы многомерного анализа данных в синэкологии насекомых	38

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Вялкина Н. Н., Кадукова Е. М., Цуканова Е. В., Шафорост К. Н., Фабушева К. М., Абдуллаев А. С., Шамилов Э. Н. Радиомодифицирующее действие комплекса инозина с СО(II) при облучении мышей линии С57BL/6	46
Киевицкая А. И. Бенчмарк-эксперименты на подкритической сборке ЯЛПА-тепловая	54

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

Снытков Е. В., Кипень В. Н., Мельнов С. Б. Роль генетической компоненты в различных типах зависимости: анализ результатов полногеномного поиска ассоциаций	61
Тарун Е. И., Юшкевич М. А. Антиоксидантная активность молочных смесей для детского питания	75

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Гусакова О. В., Скибинская А. Н., Шульа Ю. М. Экологически чистые бессвинцовые материалы для пайки на основе быстрозатвердевшей фольги Al-Sn (микроструктура и стабильность)	83
Позняк С. С., Хох А. Н., Тонконогов Б. А. Практические аспекты использования информационно-поисковой системы «Пыльца растений, произрастающих в Республике Беларусь», в криминалистике и экологии	91

CONTENTS

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

<i>Shushunova T. N.</i> Living city as a criterion of social and ecological sustainability of urban space.	4
---	---

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Volosach M. V.</i> Assessment of damage caused by mining fly <i>Chromatomyia aprilina</i> Goureau, 1851 larvae to leaf surface of fly honeysuckle (<i>Lonicera xylosteum</i> L.) in the conditions of Central Botanical Gardens of the National Academy of Sciences of Belarus	13
<i>Zhuk A. Yu., Melnik M. V., Bodrova E. I., Ryabtsev A. O.</i> Ecological faunal assessment of animals parasitocenosis condition of the Minsk Zoo.	17
<i>Loseva L. P., Krupskaya T. K., Anuchin S. N., Anufriuk S. S.</i> Comprehensive evaluation of the phytoremedital ability of a number of agricultural crops for the restoration of polluted soils with heavy metals	23
<i>Roginsky A. S.</i> The trophic relations of the horse chestnut leaf-miner (<i>Cameraria ohridella</i> Deschka & Dimič) in the conditions of Belarus	32
<i>Sushko G. G.</i> Methods of multivariate data analysis in insects synecology	38

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Veyalkina N. N., Kadukova A. M., Tsukanova A. V., Shafarost K. N., Fabusheva K. M., Abdullayev A. S., Shamilov E. N.</i> Radiomodifying effect of the inozine complex with CO(II) in the irradiation C57BL/6 line mice	46
<i>Kiyavitskaya H. I.</i> Benchmark experiments at YALINA-Thermal subcritical assembly	54

MEDICAL ECOLOGY

<i>Snytkov E. V., Kipen V. N., Melnov S. B.</i> The role of genetic component in various types of addiction: the analysis of the results of genome-wide association studies	61
<i>Tarun E. I., Yushkevich M. A.</i> Antioxidant activity of dairy mixtures for child nutrition	75

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Gusakova O. V., Skibiskaya H. N., Shulya Yu. M.</i> Environmentally friendly lead-free soldering materials based on rapidly solidified Al-Sn foil (microstructure and stability)	83
<i>Pazniak S. S., Khokh A. N., Tonkonogov B. A.</i> Practical aspects of using the information and search system «Pollen of plants growing in the Republic of Belarus», in forensics and ecology	91

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.
№ 1. 2020**

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.

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. Корневская*
Технический редактор *М. Ю. Мошкова*
Корректор *М. Ю. Мошкова*

Подписано в печать 25.03.2020.
Тираж 100 экз. **Заказ .**

Республиканское унитарное предприятие
«Информационно-вычислительный центр
Министерства финансов Республики Беларусь»
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014.
Ул. Кальварийская, 17, 220004, Минск.

© БГУ, 2020

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 1. 2020**

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.

E-mail: jecology@bsu.by

«Journal of the Belarusian State University. Ecology»
published since September, 2017.
Until August, 2017 named «Ekologičeskii vestnik»
(ISSN 1994-2087).

Editor *L. M. Korenevskaya*
Technical editor *M. Yu. Moshkova*
Proofreader *M. Yu. Moshkova*

Signed print 24.03.2020.
Edition 100 copies. **Order number .**

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.

© BSU, 2020