



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

Published since September, 2017
(until 2017 – «Ecologicheskij Vestnik»)
Issued once a quarter

2

2018

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Главный редактор** **МАСКЕВИЧ С. А.** – доктор физико-математических наук, профессор; Белорусский государственный университет, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Минск, Беларусь.
E-mail: direktor@iseu.by
- Заместитель главного редактора** **ПОЗНЯК С. С.** – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; Белорусский государственный университет, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Минск, Беларусь.
E-mail: pazniak@iseu.by
- Батян А. Н.** Белорусский государственный университет, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Минск, Беларусь.
- Герменчук М. Г.** ГНТУ «Центр по ядерной и радиационной безопасности» МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь.
- Голубев А. П.** Белорусский государственный университет, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Минск, Беларусь.
- Головатый С. Е.** Белорусский государственный университет, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Минск, Беларусь.
- Гричик В. В.** Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
- Дардынская И. В.** Центр всемирного здоровья «Великие озера», Чикаго, США.
- Зафранская М. М.** Белорусский государственный университет, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Минск, Беларусь.
- Кильчевский А. В.** Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
- Ленгфельдер Э.** Радиологический институт здоровья и окружающей среды имени Отто Хуга, Мюнхен, Германия.
- Либератос Г.** Афинский технический университет, Афины, Греция.
- Логинов В. Ф.** Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
- Медведев С. В.** ГНУ «Объединенный институт проблем информатики» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
- Степанов С. А.** Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Россия.
- Стожаров А. Н.** Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь.
- Тарутин И. Г.** ГУ «РНПЦ онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова», Минск, Беларусь.
- Шишко Я.** Варшавский университет сельского хозяйства, Варшава, Польша

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief	MASKEVICH S. A. , Doctor of Physics and Mathematics, Professor; Belarusian State University, International Sakharov Environmental Institute, Minsk, Belarus. E-mail: direktor@iseu.by
Deputy editor-in-chief	POZNYAK S. S. , Doctor of Agricultural Sciences, Professor; Belarusian State University, International Sakharov Environmental Institute, Minsk, Belarus. E-mail: pazniak@iseu.by
<i>Batyan A. N.</i>	Belarusian State University, International Sakharov Environmental Institute, Minsk, Belarus.
<i>Hermenchuk M. G.</i>	State Scientific and Technical Institution «Center for Nuclear and Radiation Safety» of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Golubev A. P.</i>	Belarusian State University, International Sakharov Environmental Institute, Minsk, Belarus.
<i>Golovaty S. E.</i>	Belarusian State University, International Sakharov Environmental Institute, Minsk, Belarus.
<i>Grichik V. V.</i>	Belarusian State University, Minsk, Belarus
<i>Dardynskaya I. V.</i>	World Health Center «Great Lakes», Chicago, USA.
<i>Zafranskaya M. M.</i>	Belarusian State University, International Sakharov Environmental Institute, Minsk, Belarus.
<i>Kilchevsky A. V.</i>	National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Lengfelder E.</i>	Otto Hug Radiological Institute for Health and Environment, Munchen, 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.
<i>Szyszko J.</i>	Warsaw University of Life Sciences, Warsaw, Poland.

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

УДК 574

МОБИЛИЗАЦИЯ КАФЕДР ЮНЕСКО ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ НА КУРС ДЕЙСТВИЙ ПО ПОВЕСТКЕ ДНЯ 2030

Л. ТРЕМБЛЕ¹⁾, Н. В. ГОНЧАРОВА²⁾

¹⁾Департамент «Естественные науки», Отдел научной политики и наращивания потенциала,
ЮНЕСКО, 7, Фонтенуа, F-75352, Париж 07 SP, Франция

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

Представлены результаты Женевской конференции 5–7 июля 2017 г., организованной в связи с 25-летием Программы ЮНЕСКО ЮНИТВИН/кафедры ЮНЕСКО. Ее материалы и решения призваны способствовать эффективному сотрудничеству кафедр ЮНЕСКО по естественным наукам между собой, а также с ЮНЕСКО в деле реализации Целей устойчивого развития (ЦУР) Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года.

Ключевые слова: ЮНЕСКО; менеджмент; окружающая среда; экология; устойчивое развитие; экологическое образование.

Образец цитирования:

Трембле Л., Гончарова Н. В. Мобилизация кафедр ЮНЕСКО по естественным наукам на курс действий по Повестке дня 2030 // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 4–9.

For citation:

Trembley L., Goncharova N. V. Mobilising UNESCO chairs in natural sciences for policy action towards the 2030 agenda. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 4–9 (in Russ.).

Автор:

Лео Трембле – координатор проекта «Мобилизация кафедр ЮНЕСКО в области естественных наук в направлении Повестки дня 2030 года».

Надежда Вячеславовна Гончарова – кандидат биологических наук, доцент; профессор кафедры экологического мониторинга и менеджмента, заведующий кафедрой ЮНЕСКО.

Author:

Leo Trembley, coordinator of the project «Mobilization of UNESCO Chairs in the field of natural sciences in the direction of the Agenda of 2030».

l.trembley@unesco.org

Nadezhda V. Goncharova, PhD (biology), associate professor; professor of the department of environmental monitoring and management, head of UNESCO chair.

goncharova@iseu.by

MOBILISING UNESCO CHAIRS IN NATURAL SCIENCES FOR POLICY ACTION TOWARDS THE 2030 AGENDA

L. TREMBLEY^a, N. V. GONCHAROVA^b

^aUNESCO, Department «Natural Science», Division of Science Policy and Capacity Building,
Place Fontenoy, 7, F-75352 Paris 07 SP, France

^bBelarusian State University, International Sakharov Environmental Institute,
Dolgobrodskaya street, 23/1, 220070, Minsk, Belarus

Corresponding author: N. V. Goncharova (goncharova@iseu.by)

The results of the Geneva conference held on July 5–7, 2017, organized in connection with the 25th anniversary of UNESCO's UNITWIN / UNESCO Chairs program, aimed at facilitating the effective collaboration of the UNESCO Chairs in Natural Sciences among themselves, as well as with UNESCO in the implementation of the Sustainable Development Goals (SD) of the Agenda day in the field of sustainable development for the period until 2030.

Key words: UNESCO, management, environment, ecology, sustainable development; ecological education.

Введение

ЮНЕСКО – уникальная международная организация, определяющая стратегию сотрудничества государств в области образования, науки, культуры и коммуникации [1; 2]. Благодаря своему высокому международному авторитету, она влияет на формирование государственной политики и осуществляет масштабные культурные, образовательные, информационные и научные программы. В разработанном ЮНЕСКО в 1991 г. Всемирном плане действий по усилению межвузовского (межуниверситетского) сотрудничества и академической мобильности, известном под названием ЮНИТВИН (аббревиатура с английского языка, означающая «породнение университетов через создание университетских сетей»), важнейшими и взаимодополняемыми компонентами явились международные кафедры ЮНЕСКО и университетские сети.

ЮНЕСКО выступает в данном случае как катализатор общественного мнения в пользу повышения роли высшего образования в обществе, расширения и обогащения межвузовского взаимодействия и может оказывать финансовое содействие в осуществлении проектов, предложенных кафедрами, в случае их одобрения самой ЮНЕСКО.

Результаты исследования и их обсуждение

В Женеве 5–7 июля 2017 г. была организована конференция в связи с исполняющимся 25-летием Программы ЮНЕСКО ЮНИТВИН/кафедры ЮНЕСКО, цель которой – способствовать эффективному взаимодействию кафедр ЮНЕСКО по естественным наукам между собой, а также сотрудничеству с ЮНЕСКО в деле реализации целей устойчивого развития (ЦУР) Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года [3].

В работе конференции приняли участие представители 158 кафедр ЮНЕСКО со всех регионов мира.

Республика Беларусь была представлена профессором В. Г. Баштовым – заведующим кафедрой ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» Белорусского национального технического университета и доцентом Н. В. Гончаровой – руководителем кафедры ЮНЕСКО «Радиация и менеджмент окружающей среды» Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета.

Конференция явилась вторым глобальным представительным мероприятием в жизни кафедр ЮНЕСКО. Первое событие – Всемирный форум кафедр ЮНЕСКО, посвященный 10-летию Программы ЮНЕСКО ЮНИТВИН/кафедры ЮНЕСКО, проходил в 2002 г. в штаб-квартире ЮНЕСКО.

Сегодня в реализации Программы участвуют более 700 кафедр ЮНЕСКО, действующих в 116 странах мира, из которых более 170 функционируют в области естественных наук (рис. 1).

По регионам мира кафедры ЮНЕСКО распределены следующим образом: Европа и Северная Америка – 49 %, Латинская Америка и страны Карибского бассейна – 17 %, Азия и Тихоокеанский регион – 14 %, Африка – 12 %, Арабские страны – 8 %.

По направлениям деятельности: естественные науки – 35 %, социальные и гуманитарные науки – 25 %, образование – 20 %, культура – 15 %, коммуникация и информатика – 5 %.

Our Science Chairs and Networks

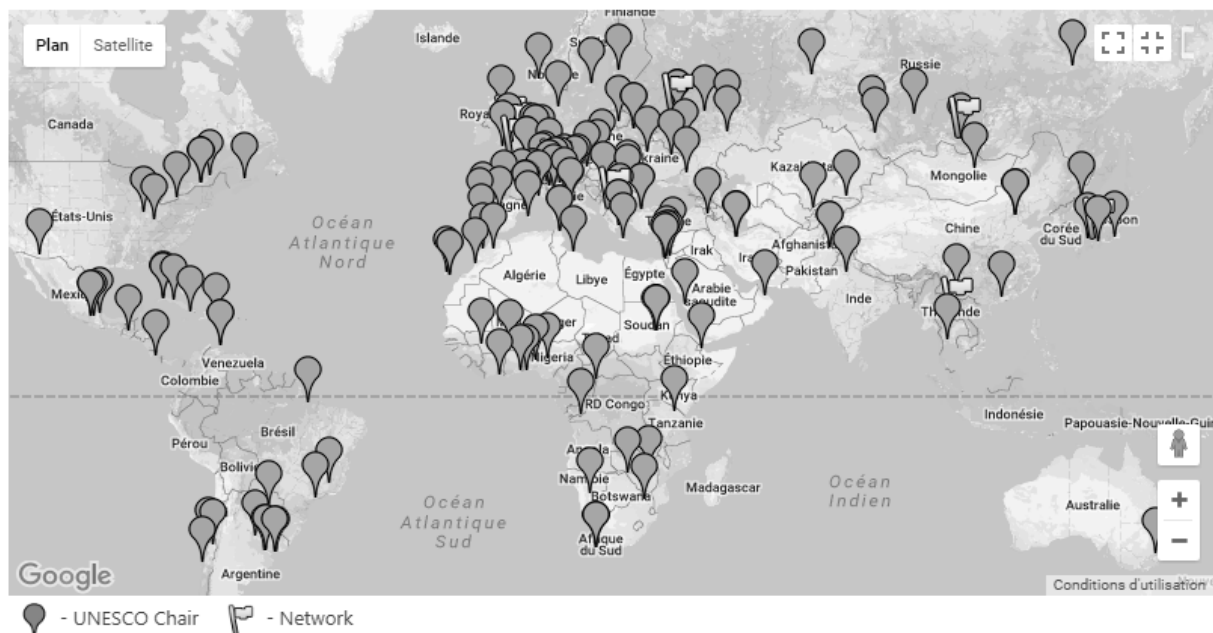


Рис. 1. ЮНИТВИН / кафедры ЮНЕСКО

Fig. 1. UNITWIN / UNESCO Chairs

По регионам мира кафедры ЮНЕСКО по естественным наукам распределились следующим образом: 54 % – Европа и Северная Америка, 15 % – Латинская Америка и страны Карибского бассейна, 14 % – Азия и Тихоокеанский регион, 9 % – Африка, 8 % – Арабские страны.

25 сентября 2015 г. Генеральная Ассамблея ООН на 70-й сессии приняла Резолюцию 70/1 «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» (в дальнейшем – Повестка дня 2030) [3].

В документе 193 государства-члены ООН взяли обязательства обеспечивать устойчивый, всеохватывающий и поступательный рост, социальную интеграцию и защиту окружающей среды, намереваясь достичь их, находясь в партнерстве и в условиях мира. Принятие Повестки дня 2030 года стало результатом непрерывного многостороннего диалога и горячих дебатов, начатых в рамках Конференции ООН по проблемам окружающей человека среды 1972 г., проходивших вплоть до Саммита ООН по устойчивому развитию в 2015 г. На протяжении более сорока лет международное сообщество стремилось найти решения стоящих перед ним экологических, социальных и экономических проблем. В ходе широкомасштабных переговоров было решено, что именно национальные правительства несут первоочередную ответственность за выполнение Повестки дня 2030.

В преамбуле к этому документу отмечается: «Настоящая Повестка дня — это план действий для людей, планеты и процветания. Она также направлена на укрепление всеобщего мира в условиях большей свободы. Мы признаем, что ликвидация нищеты во всех ее формах и проявлениях, включая крайнюю бедность, является важнейшей глобальной задачей и одним из необходимых условий устойчивого развития. Этот план будет осуществляться всеми странами и всеми заинтересованными сторонами, действующими в совместном партнерстве... [3].

Семнадцать целей в области устойчивого развития и 169 задач, которые мы объявляем сегодня, свидетельствуют о масштабности и амбициозности новой всеобщей повестки дня. Поставленные цели и задачи будут стимулировать в ближайшие 15 лет деятельность в областях, имеющих огромное значение для человечества и планеты» (рис. 2).

Утвердив Повестку дня в области устойчивого развития на период до 2030 года и ее 17 целей, мировое сообщество в очередной раз подтвердило свою приверженность этой исключительно важной теме. Поскольку ЦУР были сформулированы в результате широкомасштабных политических переговоров и отдельных консультаций, они не совершенны, но, бесспорно, отражают наиболее насущные и всеобщие потребности современного мира. Цели в области развития помогают интерпретировать основные принципы и ценности, заложенные в основу Повестки дня 2030, с точки зрения конкретных и измеримых результатов.

	Повсеместная ликвидация нищеты во всех ее формах.
	Ликвидация голода, обеспечение продовольственной безопасности и улучшения питания, содействие устойчивому развитию сельского хозяйства.
	Обеспечение здорового образа жизни и содействие благополучию для всех в любом возрасте.
	Обеспечение всеохватного и справедливого качественного образования, поощрение возможности обучения на протяжении всей жизни для всех.
	Обеспечение гендерного равенства, расширение прав и возможностей всех женщин и девочек.
	Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов, а также и санитарии для всех.
	Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех.
	Содействие поступательному, всеохватному и устойчивому экономическому росту, полной и производительной занятости и достойной работе для всех.
	Создание стойкой инфраструктуры, содействие всеохватной и устойчивой индустриализации и инновациям.
	Сокращение неравенства внутри стран и между ними.
	Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов.
	Обеспечение перехода к рациональным моделям потребления и производства.
	Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями.
	Сохранение и рациональное использование океанов, морей и морских ресурсов в интересах устойчивого развития.
	Защита и восстановление экосистем суши и содействие их рациональному использованию, рациональное лесопользование, борьба с опустыниванием, прекращение и обращение вспять процесса деградации земель и прекращение процесса утраты биоразнообразия.
	Содействие построению миролюбивого и открытого общества в интересах устойчивого развития, обеспечение доступа к правосудию для всех и создание эффективных, подотчетных и основанных на широком участии учреждений на всех уровнях.
	Укрепление средств осуществления и активизация работы в рамках Глобального партнерства в интересах устойчивого развития.

Рис. 2. Цели в области устойчивого развития

Fig. 2. Goals in the field of sustainable development

Деятельность кафедры ЮНЕСКО «Радиация и менеджмент окружающей среды» МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ направлена на реализацию следующих целей устойчивого развития Повестки дня 2030:

Цель 4. Обеспечение всеохватного и справедливого качественного образования, поощрение возможности обучения на протяжении всей жизни для всех.

Цель 7. Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех.

Цель 15. Защита и восстановление экосистем и содействие их рациональному использованию, рациональное лесопользование, борьба с опустыниванием, прекращение и обращение вспять процессов деградации земель и утраты биоразнообразия.

Женевская конференция посвящена определению путей вклада кафедр ЮНЕСКО по естественным наукам в реализацию Повестки дня 2030 и определению вызовов, возможностей и сдерживающих факторов, которые могут иметь место, а также разработке направлений по усилению кооперации между кафедрами на глобальном и региональном уровнях. При этом они должны обеспечивать возможности удовлетворения встречных интересов со стороны частного сектора и международных организаций.

Работа трех секций была посвящена решению следующих вопросов:

1. Усиление вклада кафедр ЮНЕСКО по естественным наукам в реализацию ЦУР.
2. Усиление динамики и взаимосвязей в рамках Программы ЮНЕСКО ЮНИТВИН/Кафедры ЮНЕСКО.
3. Расширение охвата и партнерства.

Отдельное заседание было посвящено международным инициативам по защите научного капитала и, в частности, предотвращению утечки научных кадров из стран с высокими уровнями рисков.

Во время конференции ее участники ознакомились с деятельностью кафедр ЮНЕСКО благодаря выставке постеров, подготовленных каждой кафедрой. В рамках проведения конференции была организована экскурсия в Европейскую организацию по ядерным исследованиям (ЦЕРН), во время которой участники конференции ознакомились с проведением экспериментов на Большом адронном коллайдере, в частности, на детекторе АТЛАС, с помощью которого было установлено существование бозона Хиггса.

Содержательным и полезным было выступление директора Мирового альянса по эффективным решениям при фонде Солнечный импульс «World Alliance for Efficient Solutions at Solar Impulse Foundation» Марионы Эндерлайн. Эта организация в настоящее время реализует очень амбициозный проект по осуществлению длительных авиaperелетов на летательных аппаратах, использующих исключительно солнечную энергию.

Конференция завершилась принятием итогового документа «Женевский этап» (Geneva Milestone), который нацеливает кафедры ЮНЕСКО в области естественных наук на деятельность и сотрудничество по конкретным направлениям. В первую очередь в нем содержится призыв «поддерживать ценности ЮНЕСКО, включая те из них, которые определены Повесткой дня 2030, в деятельности кафедр ЮНЕСКО как на организационном уровне, так и при реализации научно-исследовательских, образовательных и социально-ориентированных программ».

Кроме того, этот документ предлагает:

- определить основные цели устойчивого развития (ЦУР) для каждой кафедры ЮНЕСКО, при осуществлении которых она может внести наиболее существенный вклад;
- поощрять взаимодействие между кафедрами по смежным направлениям, в частности, для реализации совместных пилотных проектов по достижению ЦУР;
- поощрять кафедры ЮНЕСКО на включение вопросов Повестки дня 2030 в содержание своих со-вещаний, конференций и форумов;
- стимулировать Национальные комиссии по делам ЮНЕСКО на отстаивание интересов кафедр ЮНЕСКО перед такими заинтересованными структурами, как правительство, гражданское общество, фонды, частный сектор и международные организации;
- создать платформу по обмену знаниями, связанными с достижением ЦУР, для облегчения обмена информацией и контактов между самими кафедрами ЮНЕСКО в области естественных наук, а также и с другими партнерами;
- усилить коммуникационную и информационную работу с целью пропаганды достижений в деятельности кафедр ЮНЕСКО, касающейся реализации ЦУР, включая специализированные веб-сайты и другие средства открытого доступа.

Заключение

Новый этап перехода мирового сообщества к устойчивому развитию тесно связан с формированием новой концепции образования, в которой ОУР начинает играть если пока не доминирующую, то все более активную роль. Как подчеркивается в Инчхонской декларации, необходимо срочно сформулировать

единую обновленную повестку дня в области образования, которая оказалась бы всесторонней, масштабной, стимулирующей и охватывающей всех без исключения [4]. Эта новая концепция кратко сформулирована в ЦУР № 4 «Обеспечить инклюзивное и справедливое качественное образование и создать возможности для обучения на протяжении всей жизни для всех» и более широко – в соответствующих уже принятых целевых показателях. Упомянутая преобразующая и универсальная цель ориентирована на завершение реализации задач повестки дня образования для всех, а также задач, связанных с ЦРТ и призвана содействовать решению глобальных и национальных проблем в области образования [3]. Оптимальный переход современного образования в Республике Беларусь к ОУР будет связан с внедрением уже разработанных рекомендаций последних форумов ООН и ЮНЕСКО по ОУР, дальнейшим расширением концепции устойчивого развития за пределы преимущественно экологического видения, а также с разработкой критериев и индикаторов образования в интересах устойчивого развития [5]. Несмотря на то, что экологическая составляющая образования в настоящее время превалирует в той форме образования, которым большинство педагогов считает ОУР, это лишь начало формирования новой системной модели образования в интересах устойчивого развития. К экологической составляющей ОУР будут добавлены: модель опережающего образования, видение образования на базе концепции «устойчивой безопасности», глобальная модель образования [6].

Образование XXI в., основанное на стратегии устойчивого развития цивилизации, не будет транслировать из поколения в поколение неустойчивый, во многом патологический образ жизни современных поколений, общечеловеческие архаичные ценности, знания и умения, приближающие глобальную экокатастрофу. Становясь темпорально-непрерывным и всеобще-глобальным, ОУР будет передавать нынешним и будущим поколениям информацию и ценности, направленные на выход из глобальных кризисов и выживание человечества, становление глобального информационного общества как первой ступени сферы разума [6].

Библиографические ссылки

1. UNITWIN/UNESCO Chairs Programme. URL: <https://en.unesco.org/unitwin-unesco-chairs-programme> (дата обращения: 20.05.2018).
2. How, together, we contribute to the Sustainable Development Goals. URL: <https://en.unesco.org/sc-chairs-conference> (дата обращения: 20.05.2018).
3. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. С. 22. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/> (дата обращения: 20.05.2018).
4. Инчхонская декларация Образование 2030: обеспечение всеобщего инклюзивного и справедливого качественного образования и обучения на протяжении всей жизни. URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002331/233137r.pdf> (дата обращения: 20.05.2018).
5. Rockström J., Steffen W., Noone K., et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity // *Ecology and Society*. 2009. Vol. 14, № 2. P. 32–38. URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/> (дата обращения: 20.05.2018).
6. Ключевая роль образования в достижении Целей устойчивого развития. URL: http://enotabene.ru/pr/article_18218.html (дата обращения: 20.05.2018).

References

1. UNITWIN/UNESCO Chairs Programme. URL: <https://en.unesco.org/unitwin-unesco-chairs-programme> (date of access: 05.20.2018).
2. How, together, we contribute to the Sustainable Development Goals. URL: <https://en.unesco.org/sc-chairs-conference> (date of access: 05.20.2018).
3. Transformation of our world: An Agenda for Sustainable Development for the period until 2030. C. 22. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/> (date of access: 05.20.2018).
4. Incheon Declaration Education 2030: ensuring inclusive and equitable quality education and lifelong learning. URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002331/233137r.pdf> (date of access: 05.20.2018).
5. Rockström J., Steffen W., Noone K., et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*. 2009. Vol. 14, No. 2. P. 32–38. URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/> (date of access: 05.20.2018).
6. Role of education in the achievement of the goals of sustainable development. URL: http://enotabene.ru/pr/article_18218.html (date of access 05.20.2018).

Статья поступила в редколлегию 10.05.2018.
Received by editorial board 10.05.2018.

ИЗУЧЕНИЕ

И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY

AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 591.95:632.7(476)

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ, ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ И ХОРОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА ИНВАЗИВНЫХ ВИДОВ ЧЛЕНИСТОНОГИХ-ФИТОФАГОВ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ ГРОДНЕНСКОГО ПОНЕМАНЯ

Е. И. ГЛЯКОВСКАЯ¹⁾, Д. Г. ЖОРОВ²⁾, А. В. РЫЖАЯ¹⁾, С. В. БУГА²⁾

¹⁾Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
пер. Доватора, 3/1, 230012, г. Гродно, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

В состав комплекса чужеродных для фауны Беларуси видов растительноядных членистоногих, повреждающих декоративные древесные растения в условиях зеленых насаждений Гродненского Понеманья входит 38 видов насекомых и клещей из 30 родов, 11 семейств и 9 надсемейств насекомых (Insecta s. str или Ectognatha) и паукообразных

Образец цитирования:

Гляковская Е. И., Жоров Д. Г., Рыжая А. В., Буга С. В. Экологическая, таксономическая и хорологическая структура комплекса инвазивных видов членистоногих-фитофагов зеленых насаждений Гродненского Понеманья // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 10–17.

For citation:

Hliakouskaya K. I., Zhorov D. G., Ryzhaya A. V., Buga S. V. Ecological, taxonomic and zoogeographic structure of complex of invasive phytophagous arthropods in green stands in Grodno Poneman Region. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 10–17 (in Russ.).

Авторы:

Екатерина Ивановна Гляковская – лаборант кафедры зоологии и физиологии человека и животных факультета биологии и экологии.

Дмитрий Георгиевич Жоров – кандидат биологических наук; доцент кафедры зоологии биологического факультета.

Александра Васильевна Рыжая – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры зоологии и физиологии человека и животных факультета биологии и экологии.

Сергей Владимирович Буга – доктор биологических наук, профессор; заведующий кафедрой зоологии биологического факультета.

Authors:

Katsiaryna I. Hliakouskaya, laboratory assistant of the department of zoology and physiology of human and animals, biology and ecology faculty.

ekaterina.g91@mail.ru

Dmitrii G. Zhorov, PhD (biology); associate professor of the department of zoology, biology faculty.

zhorovDG@mail.ru

Alexandra V. Ryzhaya, PhD (biology); associate professor of the department of zoology, biology faculty.

ryzhaya@mail.ru

Buga V. Sergej, doctor of science (biology), professor; head of the department of zoology, biology faculty.

sergey.buga@gmail.com

(Arachnida). Среди них 6 видов галловых клещей (Acariformes: Eriophyidae), 23 вида тлей (Sternorrhyncha: Aphidoidea & Phylloxeroidea) и 1 вид галлиц (Diptera: Cecidomyiidae), 1 вида кокцид (Sternorrhyncha: Coccoidea), 1 вид листоблошек (Sternorrhyncha: Psylloidea) и 1 вид трипсов, или бахромчатокрылых насекомых (Thysanoptera: Thripidae), 3 вида минирующей молей-пестрянок (Lepidoptera: Gracillariidae). Большинство в составе комплекса составляют выходцы из Средиземноморья и различных регионов Европы (16 видов, 53 % от их общего числа) и Северной Америки (10 видов, 34 %). Зимующими стадиями у Gracillariidae являются имаго и яйца: у галловых клещей и ложнощитовок (Sternorrhyncha: Coccidae) – личинки; у листоблошек и голоциклических видов тлей – яйца.

Ключевые слова: Беларусь; биологические инвазии; дендрофильные членистоногие; чужеродные виды; фауна.

ECOLOGICAL, TAXONOMIC AND ZOOGEOGRAPHIC STRUCTURE OF COMPLEX OF INVASIVE PHYTOPHAGOUS ARTHROPODS IN GREEN STANDS IN GRODNO PONEMAN REGION

K. I. HLIAKOUSKAYA^a, D. G. ZHOROV^b, A. V. RYZHAYA^a, S. V. BUGA^b

^aYanka Kupala State University of Grodno, Dovatora lane, 3/1, 230012, Grodno, Belarus

^bBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus

Corresponding author: K. I. Hliakouskaya (ekaterina.g91@mail.ru)

Biological diversity of alien phytophagous Arthropods includes 38 species of insects and mites which damaging decorative woody plants in green stands in Grodno Poneman region. There are representative 30 genera, 11 families and 9 superfamilies of insects (Insecta s.str. or Ectognatha) and Arachnids (Arachnida). They include 6 species of gall forming mites (Acariformes: Eriophyidae), 23 species of aphids (Sternorrhyncha: Aphidoidea & Phylloxeroidea) and 1 species of gall midge (Diptera: Cecidomyiidae), 1 species of scale insects (Sternorrhyncha: Coccoidea), 1 species of jumping lice (Sternorrhyncha: Psylloidea) and 1 species of thrips (Thysanoptera: Thripidae), 3 species of leaf mining moths (Lepidoptera: Gracillariidae). The majority of these alien species have European and Mediterranean (16 species) or North American (10 species) origin. Overwintering stages of Gracillariidae are imago and pupae, gall forming mites and mealybugs (Sternorrhyncha: Coccidae) – larvae of jumping plant lice and holocyclic aphids – ovae.

Key words: Belarus; biological invasions; dendrocolous Arthropods; alien species; fauna.

Введение

Проблема инвазий чужеродных для каждой региональной фауны видов в последние десятилетия приобретает глобальный характер и принадлежит к числу основных экологических задач, перед которыми стоит человечество [1]. Следует отметить, что географическое положение Республики Беларусь, через территорию которой пролегают трансконтинентальные и трансрегиональные транспортные коридоры, данный вопрос весьма актуален и требует решения [2]. К Гродненскому Понеманью, расположенному у западной границы страны и пересекаемому трансграничной водной артерией – рекой Неман, это относится также в полной мере. При этом часть чужеродных для фауны видов беспозвоночных проникает на территорию данного пограничного региона самостоятельно (в силу естественной мобильности) в ходе экспансии с территорий сопредельных государств (Польша и Литва), другие завозятся транспортными средствами, в том числе с перемещаемыми грузами, среди которых для беспозвоночных-фитофагов следует выделить посадочный материал культивируемых растений, цветочную срезку и растительную продукцию сельскохозяйственных предприятий.

Многие из растительноядных беспозвоночных ощутимо вредят культивируемым и другим хозяйственно ценным растениям. Среди них следует выделить декоративные растения, повреждения которых фитофагами критичны не столько в аспекте снижения их прироста и продуктивности, сколько утраты декоративных качеств [3; 4]. Зеленые насаждения играют важное архитектурно-планировочное, рекреационное и эстетическое значение [5]. Присутствие в составе декоративных и зеленых насаждений большого числа интродуцентов создает предпосылки для натурализации в новых условиях их специализированных фитофагов, проникающих из исходных ареалов произрастания. В настоящее время большое внимание уделяется вопросам наведения порядка на земле и фитосанитарному состоянию зеленых насаждений. Чужеродные для фауны Беларуси членистоногие-фитофаги представляют собой многочисленную группу вредителей зеленых насаждений (как это было показано ранее на примере гемиптероидных насекомых [6]), в силу чего они должны рассматриваться в качестве инвазивных. К числу последних принадлежит большое число беспозвоночных – вредителей зеленых насаждений [7]. В задачи данной публикации входило подведение итогов изучения таксономического состава, а также

экологической и хорологической структуры комплекса инвазивных видов членистоногих-фитофагов зеленых насаждений, сложившегося к настоящему времени в условиях Гродненского Полесья.

В основу настоящей работы положены материалы энтомо-фитопатологических обследований зеленых насаждений на территории Гродненского Полесья, проводившихся в течение полевых сезонов 2016–2017 гг. Более подробные исследования выполнялись на территории городов (Гродно, Скидель, Мосты, Лида) и г. п. Порозово. Кроме того, были использованы данные предшествующих лет, накопленные в ходе изучения беспозвоночных-фитофагов урбоценоза г. Гродно и в рамках иных научно-исследовательских работ. Сбор материала осуществляли главным образом в ходе визуального осмотра древесно-кустарниковых растений на предмет наличия фитофагов-вредителей или вызванных ими повреждений. Фрагменты растений с фитофагами и повреждениями коллектировали для последующего анализа в лабораторных условиях. Поврежденные фитофагами части растений гербаризировали [8] и идентифицировали с использованием тематических атласов-определителей, справочных пособий и материалов специализированных интернет-порталов [9–13].

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам анализа совокупности имеющихся материалов для Гродненского Полесья представляется возможным констатировать 38 инвазивных видов фитофагов – вредителей зеленых насаждений. Таксономическая структура комплекса представлена в табл. 1.

Таблица 1

Таксономический состав и регионы происхождения чужеродных для фауны Беларуси членистоногих-фитофагов зеленых насаждений Гродненского Полесья

Table 1

Taxonomic composition and regions of origin of invasive phytophagous arthropods in green stands in Grodno Poneman region

Надсемейства	Инвайдеры	Регионы происхождения
Паукообразные (Arachnida)		
Eriophyoidea	<i>Aceria cephalonea</i> (Nalepa, 1922)	Западная и Южная Европа
	<i>Aceria erinea</i> (Nalepa, 1891)	Средиземноморье
	<i>Aceria pseudoplatani</i> (Corti, 1905)	Западная и Южная Европа
	<i>Aculus hippocastani</i> (Fockeu, 1890)	Южная Европа
	<i>Eriophyes exilis</i> (Nalepa, 1892)	Западная и Южная Европа
	<i>Vasates quadripedes</i> (Shimer, 1869)	Северная Америка
Насекомые (Insecta s.str.)		
Coccoidea	<i>Parthenolecanium fletcheri</i> (Cockerell, 1893)	Северная Америка
Psylloidea	<i>Psylla buxi</i> (Linnaeus, 1758)	Средиземноморье
Thripidoidea	<i>Dendrothrips ornatus</i> (Jablonowski, 1894)	криптогенный вид
Phylloxeroidea	<i>Adelges laricis</i> (Vallot, 1836)	Западная и Северная Европа
	<i>Adelges (Cholodkovskya) viridana</i> (Cholodkovsky, 1896)	Западная и Северная Европа
Aphidoidea	<i>Acyrtosiphon caraganae</i> (Cholodkovsky, 1907)	Центральная Азия
	<i>Aphis craccivora</i> (Koch, 1854)	Северная Америка
	<i>Aphis gossypii</i> (Glover, 1877(1854))	криптогенный вид
	<i>Aphis spiraeola</i> (Patch, 1914)	криптогенный вид
	<i>Appendiseta robiniae</i> (Gillette, 1907)	Северная Америка
	<i>Brachycaudus divaricatae</i> (Shaposhnikov, 1956)	Прикаспийский регион
	<i>Brachycaudus spiraeae</i> (Börner, 1932)	Западная Европа
	<i>Capitophorus elaeagni</i> (del Guercio, 1894)	Центральная Азия
	<i>Capitophorus hippophaes</i> (Walker, 1858)	Центральная Азия
	<i>Chromaphis juglandicola</i> (Kaltenbach, 1843)	Средиземноморье
	<i>Cryptomyzus ribis</i> (Linnaeus, 1758)	Северная Америка
	<i>Drepanosiphum platanoidis</i> (Schrank, 1801)	Западная и Южная Европа
	<i>Hyadaphis tataricae</i> (Aizenberg, 1935)	Урал и Приуралье
	<i>Myzocallis walshii</i> (Monell, 1879)	Северная Америка
	<i>Myzus cerasi</i> (Fabricius, 1775)	Южная Европа
	<i>Myzus ligustri</i> (Mosley, 1841)	Западная и Южная Европа
	<i>Myzus pruniavium</i> (Börner, 1926)	Южная Европа
	<i>Panaphis juglandis</i> (Goeze, 1778)	Средиземноморье
	<i>Pemphigus spyrothecae</i> (Passerini, 1856)	Средиземноморье
	<i>Therioaphis tenera</i> (Aizenberg, 1956)	Центральная Азия
	<i>Tinocallis saltans</i> (Nevsky, 1929)	Северная Америка

Окончание табл. 1

Ending table 1

Надсемейства	Инвайдеры	Регионы происхождения
Насекомые (Insecta s.str.)		
Sciaroidea	<i>Obolodiplosis robiniae</i> (Haldeman, 1847)	Северная Америка
Gracillarioidea	<i>Cameraria ohridella</i> (Deschka & Dimic, 1986)	Балканский полуостров
	<i>Phyllonorycter issikii</i> (Kumata, 1963)	Восточная Азия
	<i>Macrosaccus robiniella</i> (Clemens, 1859)	Северная Америка
Tenthredoidea	<i>Hinatara recta</i> (Thomson, 1871)	криптогенный вид
	<i>Nematus tibialis</i> (Newman, 1837)	Северная Америка

В составе комплекса выделено 6 видов эриофиоидных (четырёхногих или галловых) клещей (Arachnida: Acariformes) семейства Eriophidae, в их числе к роду *Aceria* Keifer принадлежит 3 вида, к родам *Aculus* Keifer, *Eriophyes* von Siebold и *Vasates* Shimer – по 1. Сосущие насекомые надотряда гемиптероидных (Insecta: Hemipteroidea) представлены грудохоботными равнокрылыми (Sternorrhyncha) и бахромчатокрылыми (Thysanoptera) насекомыми. Последние – единственным видом, липовым трипсом (*D. ornatus*), из семейства настоящих трипсов (Thripidae).

Большинство в составе рассматриваемого комплекса составляют грудохоботные насекомые. Среди них кокциды (Coccinea, или Coccidomorpha) представлены 1 видом ложнощитовок рода *Parthenolecanium* Su 1 с из семейства ложнощитовок (Coccidae). Из листоблошек, или псиллид (Psyllinea, или Psyllomorpha) в составе комплекса присутствует единственный вид – самшитовая листоблошка (*P. buxi*) из семейства Psyllidae. Среди тлей (Aphidinea, или Aphidomorpha) большинство видов принадлежат к числу настоящих тлей (Aphidoidea), и лишь 2 вида хермесов (Adelgidae) – к надсемейству Phylloxeroidea. Характерным является представительство большинства родов единичными видами, исключение составляют роды *Aphis* Linnaeus и *Myzus* Passerini – по 3 вида, *Brachycaudus* van der Goot и *Capitophorus* van der Goot – по 2 вида. В целом наибольшим числом видов (13) представлено семейство Aphididae s. str., что хорошо согласуется с ранее публиковавшимся [14] данными по адвентивной фракции рецентной афидофауны Беларуси.

В рамках настоящего исследования были обобщены сведения о географическом происхождении (первичных, естественно-исторически сложившихся ареалов) чужеродных для фауны Беларуси видов членистоногих. Для ряда видов происхождение остается неясным, и их в рамках подобных исследований принято относить к числу криптогенных. В представленном в таблице списке таких видов всего 4 – это тли *A. spiraecola* и *A. gossypii*, трипс *D. ornatus* и пилильщик *H. recta*. Несмотря на наличие прямого трансконтинентального транзита и отсутствие государственной границы с Российской Федерацией, в Гродненском Понеманье чужеродные виды членистоногих дальневосточного происхождения не отмечены. Выходцами из регионов Северной Америки является 10 видов насекомых и клещей; из Центральной Азии к нам проникло 4 вида насекомых, и несколько больше – 5 видов, из Средиземноморья (в широком смысле, включая область Древнего Средиземья). Отдельно можно выделить Прикаспийский регион (имея в виду север Передней Азии), откуда происходит алычевая, или алычево-дремовая тля (*B. divaricatae*), а также Урал и Приуралье, где простирается естественный ареал жимолости татарской (*L. tatarica*), которая является кормовым растением тли *H. tataricae*. Следует отметить, что наибольшее число инвайдеров происходит из различных регионов Южной, Западной и Северной Европы. Это представляется вполне закономерным, учитывая географическое положение нашей страны.

В условиях вторичного ареала интродуценты повреждаются не только их специализированными фитофагами, трофические связи с которыми сформировались в исходном ареале, но и аборигенными полифагами и олигофагами, а также адвентивными формами, специализированными к питанию на фитогенетически родственных видах растений. Поэтому круг повреждаемых инвазивными фитофагами деревьев и кустарников зачастую включает несколько видов растений (табл. 2), иногда разного географического происхождения.

В целом в числе повреждаемых чужеродными для фауны Беларуси видами членистоногих констатированы растения как минимум 25 родов и 16 семейств. Большинство фитофагов используют в качестве кормовых растений представителей адвентивной фракции флоры Беларуси. Многоядные формы (такие, как тли *A. gossypii*) способны повреждать широкий круг древесных и травянистых растений. К числу монофагов в составе рассматриваемого комплекса принадлежит 22 вида (56 % общего их числа), узких олигофагов – 13 видов (33 %), полифагов – 3 вида (8 % от общего числа) и широких олигофагов – 1 вид (3 % от общего числа).

Таблица 2

Биоэкологическая классификация инвазивных членистоногих-фитофагов
зеленых насаждений Гродненского Полеманья

Table 2

Bioecological classification of invasive phytophagous arthropods in green stands in Grodno Poneman region

Инвайдер	Повреждаемые растения	Трофическая специализация	Стадия зимовки	Фитобионтная группа	Топоспецифичность	Способность к тератогенности	Образ жизни
<i>A. cephalonea</i>	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	М	Л	ДБ	ФБ	Т	ОЭ
<i>A. erinea</i>	<i>Juglans regia</i> L.	М	Л	ДБ	ФБ	Т	ОЭ
<i>A. pseudoplatani</i>	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	М	Л	ДБ	ФБ	Т	ОЭ
<i>A. hippocastani</i>	<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	М	Л	ДБ	ФБ	Т	ОЭ
<i>E. exilis</i>	<i>Tilia cordata</i> Mill.	УО	Л	ДБ	ФБ	Т	ОЭ
<i>V. quadripedes</i>	<i>Acer saccharinum</i> L.	М	Л	ДБ	ФБ	Т	ОЭ
<i>P. fletcheri</i>	<i>Thuja occidentalis</i> L.	УО	Л	ДТБ	МФ	НТ	О
<i>P. buxi</i>	<i>Buxus sempervirens</i> L.	М	Я	ТБ	ФБ	Т	ОГ
<i>D. ornatus</i>	<i>Syringa vulgaris</i> L.	УО	С	ДБ	ФБ	НТ	О
<i>A. laricis</i>	<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	УО	Л	ДБ	МФ	Т	ЗГ
<i>Ch. viridana</i>	<i>Larix decidua</i> Mill.; <i>Larix sibirica</i> Ledeb.; <i>Larix polonica</i> Racib & Woycicki; <i>Larix kaempferi</i> (Lamb.) Carriere	УО	Л	ДБ	ФБ	НТ	О
<i>A. caraganae</i>	<i>Caragana arborescens</i> Lam.; <i>Caragana frutex</i> (L.) C. Koch	УО	Я	ТБ	КФ	НТ	О
<i>A. craccivora</i>	<i>Caragana arborescens</i> Lam.; <i>Caragana frutex</i> (L.) C. Koch; <i>Robinia pseudoacacia</i> L. (<i>Medicago</i> spp.; <i>Melilotus</i> spp.; <i>Trifolium</i> spp.)	ШО	Я	ДТХБ	МФ	Д	О
<i>A. gossypii</i>	<i>Buddleja</i> spp. (и различные Cucurbitaceae)	П	Л	ТХБ	ФБ	Д	О
<i>A. spiraeicola</i>	<i>Spiraea salicifolia</i> L.; <i>Spiraea alba</i> Du Roi; <i>Crataegus</i> spp., <i>Cotoneaster</i> spp., <i>Chaenomeles japonica</i> (Thunb.) Lindl. ex Spach	П	Л/Я	ДТБ	МФ	Д	О
<i>A. robiniae</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	М	Я	ДБ	ФБ	НТ	О
<i>B. divaricatae</i>	<i>Prunus divaricata</i> Ldb.	М	Я	ДХБ	МФ	Д	О
<i>B. spiraeae</i>	<i>Spiraea alba</i> Du Roi; <i>Spiraea salicifolia</i> L.	М	Я	ТБ	ФБ	Т	ОГ
<i>C. elaeagni</i>	<i>Hippophae rhamnoides</i> L.; <i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	УО	Я	ДХБ	ФБ	НТ	О
<i>C. hippophaes</i>	<i>Hippophae rhamnoides</i> L.; <i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	УО	Я	ДХБ	ФБ	НТ	О
<i>Ch. juglandicola</i>	<i>Juglans regia</i> L.	М	Я	ДБ	ФБ	НТ	О
<i>C. ribis</i>	<i>Ribes rubrum</i> L.	М	Я	ТХБ	ФБ	Т	ОГ
<i>D. platanoidis</i>	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	М	Я	ДБ	ФБ	НТ	О
<i>H. tataricae</i>	<i>Lonicera tatarica</i> L.	М	Я	ТБ	ФБ	Д	ОГ
<i>M. walshii</i>	<i>Quercus rubra</i> L.	М	Я	ДБ	ФБ	НТ	О
<i>M. cerasi</i>	<i>Prunus cerasus</i> L. (syn. <i>Cerasus</i> × <i>vulgaris</i> Mill.)	М	Я	ДХБ	ФБ	Д	О
<i>M. ligustri</i>	<i>Ligustrum vulgare</i> L.	М	Я	ТБ	ФБ	Д	О
<i>M. pruniavium</i>	<i>Prunus avium</i> (L.) L. (syn. <i>Cerasus avium</i> (L.) Moench.)	М	Я	ДХБ	ФБ	Д	О
<i>P. juglandis</i>	<i>Juglans regia</i> L.	М	Я	ДБ	ФБ	НТ	О
<i>P. spyrothecae</i>	<i>Populus pyramidalis</i> Borkh. (syn. <i>Populus nigra</i> 'Italica'); <i>Populus</i> × <i>berolinensis</i> Dippel.	УО	Я	ДБ	ФБ	Т	ЗГ

Окончание табл. 2

Ending table 2

Инвайдер	Повреждаемые растения	Трофическая специализация	Стадия зимовки	Фитобионтная группа	Топоспецифичность	Способность к тератогенности	Образ жизни
<i>Th. tenera</i>	<i>Caragana arborescens</i> Lam.; <i>Caragana frutex</i> (L.) C. Koch	УО	Я	ТБ	ФБ	НТ	О
<i>T. saltans</i>	<i>Ulmus minor</i> Mill.; <i>Ulmus glabra</i> Huds.; <i>Ulmus pumila</i> L.; <i>Ulmus laevis</i> Pall.	УО	Я	ДБ	ФБ	НТ	О
<i>O. robiniae</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	М	К	ДБ	ФБ	Т	ЗГ
<i>C. ohridella</i>	<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	М	К	ДБ	ФБ	НТ	М
<i>Ph. issikii</i>	<i>Tilia cordata</i> Mill.	УО	И	ДБ	ФБ	НТ	М
<i>M. robiniella</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	М	И/К	ДБ	ФБ	НТ	М
<i>H. recta</i>	<i>Acer platanoides</i> L.,	М	?	ДБ	ФБ	НТ	М
<i>N. tibialis</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	УО	К	ДБ	ФБ	НТ	О

Примечания.

Трофическая специализация: М – монофаг, П – полифаг, УО – узкий олигофаг, ШО – широкий олигофаг.

Стадия зимовки: И – имаго, К – куколка, Л – личинка (на разных стадиях развития), С – самка, Я – яйцо.

Фитобионтная группа: ДБ – дендробионты, ДТБ – дендротамнобионты, ДТХБ – дендротамнохортобионты, ДХБ – дендрохортобионты, ТБ – тамнобионты, ТХБ – тамнохортобионты.

Топоспецифичность: КФ – карпофилы, МФ – меристемофилы, ФБ – филлобионты.

Способность к тератогенности: Д – инициирующие деформацию, НТ – нетератогенные формы, Т – тератогенные формы.

Образ жизни: ЗГ – обитатели закрытых галлов, М – минирующие формы, О – открытоживущие формы, ОГ – обитатели открытых галлов; ОЭ – обитатели эринеумов.

Характер наносимых декоративным древесным растениям повреждений во многом определяется образом жизни фитофагов, способом питания, топической приуроченностью и локализации на растениях-хозяевах. Среди фитофагов выделяются 2 основные по характеру образа жизни группы: открытоживущие (21 видов, 55 % от общего их числа) и скрытоживущие (17 видов, 45 %) формы. К числу последних принадлежат представители таких уникальных экологических групп фитофагов, как минеры (4 вида), обитатели открытых (4 вида) и закрытых (9 видов) галлов. В числе последних 1 вид комаров-галлиц – *O. robiniae*, 1 вид хермесов – *A. laricis*, 1 вид тлей – *P. spyrothecae*, а также 2 вида галловых клещей (Eriophyidae). Минеры – личинки *C. ohridella*, *Ph. issikii*, *M. robiniella* и *H. recta* – прокладывают ходы и выгрызают полости в толще паренхимы листовых пластинок растений.

Тератогенез характерен для 12 инвазивных видов фитофагов. Тераты представлены эринеумами-войлочками и щетками, одно- или многокамерными закрытыми либо открытыми галлами на различных частях растений. Питание ряда таких видов тлей, как *A. craccivora*, *A. gossypii*, *A. spiraeicola*, *B. divaricatae*, *H. tataricae*, *M. cerasi*, *M. ligustri*, *M. pruniavium*, ведет к малоупорядоченной деформации листовых пластинок растущих побегов.

Сосущие фитофаги (32 вида, 84 % от общего их числа) обладают колюще-сосущим ротовым аппаратом и потребляют жидкие компоненты из флоэмы, ксилемы либо листовой паренхимы растений. Остальные (16 %) в большинстве своем, на соответствующих стадиях развития, используют возможности различных вариантов ротовых аппаратов грызущего типа.

В составе рассматриваемого комплекса преобладают филлобионтные формы (32 вида), а 5 видов принадлежат к числу меристемофильных. Для большой караганной тли (*A. caraganae*) весьма характерна карпофилия.

В составе комплекса чужеродных для фауны Беларуси видов членистоногих-фитофагов преобладают представители дендробионтной фитобионтной группы (22 вида, 58 % от общего их числа). Остальные представители комплекса распределяются по фитобионтным группам следующим образом: 6 видов (16 %) – тамнобионтов, немного меньше (5 видов) дендрохортобионтов, дендротамнобионтов и тамнохортобионтов в составе комплекса по 2 вида (по 5 % соответственно), 1 вид дендротамнохортобионтов.

Зимовка является критическим переходом в биологическом цикле насекомых, и ее успешное прохождение во многом определяет возможность натурализации чужеродных видов на новых территориях. По итогам обобщения имеющихся данных можно констатировать, что для большинства видов (20; 57 % от общего их числа) характерна зимовка на стадии яйца, у 10 видов (29 %) зимовка осуществляется на стадии личинки, у 3 видов (8 %) – на стадии куколки, у 1 вида (3 %) зимуют самки и 1 вид (3 %) на стадии имаго.

Заключение

По результатам выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Установлен таксономический состав комплекса инвазивных членистоногих-фитофагов зеленых насаждений Гродненского Полесья, в составе которого констатировано 6 видов эриофиоидных клещей (Arachnida: Eriophyoidea) и 32 вида насекомых (Insecta s. str.), в том числе 25 видов грудных (Stenorrhyncha), 1 вид бахромчатокрылых, или трипсов (Thysanoptera), 2 вида перепончатокрылых (Hymenoptera), 3 вида чешуекрылых (Lepidoptera) и 1 вид двукрылых (Diptera) насекомых.

2. На основании выполненного хронологического анализа структуры рассматриваемого комплекса установлено, что большинство (16 видов, 53 %) инвазивных имели естественно-исторически сложившиеся ареалы, ограниченные Средиземноморьем, регионами Центральной и Западной Европы. Для 10 чужеродных инвазивных видов (34 %) естественный ареал ограничен Североамериканским континентом, а у 4 – Центральной Азией.

3. Установлена экологическая структура комплекса инвазивных членистоногих-фитофагов зеленых насаждений Гродненского Полесья. Большинство в нем составляют высокоспециализированные (монофаги) – 22 вида (56 %) и узкоспециализированные (узкие олигофаги) – 13 видов (33 %), открытоживущие (21 вид, 55 %) нетератогенные (18 видов, 47 %) филлобинтные (32 вида, 84 %) фитофаги, принадлежащие к дендробионтной фитобионтной группе (22 вида, 58 %) и осуществляющих зимовку на стадии яйца (20 видов, 57 %).

Библиографические ссылки

1. Vitousek P. M., D'Antonio C. M., Loope L. L., et al. Biological invasions as global environmental change // *American Scientist*. 1996. Vol. 84. P. 468–478.
2. Семенченко В. П., Пугачевский А. В. Проблема чужеродных видов в фауне и флоре Беларуси // *Наука и инновации*. 2006. Т. 44, № 10. С. 15–20.
3. Горленко С. В., Блинов А. И., Панько Н. А. Устойчивость древесных интродуцентов к биотическим факторам. Минск, 1988.
4. Тимофеева В. А., Дишук Н. Г., Войнич Н. В. и др. Болезни и вредители декоративных растений в насаждениях Беларуси. Минск, 2014.
5. Чаховский А. А., Шкутко Н. В. Декоративная дендрология Белоруссии. Минск, 1979.
6. Жоров Д. Г., Сауткин Ф. В., Синчук О. В. и др. Фоновые инвазивные виды членистоногих – вредителей древесных растений зеленых насаждений Беларуси // *Весті Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі*. 2016. № 1. С. 25–34.
7. Алехнович А. В. (сост.). Черная книга инвазивных видов животных Беларуси. Минск, 2016.
8. Гельтман Д. В. (ред.) *Гербарное дело: справочное руководство*. Кью: Королевский ботанический сад, 1995.
9. Blackman R. (ed.). *Aphids on the World's Plants: An online identification and information guide*. [Electronic resource]. 2012. URL: <http://www.aphidsonworldsplants.info> (date of access: 23.03.2018).
10. Willem N. E. *Leafminers and plant galls of Europe*. [Electronic resource]. 2013. URL: <http://www.bladminderders.nl> (date of access: 23.03.2018).
11. *British Leafminers* [Electronic resource]. 2015. URL: <http://www.leafmines.co.uk> (date of access: 23.03.2018).
12. Гусев В. И. *Определитель повреждений деревьев и кустарников, применяемых в зеленом строительстве: справочник*. М., 1989.
13. Гусев В. И. *Определитель повреждений плодовых деревьев и кустарников, применяемых в зеленом строительстве: справочник*. М., 1990.
14. Буга С. В. *Дендрофильные тли Беларуси*. Минск, 2001.

References

1. Vitousek P. M., D'Antonio C. M., Loope L. L., et al. Biological invasions as global environmental change. *American Scientist*. 1996. Vol. 84. P. 468–478.
2. Semenchenko V. P., Pugachevskij A. V. [Problem of alien species in fauna and flora of Belarus] // *Science and innovations*. 2006. Vol. 44, No. 10. P. 15–20 (in Russ.).
3. Gorlenko S. V., Blintsov A. I., Pan'ko N. A. [Resistance of introduced woody plants to biotic factors]. Minsk, 1988 (in Russ.).
4. Timofeeva V. A., Dishuk N. G., Vojnits N. V., et al. [Diseases and pests of decorative plants in green vegetation in Belarus]. Minsk, 2014 (in Russ.).
5. Chakhovskij A. A., Shkutko N. V. [Decorative dendrology of Byelorussia]. Minsk, 1979 (in Russ.).

6. Zhorov D. G., Sautkin F. V., Sinchuk O. V., et al. [Common invasive species of Arthropods – pests of woody plants under the condition of green vegetation of Belarus]. *Vesnik of Brest University. Series 5. Chemistry. Biology. Sciences about Earth*. 2016. No. 1. P. 25–34 (in Russ.).
7. Alekhnovich A. V. (comp.). [Black book of invasive animal species of Belarus]. Minsk, 2016 (in Russ.).
8. Gel'tman D. V. (ed.) *Gerbarnoe delo: spravochnoe rukovodstvo* [The herbarium handbook: Revised Edition]. – Kew: Royal Botanic Garden, 1995 (in Russ.).
9. Blackman R. (ed.). *Aphids on the World's Plants: An online identification and information guide* [Electronic resource]. 2012. URL: <http://www.aphidsonworldsplants.info> (date of access: 23.03.2016).
10. Willem N. E. *Leafminers and plant galls of Europe*. [Electronic resource]. 2013. URL: <http://www.bladmineerders.nl> (date of access: 23.03.2018).
11. *British Leafminers* [Electronic resource]. 2015. URL: <http://www.leafmines.co.uk> (date of access: 23.03.2018).
12. Gusev V. I. [Keys of damaging of trees and shrubs using in green stands]. Moscow, 1989 (in Russ.).
13. Gusev V. I. [Keys of damaging of fruit-producing trees and shrubs using in green stands]. Moscow, 1990 (in Russ.).
14. Buga S. V. [Dendrocolous aphids in Belarus]. Minsk, 2001 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 10.05.2018
Received by editorial board 10.05.2018

УДК 504.453

АНТРОПОГЕННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТИ Г. МИНСКА ЗА ИСТОРИЧЕСКИЙ ПЕРИОД

А. С. ЗМАЧИНСКИЙ¹⁾

¹⁾Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам,
ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Беларусь

Рассматривается антропогенное преобразование гидрографической сети г. Минска за исторический период, которое шло в двух основных направлениях. Во-первых, при освоении территории сокращались по протяженности или исчезали естественные водотоки, а вместе с ними и мелкие водоемы; во-вторых, на сохранившихся водотоках создавались искусственные водоемы различного назначения.

Ключевые слова: возникновение г. Минска; градостроительная история г. Минска; гидрографическая сеть г. Минска, водотоки и водоемы; реконструкция водотоков, антропогенное преобразование гидрографической сети.

Благодарность. Автор выражает искреннюю признательность заведующему лаборатории ихтиологии ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам», кандидату биологических наук, доценту В. К. Ризевскому за организационные и критические замечания в адрес статьи.

ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF HYDROGRAPHIC NETWORK OF MINSK FOR THE HISTORICAL PERIOD

A. S. ZMACHYNSKI^a

^aThe scientific and practical center for the National Academy of Sciences of Belarus for biological resources,
Akademicheskaya street, 27, 220072, Minsk, Belarus

The paper deals with anthropogenic transformation of hydrographic network of Minsk for the historical period that has been developed in two main directions. The natural waterways were reduced on extend or totally dissapeared during the development of the territories, artificial reservoirs of different function were created on the remained waterways.

Key words: emergence of Minsk, city-planning history of Minsk, hydrographic network of Minsk, waterways and reservoirs (ponds), reconstruction of water bodies, anthropogenic transformation of hydrographic network.

Acknowledgment. The author expresses sincere gratitude to the head of the laboratory of ichthyology of Scientific and Practical Center of National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources PhD associate professor V. K. Rizevsky for organizational and critical remarks to article.

Введение

Минск – один из древних городов Беларуси, первое упоминание о нем относится к 1067 г. Князья Ярославичи (Киевский великий князь Изяслав и его братья Святослав Черниговский и Всеволод Переяславский) захватили и разрушили город, принадлежащий в то время полоцкому князю Всеславу

Образец цитирования:

Змачинский А. С. Антропогенное преобразование гидрографической сети г. Минска за исторический период // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 18–25.

For citation:

Zmachynski A. S. Anthropogenic transformation of hydrographic network of Minsk for the historical period. J. Belarus. State Univ. Ecol. 2018. No. 2. P. 18–25 (in Russ.).

Авторы:

Александр Станиславович Змачинский – магистр биологических наук.

Authors:

Alexander S. Zmachynski, master of biological sciences.
a.zmachynski@mail.ru

Брячиславичу [1; 2]. Исходя из даты исторических событий, можно предположить, что возникновение города относится к более раннему времени.

П. М. Шпилевский указывал, что народное предание относит возникновение Минска к глубокой древности. Его название произошло от основателя, некоего богатыря Менеска. Между тем, «Менеск» («Меньск») он связывает со словом «мена», от которого впоследствии город получил несколько измененное название – «Минск». Он же предполагает, что река Немига в древности могла называться «Менига» или «Минегга» [3; 4], что созвучно со словами «Менск», «Минск».

Некоторые историки признавая возможным, что древний Минск находился там же, где расположен современный город, а летописную Немигу искали в другом месте [4; 5]. В. Е. Данилевич, сопоставив факты двух древних источников («Повести временных лет» и «Слова о полку Игореве»), утверждал, что местонахождение древнего Минска совпадает с расположением современного города, а река, упоминаемая в них – это минская Немига (Немиза). Он доказывал, что рядом с рекой, по ее берегам, возникло поселение с тем же названием [6]. Примерно такого же мнения был Э. М. Загоруйский, который отмечал, что Минск «никто никогда никуда не переносил». Он изначально находился в самом центре современного города, поскольку многие археологические материалы, найденные на раскопках в центре нынешнего Минска, датируются X–XI вв. (Г. В. Штыхов, правда, усомнился в датировке и отнес артефакты ко второй половине XI в.) [7–11].

В 30-х гг. XX в. историк А. Н. Ясинский, исходя из отсутствия в Минске находок материальных остатков, датированных ранее XVI в., выдвинул гипотезу, что древний город первоначально возник приблизительно в шестнадцати километрах к юго-западу от нынешнего – у современных деревень Городище и Строчицы Минского р-на [4; 12]. Следует отметить, что на правом берегу небольшой р. Мена (Менка), в двух километрах от впадения ее в р. Птичь, до настоящего времени сохранилось большое раннефеодальное городище XII–XIII вв., а в ходе раскопок, проведенных археологами в середине 1930-х годов, обнаружены земляное укрепление, селище и курганные могилы, датированные X–XI вв. [13].

Обращаясь к битве на Немиге, А. Н. Ясинский и некоторые другие историки считают, что объединенное войско Ярославичей подошло к Менеску (Меньску), расположенному на р. Мена, захватило и сожгло его, а затем направилось на Немигу. Как свидетельствуют многолетние исследования, Немига (Немиза) – это название не только реки, но и детинца, построенного в месте слияния рек Немиги и Свислочи [12]. Со временем произошел перенос названия «Менеск» («Меньск») с поселения, расположенного на р. Мена (Менка), на детинец у слияния рек Свислочь и Немига [14–16]. До настоящего времени вопрос о происхождении города изучается историками, однако однозначных результатов исследования еще не получено.

Освоение городской территории и высокая техногенная нагрузка вели к значительному преобразованию рельефа, а вслед за ним – условий функционирования гидрографической сети. Кроме того, водотоки и водоемы подвергались прямому антропогенному воздействию на протяжении всего исторического периода существования города. Наиболее раннюю топографию Минска можно найти в Описании Европейской Сарматии Александра Гваньини (латинский оригинал «*Sarmatiae europeae description*» вышел в Кракове в 1578 г., польский перевод «*Kronika Sarmacyey Europskiey*» – в 1611 г.) и во Втором хождении Трифона Коробейникова (предисл. С. О. Долгова), изданным в 1887 г. [17]. Описания города имеются в актовых материалах XV–XVII вв. [18; 19]. Важными документами являются также составленные в конце XVIII – начале XIX в. планы города [20; 21].

Помимо планов города, подробное представление о прежней гидрографической сети Минска дает «Акт ревизорского разграничения кgrundов мещан меньских з кgrundами шляхетскими» (1557 г.), который был составлен по материалам объезда границ городских земель по ходу часовой стрелки, начиная с северной окраины Минска [21; 22]. Описание гидрографической сети Минска также можно встретить в военно-статистических материалах офицеров Генерального штаба Российской империи, датированных серединой XIX в. [23; 24]. Подробное описание р. Свислочь имеется у А. К. Ельского [25].

Материалы и методы исследования

Историко-картографический анализ изменения гидрографической сети города был проведен путем изучения и на основе [5; 10; 18–22] и других [26–35] литературных источников и картографических данных, начиная с конца XVIII в. Наиболее подробно были изучены топографические и военно-топографические карты 1865, 1929 (снята в 1908 г.), 1933, 1944, 1950, 1964 и 1985 гг., а также планы города 1992–2002 и 2008–2018 гг. Были привлечены современные спутниковые карты. Изучение картографического материала дополнялось визуальным осмотром мест исчезнувших и существующих водотоков. Места исчезнувших водотоков фиксировались по сохранившимся микро- и мезоформам речного русла, в редких случаях – по макроформам русла и элементам поймы. Собранный материал сравнивался

и данными ГИС-моделирования водотоков, которое проводилось с помощью программных пакетов ArcGIS 10.2 и Global Mapper 15. Основой моделирования послужили данные по гипсометрии территории, полученные натуральной фотосъемкой [36].

Результаты исследования и их обсуждение

За исторический период гидрографическая сеть Минска претерпела значительные изменения. По мере вхождения в черту города водотоков и водоемов происходит их постепенное освоение и антропогенная трансформация. На основании литературных источников выявлены и изучены основные изменения гидрографической сети.

В самый ранний исторический период, от даты упоминания и вплоть до исчезновения такого политического образования, как Великое Княжество Литовское, освоению подвергались реки Свислочь и Немига, рядом расположенные болота и мелкие водоемы. Основными антропогенными трансформациями были изменения русел и рельефа речных долин названных рек (углубление Немиги, создание дренажных конструкций, рва и оборонительной насыпи на берегах рек, а также уплотнение грунта при строительстве зданий и дорог). Сток был слабо трансформирован, но на берегах при отсутствии зеленых зон было множество огородов. В XII–XIII вв. город занимал только около 18 га.

Во времена Речи Посполитой с уплотнением и ростом города антропогенное воздействие на те же водные объекты распространялось и усиливалось. Берега Свислочи укреплялись деревом, появляются мельницы и плотины, изменяющие водный режим и провоцирующие застойные явления, уровень воды в Немиге понижается. С уплотнением построек и появлением новых мощных дорог сокращается садоводство и огородничество. К середине XVIII в. город занимал около 130 га. Ныне известные притоки Свислочи и мелкие водоемы располагались все еще вне городской черты, многие вблизи сельских населенных пунктов и усадеб.

Во время Российской империи юго-западная граница города доходит до современных просп. Жукова и ул. Денисовской, северо-восточная – до ул. Сурганова. Если в 1860 г. площадь города составляла чуть более 420 га, то в 1900 г. – уже 1760 га. К началу XX в. в городскую черту входят еще несколько притоков Свислочи, в том числе Серебрянка и Переспа. Население города возросло с 27 тыс. чел. в 1861 г. до 134,5 тыс. – в 1917 г. Воздействие на водные объекты усиливается. В связи с застройкой и изменением водного режима происходит постепенное обмеление водотоков. Осушается Францисканское болото – исток Немиги, перекрывается и изменяется русло самой реки в ее нижнем течении. Начинается осушение Комаровского болота – истока Переспы, которая в 1911–1915 гг. на протяжении 1,8 км преобразуется в магистральный канал-водоприемник. Развивается благоустройство города, строится водопровод.

В предвоенные годы Минск входит в число наиболее динамично растущих городов Советского Союза, превращаясь в крупный промышленный и транспортный узел. К 1940 г. его площадь составляет почти 3000 га, а население – 250 тыс. чел. Город равномерно расширяется примерно в тех же направлениях, что и предыдущий период, вбирая в себя некоторые небольшие водотоки и водоемы. Реки Крупка, Лоша с притоками, верхняя и нижняя части Слепни, Словть остаются вне города, но прилегающие к ним территории активно включаются в хозяйственную деятельность. Постепенно пересыхает р. Серебрянка. В 1926 г. реку Немигу в нижней части заключают в коллектор. Активно проводятся работы по осушению Комаровского и Слепянского болот. В 1940–1941 гг. на Свислочи, с целью противостояния паводкам, строится Комсомольское озеро. В самом городе запускается в эксплуатацию общегородская сеть канализации (1930 г.), которая снижает нагрузку на водную систему города. Улицы и площади начинают покрывать асфальтом (1934 г.).

После Великой Отечественной войны происходит освоение территории между образованными клиньями разрастания – появляются кварталы на юго-востоке, юго-западе, западе и северо-западе. К 1950 г. площадь города составляет почти 4000 га, население – более 273 тыс. чел. В 1980 г. площадь составила уже более 12 тыс. га, а население – немногим более 1300 тыс. чел. В границы города попадают реки Крупка, Лоша с притоками, вся Слепня и Словть. В 1951 г. на Свислочи создается Чижевское водохранилище. В середине 1950-х гг. в центральной части города расширяется и углубляется сама река, ее берега укрепляются железобетонными конструкциями. В 1955 г. в коллектор помещается оставшаяся часть Немиги. В 1956 г. появляется Заславское водохранилище. К концу 1960-х гг. укорачиваются и мелеют реки Лоша и Мышка, исчезает р. Серебрянка. Из-за дефицита водоснабжения растущего города для переброса воды из р. Вилия в р. Свислочь с 1968 по 1976 г. строится Вилейско-Минская водная система. В 1975 г. р. Переспа заключается в подземный ливневый коллектор, в 1976 г. – вводятся в эксплуатацию водохранилища Криница и Дрозды. С 1981 по 1985 г. ведутся работы по строительству Слепянской водной системы, вошедшей в состав Вилейско-Минской системы. К концу изучаемого периода в городе почти не остается болот, исчезает р. Словть. В самом городе одновременно с организацией

зеленых зон уплотняется застройка, и все больше земель покрывается искусственными, непроницаемыми для инфильтрации и формирования естественного, стока покрытиями.

С момента создания Республики Беларусь и по настоящее время расширяется освоение новых территорий, незастроенная площадь в пределах МКАД сильно сокращается. На конец декабря 2006 г. территория города составляет 306,68 км². В ноябре 2007 г. в городскую черту передается 5,2715 га (0,05 км²) территории Минского р-на¹, в июле 2008 г. – еще 116,95 га (1,17 км²) территории Смолевичского р-на², а в марте 2012 г. – еще 4095,0812 га (40,95 км²) Минского р-на³. Территория г. Минска уже составляет 34884,43 га (348,84 км²), из которых 30,71 % территории (10714,37 га, или 107,14 км²) находится за пределами Минской кольцевой автомобильной дороги, а 69,29 % (24170,07 га или 241,70 км²) – в ее пределах. Кроме того, положениями Генерального плана города Минска, разработанного в 2010 г., предусмотрено обеспечение территориального роста города до 54,2 тыс. га (542 км²) в границах его перспективного развития⁴. Растет численность населения города. В январе 1990 г. она составила 1623,5 тыс. чел., в январе 2000 г. – 1683,2 тыс. чел., в январе 2010 г. – 1843,7 тыс. чел. По данным на 1 января 2017 г., в городе проживает 1974,8 тыс. чел.⁵.

Застройка города значительно уплотняется, смыкаясь вокруг зеленых коридоров. Природные территории сокращаются и благоустраиваются с предоставлением рекреационных услуг. В черту города входят притоки Свислочи – р. Тарасовка (Качинка), нижняя и средняя части р. Цна, верхняя часть р. Сеница и Тростянка. В результате освоения территории мелеют и высыхают верхние части рек Крупка, Лоша, Мышка и Тростянка, исчезают Малиновка – правый приток Лоши и некоторые ручьи. Отдельные участки Лоши и Сеницы соединяются с канализационной системой города. Верхний и средний участки русла р. Тарасовка преобразуются в каскад отстойников и прудов. Строительные работы и проведение коммуникационных линий ведут к исчезновению мелких непроточных водоемов. Строится Лошицкая водная система.

Таким образом, по мере расширения территории и роста численности населения гидрографическая сеть г. Минска за исторический период сокращается и преобразуется. Для выявления изменений речной сети на современную карту г. Минска были наложены очертания водотоков до их трансформации (рис. 1). Для сравнения дана современная речная сеть города (рис. 2).

Как следует из приведенных рис. 1, 2, под антропогенным воздействием речная сеть города менялась в двух основных направлениях:

- сокращались по протяженности или исчезали естественные водотоки при освоении территории;
- на сохранившихся водотоках создавались искусственные водоемы различного назначения.

Среди упоминаемых в литературных источниках водотоков города за описанный период полностью исчезли такие притоки р. Свислочь, как ручей Ржавец (протяженность составляла около 5,8 км), реки Переспа (3,9 км), Немига (5,5 км), Серебрянка (3,6 км) и Словть (10,5 км). Исчезли также притоки Мышки – ручьи Тиволи (длина равнялась приблизительно 5,5 км) и Грушевский (5,0 км), приток Лоши – р. Малиновка (5,2 км). Почти исчезла р. Крупка длиной около 3,5 км – в низовье остается периодически наполняемый осадками ручей, протяженностью до 0,5 км. Только в низовье сохранилась р. Тарасовка (Качинка), в низовье и нижнем течении – Тростянка. Из-за высыхания в верхних частях сократились в длину Лоша, Мышка и Сеница.

За счет сокращения длины и уменьшения извилистости участков водотоков их общая протяженность сократилась более чем на треть [36]. В связи с зарегулированностью стока русловые процессы оказались законсервированными. Спряmlена или превращена в водохранилища большая часть участков русел, пойменные бровки укрепляются искусственными материалами, части речных звеньев помещаются в коллекторы.

Мелкие водоемы города также претерпели изменения. Многие из них исчезли в процессе освоения территории. Большая часть из сохранившихся располагается на участках высохших русел рек и ручьев. Строительные работы и проведение коммуникационных линий приводят к их исчезновению и в настоящее время.

Современная речная сеть г. Минска вместе с пригородом представлена р. Свислочь с шестью притоками и шестью водохранилищами. На каждом из притоков р. Свислочь, кроме р. Цна, также имеются русловые искусственные водоемы. В северной части города размещается единственное наливное

¹ Указ Президента Республики Беларусь от 22 ноября 2007 года № 592 «Об изменении границ г. Минска и Минского района».

² Указ Президента Республики Беларусь от 21 июля 2008 года № 397 «Об изменении границ г. Минска и Смолевичского района».

³ Указ Президента Республики Беларусь от 26 марта 2012 года № 141 «Об изменении границ г. Минска и Минского района».

⁴ Указ Президента Республики Беларусь от 23 апреля 2003 года № 165 «Об утверждении Генерального плана г. Минска с прилегающими территориями и некоторых вопросах его реализации» (в редакции от 15 сентября 2016 г. № 344).

⁵ Численность населения по областям и городу Минску [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Минск, 1998–2018. URL: <http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika>.

Цнянское водохранилище. В некоторых частях города, в основном на месте бывших русел водотоков, сохранились пруды. Однако вместе со строительством Лошицкой водной системы, осуществлением мероприятий по очистке русла р. Свислочь одновременно сокращается число мелких непроточных водоемов, наличие которых не учитывается при осуществлении планов градостроительства¹.



Рис. 1. Речная сеть г. Минска до ее преобразования: 1 – р. Свислочь; 2 – р. Тарасовка (Дививелка, Качинка); 3 – руч. Домбровка; 4 – руч. Ржавец; 5 – р. Цна; 6 – р. Крупка (Крупича); 7 – р. Переспа; 8 – р. Виранка; 9 – р. Немига; 10 – р. Серебрянка (руч. Серебряный); 11 – р. Лоша (Лошица); 12 – р. Мышка (Мышанка); 13 – руч. Тиволи; 14 – руч. Грушевский (р. Мухля); 15 – р. Малиновка; 16 – р. Слепня (Слепянка); 17 – руч. Ботанический; 18 – р. Словь (Словсть, Дразня); 19 – р. Сеница; 20 – р. Тростянка (Ельница, Стиклевка, Синявка)

Fig. 1. River network of Minsk before her transformation: 1 – Svisloch river; 2 – Tarasovka (Divivelka, Kachinka) river; 3 – Dombrovka brook; 4 – Rzhavets brook; 5 – Tsna river; 6 – Krupka (Krupitsa) river; 7 – Perespa river; 8 – Viranka river; 9 – Nyamiha river; 10 – Serebryanka river (Silver brook); 11 – Losha (Loshitsa) river; 12 – Myshka (Myshanka) river; 13 – Tivoli brook; 14 – Grushevsky brook (Mukhlya river); 15 – Malinovka river; 16 – Slepnya (Slepyanka) river; 17 – Botanicheskyy brook; 18 – Slovst (Slovst, Drazhnya) river; 19 – Senitsa river; 20 – Trostyanka (Elnitsa, Stiklevk, Sinyavk) river

Заключение

Проведенный анализ изменения гидрографической сети г. Минска свидетельствует:

1. За исторический период существования города по мере приближения к настоящему времени экспоненциально растут его площадь и население, а каждый новый исторический период отличается расширяющимся (несмотря на исчезновение таких ранних факторов освоения территории, как вырубка леса, выпас скота и др.) и нарастающим антропогенным воздействием – усугублением некоторых старых видов воздействия и появлением новых.

¹ Генеральный план г. Минска (корректировка). Основные положения градостроительного развития города Минска. Система градостроительных регламентов / Комитет архитектуры и градостроительства Мингорисполкома, УП «Минскград». Минск, 2010.

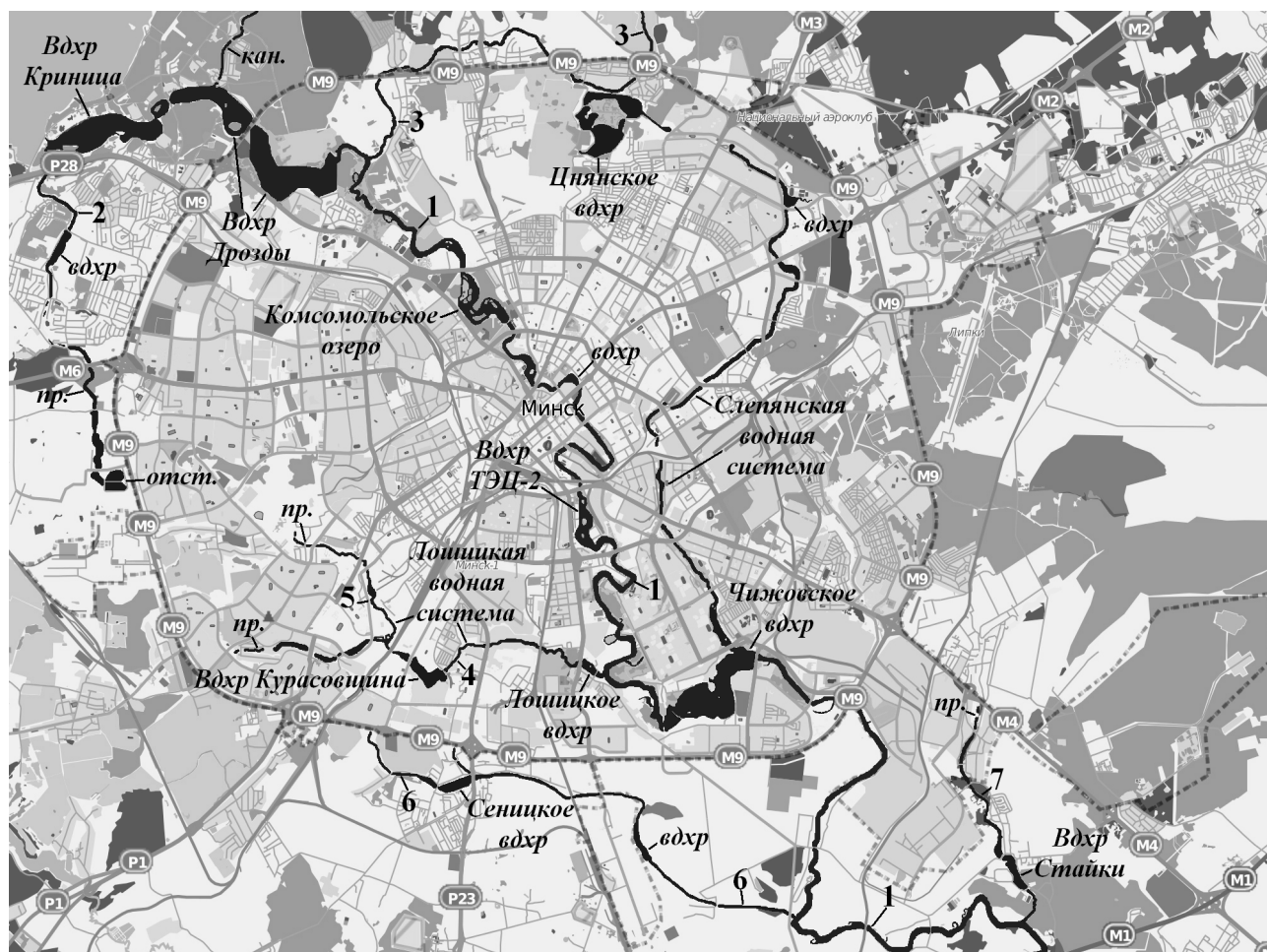


Рис. 2. Современное состояние речной сети г. Минска: 1 – р. Свислочь; 2 – р. Качинка; 3 – р. Цна; 4 и 5 – реки Лошица и Мышанка соответственно в составе Лошицкой водной системы; 6 – р. Сеница; 7 – р. Тростянка; вдхр – водохранилище; кан. – канал; отст. – отстойники; пр. – пруды

Fig. 2. Current state of river network of Minsk: 1 – Svisloch river; 2 – Kachinka river; 3 – Tsna river; 4 and 5 – Loshitsa river and Myshanka river respectively as a part of Loshitskaya water system; 6 – Senitsa river; 7 – Trostyanka river; вдхр – reservoir; кан – canal; отст. – sumps; пр. – ponds

2. В значительной степени водные объекты были преобразованы во II половине XX в., когда была построена Вилейско-Минская водная система. Наибольший антропогенный прессинг они испытывают в настоящее время.

3. Под антропогенным воздействием речная сеть города менялась в двух основных направлениях – сокращались по протяженности или исчезали естественные водотоки, а на некоторых сохранившихся из них создавались искусственные водоемы различного назначения. За счет сокращения длины и уменьшения извилистости участков водотоков их общая протяженность сократилась более чем на треть.

4. В настоящее время вместе со строительством Лошицкой водной системы, осуществлением мероприятий по очистке русла р. Свислочь одновременно сокращается число мелких непроточных водоемов, наличие которых не учитывается при осуществлении планов градостроительства.

Библиографические ссылки

1. Повесть временных лет. СПб., 1999.
2. Слово о полку Игореве – памятник XII века. М., 1962.
3. Шпилевский П. М. Путешествие по Полесью и белорусскому краю. Минск, 2016.
4. Тарасенко В. Р. Древний Минск (по письменным источникам и данным археологических раскопок 1945–1951 гг.) // Материалы по археологии БССР. 1957. Т. 1. С. 182–257.
5. Гісторыя Мінска. Мінск, 2006.
6. Данилевич В. Е. Очерк истории Полоцкой земли до конца XIV столетия. Киев, 1896.
7. Загоруйский Э. М. Древний Минск. Минск, 1963.

8. Загорулский Э. М. Возникновение Минска. Минск, 1982.
9. Штыхаў Г. В. Ці быў у старажытнага Менска яго пратагорад? // Стратегическое планирование и управление развитием городов: материалы междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 2. Минск, 2004. С. 1582–161.
10. Заяц Ю. А. Менск на Свислочи конца XI – XIII в.: проблема формирования поселенческой структуры // Мінск і мінчане: дзесяць стагоддзяў гісторыі (да 940-годдзя горада): Матэрыялы міжнар. навук.-практ. канф. Мінск, 2008. С. 23–30.
11. Кошман В. І., Плавінскі М. А. Да пытання аб абарончых збудаваннях Мінскага замчышча // Матэрыялы па археалогіі Беларусі. 2015. Вып. 26. С. 66–87.
12. Ясинский А. Н. Лекции по истории средних веков. Раннее средневековье (печатано по запискамъ студентовъ). Юрьевъ, 1910.
13. Штыхаў Г. В. Абарончыя збудаванні гарадзшчы на Менцы: да пытання аб паходжанні Менска // Беларускі горад у часе і прасторы: 500 гадоў Полацкай магдэбургіі: зб. навук. прац. Наваполацк, 2001. С. 192–197.
14. Заяц Ю. А. Менская зямля: этапы фарміравання // Беларус. гіст. часопіс. 1993. № 4. С. 8–15.
15. Заяц Ю. А. К проблеме первоначального Менска (сравнительная хронология поселений на реках Немига и Мена) // Материалы по археологии Беларуси. 2005. Вып. 9. С. 26–31.
16. Левко О. Н. Перемена местоположения Минска в связи с формированием раннегосударственной территориально-административной структуры в Полоцкой земле // Мінск і мінчане: дзесяць стагоддзяў гісторыі (да 940-годдзя горада): матэрыялы міжнар. навук.-практ. канф. Мінск, 2008. С. 41–47.
17. Памяць: Гістарычна-дакументальная хроніка Мінска. У 4 кн. Кн. 1-я. Мінск, 2001.
18. Беларускі архіў: у 3 т. / склад. З. Даўгяля. Мінск: Ін-т беларус. культуры, 1927–1930. Т. 3. Менскія акты. Вып. 1 (XV–XVIII ст.). Дакументы, сабраныя і згуртаваныя Археаграфічнай камісіяй Беларускай Акадэміі навук. Мінск, 1931.
19. Старый Минск (из того, что сохранилось) // Архивы и справочства. 2017. № 2. С. 129–136.
20. Боровой Р. В. Историческая топография древнего Минска. Обзор источников и современное состояние проблемы // Гістарычна-археалагічны зборнік. Мінск, 1997. № 12. С. 31–41.
21. Валажынскі У. Г. Мінск: стары і новы. Мінск, 2006.
22. Боровой Р. В. Минские пригороды XVI – начала XX века // Архитектура и строительство. 2008. № 11. С. 46–50.
23. Военно-статистическое обозрение Российской империи, издаваемое по Высочайшему повелению при 1-м отделении Департамента Генерального штаба (трудами офицеров Генерального штаба). Т. 9, ч. 4: Минская губерния. СПб., 1848.
24. Матеріалы для географіі і статистики Росіі, зібрані офіцерамі Генеральнаго штаба. Минская губернія / сост. Ген. штаба подполк. И. Зеленский. СПб., 1864.
25. Ельскі А. К. Выбранае. Мінск, 2004.
26. История Минска. Минск, 1957.
27. Король В. А., Воинов А. П., Заславский Е. Л. Минск: Послевоенный опыт реконструкции и развития. М., 1966.
28. Минск – город-герой: Справочник. Минск, 1976.
29. Потапов Л. С. Силуэт Минска. Минск, 1980.
30. Минск: энциклопедический справочник. Изд. 2-е, доп., перераб. Минск, 1983.
31. Минск: план города. М., 1986.
32. Вилейско-Минская водная система. Минск, 1987.
33. Бутримович Т. В. Схема планировки пригородной зоны Минска // Архитектура и строительство. 2008. № 11. С. 12–20.
34. Струк М. И., Живнач С. Г. Экологическое состояние ландшафтов пригородной территории Минска // Природопользование. 2011. Вып. 19. С. 174–182.
35. Бон Т. М. «Мінскі феномен». Гарадское планаванне і ўрбанізацыя ў Савецкім Саюзе пасля 1945 г. Мінск, 2016.
36. Радчикова Е. С. Исследование истории трансформации гидрографической сети урбанизированных территорий на примере г. Минска // Российский журнал прикладной экологии. 2017. № 1. С. 44–49.

References

1. [Story of temporary years]. St. Petersburg, 1999 (in Russ. and Old Russ.).
2. [Tale of Igor's Campaign – a monument of the 12th century]. Moscow, 1962 (in Russ. and Old Russ.).
3. Shpilevsky P. M. [A travel across Polesie and the Belarusian edge]. Minsk, 2016 (in Russ.).
4. Tarasenko V. P. [Ancient Minsk (to written sources and data of archeological excavations of 1945–1951)]. *Archeology materials of BSSR*. 1957. Vol. 1. P. 182–57 (in Russ.).
5. [History of Minsk]. Minsk, 2006 (in Belarus.).
6. Danilevich V. E. [Sketch of history of the Polotsk land until the end of the XIV century]. Kiev, 1896 (in Old Russ.).
7. Zagorulsky E. M. [Ancient Minsk]. Minsk, 1963 (in Russ.).
8. Zagorulsky E. M. [Emergence of Minsk]. Minsk, 1982 (in Russ.).
9. Shtykhov G. V. [Whether ancient Minsk had his predecessor?]. *Strategic planning and management of development of the cities: Materials of the international scientific and practical conference*. In 2 p. P. 2. Минск, 2004. P. 158–161 (in Belarus.).
10. Zayats Y. A. [Mensk on the Svisloch river in the end of the XI–XIII century: problem of formation of settlement structure]. *Minsk and Minsk: ten centuries of history (to the 940 anniversary of the city): materials of the international scientific and practical conference*. Minsk, 2008. P. 23–30 (in Russ.).
11. Koshman V. I., Plavinski M. A. [To the question of defensive works of the Minsk castle]. *Materials on archeology of Belarus*. 2015. Issue 26. P. 66–87 (in Belarus.).
12. Yasinskiy A. N. [Lectures on history of the Middle Ages. The early Middle Ages (printed on notes of students)]. Yurjev, 1910 (in Old Russ.).
13. Shtykhov G. V. [Defensive constructions of the ancient settlement on Menka: to a question of origin of Minsk]. *The Belarusian city in time and space: 500 years of the Polotsk magdeburgiya: collection of scientific works*. Novopolotsk, 2001. P. 192–197 (in Belarus.).
14. Zayats Y. A. [Minsk land: formation stages]. *Belarusian historical magazine*. 1993. No. 4. P. 8–15 (in Belarus.).

15. Zayats Y. A. [To a problem of initial Mensk (comparative chronology of settlements on the Nyamiha and Mena rivers)]. *Materials on archeology of Belarus*. 2005. Issue 9. P. 26–31 (in Russ.).
16. Levko O. N. [Change of location of Mensk in connection with formation of the early government territorial and administrative institution in the Polotsk land]. *Minsk and Minsk: ten centuries of history (to the 940 anniversary of the city): Materials of the international scientific and practical conference*. Minsk, 2008. P. 41–47 (in Russ.).
17. [Memory: historical and documentary chronicle of Minsk]. In 4 books. B. 1. Minsk, 2001 (in Belarus.).
18. [Belarusian archive: in 3 vol. Collected by Z. Dawgyala. Minsk: Institute of Belarusian cultures, 1927–1930. Vol. 3. Minsk acts. Issue 1 (XV–XVIII snt). Documents, collected and grouped by the archaeography commission of the Belarusian Academy of Sciences]. Minsk, 1931 (in Belarus.).
19. [Old Minsk (from what has remained)]. *Archives and office-work*. 2017. No. 2. P. 129–136 (in Russ.).
20. Borovoj R. V. [Historical topography of ancient Minsk. Review of sources and current state of a problem]. *Historical and archaeological collection*. 1997. No. 12. P. 31–41 (in Russ.).
21. Valazhynski U. G. [Minsk: old and new]. Minsk, 2006 (in Belarus.).
22. Borovoj R. V. [The Minsk suburbs of XVI – beginnings of the 20th century]. *Architecture and construction*. 2008. No. 11. P. 46–50 (in Russ.).
23. [The military and statistical review of the Russian Empire published on the Highest command at the 1st office of Department of the General Staff (works of general-staff officers)]. Vol. 9, p. 4: Minsk province. St. Petersburg, 1848 (in Russ.).
24. Materials for geography and statistics of Russia collected by officers of the General Staff. Minsk province. The lieutenant colonel of the General Staff I. Zelensky has made. St. Petersburg, 1864 (in Old Russ.).
25. Elski A. K. [Chosen works]. Minsk, 2004 (in Belarus.).
26. [History of Minsk]. Minsk, 1957 (in Russ.).
27. Korol V. A., Voinov A. P., Zaslavsky E. L. Minsk: Post-war experience of reconstruction and development. Moscow, 1966 (in Russ.).
28. [Minsk – the hero city]: Reference book. Minsk, 1976 (in Russ.).
29. Potapov L. S. [Silhouette of Minsk]. Minsk, 1980 (in Russ.).
30. [Minsk: encyclopedic reference book]. Prod. 2-nd. Minsk, 1983 (in Russ.).
31. [Minsk: city map]. Moscow, 1986 (in Russ.).
32. [Vileisko-Minskaya water system]. Minsk, 1987 (in Russ.).
33. Butrimovich T. V. [Scheme of planning of the suburban territory of Minsk]. *Architecture and construction*. 2008. No. 11. P. 12–20 (in Russ.).
34. Struk M. I., Zhivnach S. G. [Ecological condition of landscapes of the suburban territory of Minsk]. *Environmental management*. 2011. Issue 19. P. 174–182 (in Russ.).
35. Bon T. M. [«Minsk phenomenon». City planning and urbanization in the Soviet Union after 1945]. Minsk, 2016 (in Belarus.).
36. Radchikova E. S. [A research of history of transformation of hydrographic network of the urbanized territories on the example of Minsk]. *Russian magazine of applied ecology*. 2017. No. 1. P. 44–49 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 07.05.2018
Received by editorial board 07.05.2018

УДК 577.35'3:632.938.1

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСТЕНИЙ И ФИТОПАТОГЕНОВ: ВРОЖДЕННЫЙ ИММУНИТЕТ

Л. Ф. КАБАШНИКОВА¹⁾

¹⁾Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Беларусь

Изложены современные представления о молекулярных механизмах врожденного иммунитета растений. Охарактеризованы мембранные паттерн-распознающие рецепторы, которые являются триггером при неспецифическом иммунном ответе и приводят в действие все последующие ответные реакции, а также цитоплазматические специфические рецепторы – белки устойчивости (R-белками), запускающие специфический иммунный ответ. Рассмотрены основные пути трансдукции рецепторных сигналов, обеспечивающих реализацию иммунного ответа в растительной клетке с участием фитогормонов, митоген-активируемых протеинкиназ (MAPKs), транскрипционных факторов (TF), что в итоге приводит к выработке связанных с резистентностью метаболитов (RRM) и белков (RRP), которые непосредственно подавляют развитие патогенов.

Ключевые слова: фитопатогены; устойчивость растений; врожденный иммунитет; метаболический путь; рецепторы; эффекторы; паттерн-активированный иммунитет; эффектор-активированный иммунитет.

MOLECULAR MECHANISMS OF PLANTS AND PHYTOPATHOGENS INTERACTION: INNATE IMMUNITY

L. F. KABASHNIKOVA^a

^aInstitute of Biophysics and Cell Engineering of National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya street, 27, 220072, Minsk, Belarus

The article presents modern ideas about the molecular mechanisms of innate plant immunity. Membrane pattern-recognition receptors that are triggered in a nonspecific immune response are characterized and all subsequent responses are triggered, as well as cytoplasmic specific receptors – resistance proteins (R-proteins) triggering the specific immune response. The main pathways of receptor signals transduction providing realization of immune response in a plant cell with the participation of phytohormones, mitogen-activated protein kinases (MAPKs), transcription factors (TF) eventually leading to the development of resistance-related metabolites (RRM) and proteins (RRP), which directly suppress the development of pathogens, are presented.

Key words: phytopathogens; plant resistance; innate immunity; metabolic pathway; receptors; effectors; pattern-triggered immunity; effector-triggered immunity.

Введение

Микроорганизмы, которые распространены повсеместно, постоянно готовы усваивать доступные им органические вещества, даже если эти вещества являются составными частями другого живого организма. Способность противостоять атаке патогенов определяет биологический успех живого организма.

Образец цитирования:

Кабашникова Л. Ф. Молекулярные механизмы взаимодействия растений и фитопатогенов: врожденный иммунитет // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 26–37.

For citation:

Kabashnikova L. F. Molecular mechanisms of plants and phytopathogens interaction: innate immunity. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 26–37 (in Russ.).

Авторы:

Людмила Федоровна Кабашникова – доктор биологических наук, доцент, член-корреспондент НАН Беларуси; заведующий лабораторией прикладной биофизики и биохимии.

Authors:

Liudmila F. Kabashnikova, doctor of sciences (biology), associated professor, corresponding member; head for the laboratory of applied biophysics and biochemistry.
kabashnikova@ibp.org.by

Таким образом, иммунитет (*лат. immunitas* – «освобождение от чего-либо») – это способность живого организма препятствовать вмешательству в его жизнь гетеротрофного организма, и в первую очередь микроорганизма. В настоящее время под иммунитетом понимают невосприимчивость (устойчивость) организма к инфекционной болезни при контакте с ее возбудителем и наличии условий, способствующих заражению.

Растения, в отличие от позвоночных животных, лишены антител и способности к фагоцитозу, не имеют кровеносной системы и гуморальных факторов иммунитета. Взамен этого каждая растительная клетка обладает сформированной заранее и/или индуцируемой защитой от широкого круга фитопатогенов. У растений, как и у животных, различают два типа иммунитета: врожденный (естественный) и приобретенный (или индуцированный). В настоящем исследовании изложены современные представления о молекулярных механизмах врожденного иммунитета растений.

Общие представления о молекулярных механизмах врожденного иммунитета растений

Врожденный или естественный иммунитет – это свойство растений не поражаться (не повреждаться) той или иной болезнью (вредителем). Он передается по наследству из поколения в поколение. В пределах врожденного различают пассивный и активный иммунитет. Однако результаты многочисленных исследований приводят к выводу, что деление иммунитета растений на активный и пассивный весьма условно. *Пассивный* иммунитет представляет собой свойство растений препятствовать внедрению патогена и развитию его в тканях растения-хозяина. Он существует независимо от наличия паразита. *Активным* иммунитетом называют свойство растений активно реагировать на внедрение в него паразита [1, с. 16].

За последние два десятилетия прогресс в молекулярном анализе иммунной системы растений выявил ключевые элементы сложной цепи ответных реакций растительного организма при патогенезе [2, с. 720]. Современные представления о нем характеризуют взаимодействие молекул, секретируемых патогенами, с молекулами растений-хозяев, что приводит к активации множественных сигнальных путей, лежащих в основе иммунного ответа. В последние годы ученые рассматривают системную биологию как перспективный подход для выявления молекулярных механизмов взаимодействий в системе «растение–патоген» и предсказуемость их результатов. По мере изучения данной проблемы становится очевидным, что разработка сложных моделей патогенеза растений, включающих растительные, патогенные и климатические характеристики, представляет собой главную научную проблему, связанную с формированием агротехнологий будущего.

Несмотря на то, что растения не имеют защитных циркулирующих специализированных клеток (лейкоцитов), иммуноглобулинов и др., как животные организмы, тем не менее у растений есть в наличии так называемый врожденный иммунитет, которым обладает каждая растительная клетка. Растения также реализуют механизмы формирования иммунной памяти, которые, например, были продемонстрированы на табаке при заражении вирусом табачной мозаики [3, с. 90].

Иммунитет растений представляет собой сложную многоуровневую систему с несколькими линиями защиты. Чтобы получить доступ к питательным веществам растения-хозяина и завершить свой жизненный цикл, патоген должен пройти сначала пассивные защитные механизмы. К ним относятся такие структурные барьеры, как кутикула, клеточная стенка и конститутивно продуцируемые антимикробные соединения [4, с. 2–3]. В дополнение к этим пассивным механизмам растения обладают двухуровневой активно индуцируемой иммунной системой, которая включает неспецифический и специфический врожденный иммунитет. *Неспецифический иммунитет* – это первый уровень иммунного ответа или паттерн-активированный иммунитет (pattern-triggered immunity, PTI), который ассоциирован с микробными молекулярными структурами (pathogen-associated molecular patterns, PAMP). PAMP представляют собой такие широко консервативные микробные молекулы, как липополисахариды, пептидогликаны, бактериальный флагеллин или грибковый хитин, которые воспринимаются поверхностными рецепторами растительных клеток, называемыми паттерн-распознающими рецепторами (pattern-recognition receptor, PRRs). Хорошо документированным примером является распознавание пептида flg22 из бактериального флагеллина рецептором FLS2 растений арабидопсиса [2, с. 720]. Во многих случаях этой линии защиты (PTI) достаточно для борьбы с атакой патогенов и поддержания здоровья растений. Итак, благодаря эволюции, патогены научились обходить систему защиты растений на уровне распознавания PRRs и проникать в клетки.

Специфический иммунитет – это второй уровень защиты растений или эффектор-активированный иммунитет (effector-triggered immunity, ETI). Он опосредуется белками внутриклеточной резистентности (R-белками), которые распознают молекулы – эффекторы, вводимые патогенами в клетки растений [5, с. 2]. В отличие от PTI, который придает растениям устойчивость к широкой группе микроорганизмов, ETI специфичен для изолятов микроорганизмов, продуцирующих данный эффектор, и приводит

к полному сопротивлению, часто сопровождаемому быстрой запрограммированной клеточной смертью, называемой гиперчувствительной реакцией (hypersensitive response, HR) [6, с. 1249].

Следует отметить, что тысячи генов растений и патогенов по-разному экспрессируются во время патогенеза [7, с. 3058], однако до сих пор функция многих из этих генных продуктов остается неизвестной. Кроме того, в естественной среде растения подвергаются воздействию постоянно изменяющихся условий внешних факторов, находятся в окружении патогенных и непатогенных микроорганизмов (микробиоты), регулируют свои физиологические процессы в изменяющихся условиях произрастания (абиотический стресс) [8, с. 211]. Со стороны микроорганизмов активность клеток должна быть адаптирована не только для преодоления механизмов защиты растений, но и для того, чтобы возбудитель мог питаться ресурсами, предоставляемыми растением-хозяином, конкурировать с другими микроорганизмами, а также адаптироваться к изменениям в окружающей среде. Это, в частности, подразумевает манипулирование функциями клетки-хозяина – превращение молекул-хозяев в легко усваиваемые соединения и их транспорт [9, с. 528]. Следовательно, метаболизм растений и патогенов взаимосвязан и должен рассматриваться как единое целое.

Паттерн-распознающие рецепторы растений

Неспецифический иммунитет растений (PTI) контролируется набором определенных трансмембранных рецепторов – паттерн-распознающих рецепторов (PRRs) [2, с. 720]. Итак, распознавание консервативных микробных доменов (также называемых патоген-ассоциированными молекулярными структурами, PAMP) с помощью PRRs инициирует активацию митоген-активируемых протеинкиназ (MAPKs), генерацию активных форм кислорода (АФК), выделение ионов Ca^{2+} , транскрипционное перепрограммирование, биосинтез гормонов и отложение каллозы в клеточной стенке [10, с. 1].

В отличие от животных, которые имеют рецепторные тирозинкиназы (receptor tyrosine kinases, RTK), 7 трансмембранных рецепторов, содержащих G-белок (G protein- coupled receptors, GPCRs) и Toll-подобные рецепторы на плазматической мембране для восприятия гормонов роста, сигналов окружающей среды и сигналов опасности, возникающих при атаке патогенов, растения имеют рецептор-подобные киназы (receptor like kinase, RLK) (~ 410 в *Arabidopsis*) и рецептор-подобные белки (receptor like protein, RLP) (~ 170 в *Arabidopsis*) для выполнения этих разнообразных функций [11, с. 618].

Растительные RLK являются аналогами RTK животных и содержат эктодомен (ectodomain, ECD), представляющий собой одноимпульсный трансмембранный домен, и цитоплазматический киназный домен. RLP растений, по существу, является RLK, которые лишены цитоплазматического домена. ECDs, RLK и RLP сильно варьируют, обеспечивая возможность распознавания широкого спектра лигандов, включая стероиды, пептиды, полисахариды и липополисахариды. Следует отметить, что у растений, наряду с RLK и RLP, которые действуют как паттерн-распознающие рецепторы PRR, воспринимая сигналы опасности, имеются другие аналогичные рецепторы, которые регулируют рост и развитие, размножение, симбиоз и толерантность к абиотическим стрессам [12, с. 2–5].

Рецептор XA21 риса (*Oryza sativa*) является первым обнаруженным PRR, который участвует в формировании устойчивости против бактериальной инфекции *Xanthomonas oryzae pv. oryzae* [цит. по 13, с. 33]. Лигандом для рецептора является сульфатированный пептид белка Ax21, который представлен во всех видах бактерий рода *Xanthomonas*. У *Arabidopsis* были хорошо изучены два дополнительных PRR растений: чувствительный к флагеллину 2 (FLS2) и фактор элонгации (EF)-Tu (EFR), которые распознают flg22-пептид из жгутиковых бактерий и EF-Tu-пептид elf18 соответственно [цит. по 13, с. 33].

На рис. 1 представлена структура паттерн-распознающих рецепторов PRR, которые состоят из внеклеточного домена, богатого лейцином (leucine-rich repeats domain, LRR domain), трансмембранного домена (transmembrane domain, TM), прилегающего к мембране домена (juxtamembrane domain, JM) и внутриклеточного не-аргинин-аспаратного киназного домена (non-arginine-aspartate kinase, non-RD) [14, с. 1].

Все рецепторные киназы растений, охарактеризованные до настоящего времени и несущие мотив non-RD-киназы, участвуют в распознавании консервативных микробных структур [цит. по 14, с. 2]. Non-RD-киназы обычно содержат цистеин (C) или глицин (G) перед остатком каталитического аспартата (D). Напротив (рис. 1), более обширная группа RD-киназ имеет аргинин (R), непосредственно предшествующий консервативному каталитическому аспартату (D). Известно, что RD-киназы выполняют более разнообразные функции и часто связаны с процессами развития растений. RD-киназы также являются партнерами non-RD-киназ в сети трансдукции иммунного ответа. BAK1-киназа у *Arabidopsis*, являющаяся RD-киназой, первоначально была идентифицирована как положительный регулятор брассиностероидных ответов путем образования *in vivo* лиганд-зависимого комплекса с рецептором BRI1 [цит. по 14, с. 2]. Дальнейшие исследования свидетельствуют, что BAK1 также участвует в PRR-

опосредованной передаче сигналов, физически взаимодействуя с non-RD-киназами FLS2 и EFR. Мутанты, лишённые BAK1, демонстрируют реакции на другие консервативные микробные структуры, включая HrpZ (гиперчувствительный ответ и патогенность Z), липополисахариды и пептидогликаны. Предполагают также, что XA21-ассоциированная киназа 1 риса (XAK1) – ортолог BAK1, необходима для опосредованного XA21 иммунитета. Эти результаты свидетельствуют, что PRR включают core-регулируемые домены, несущие RD-киназы, в качестве сигнальных партнеров для трансдукции иммунного ответа.

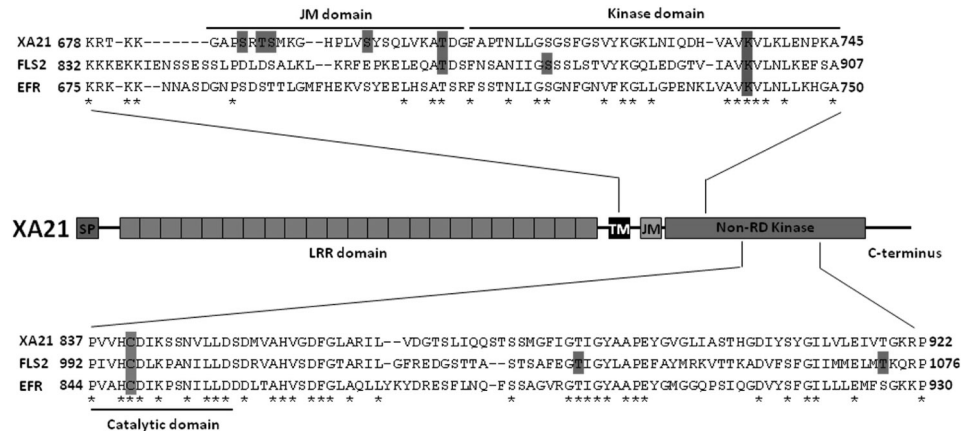


Рис. 1. Характеристика Ser /Thr остатков паттерн-распознающих рецепторов растений [14, с. 2].

Вверху: идентифицированные и предполагаемые сайты автофосфорилирования XA21 риса (*Oryza sativa*) и FLS2 и EFR *Arabidopsis* (красный цвет). Консервативный лизин, который необходим для аутофосфорилирования (зеленый цвет). JM, киназа и каталитические домены (черный цвет). В центре: доменная структура риса XA21. Внизу: Сопоставлены каталитические домены XA21, FLS2 и EFR. Цистеин, который заменяет R в этих non-RD-киназах (синий цвет). Предполагаемые сайты автофосфорилирования FLS2 (красный цвет). Аминокислоты, которые совпадают у XA21, FLS2 и EFR, отмечены «*». SP, сигнальный пептид; LRR – домен, 23 лейцин-богатых повтора; TM – трансмембранный домен; JM – прилегающий к мембране домен; non-RD-киназа – неаргинин-аспартат-киназа; XA21 риса, *Xanthomonas resistance* – 21; FLS2 – *Arabidopsis*, флагеллин-чувствительный – 2; EFR, фактор элонгации арабидопсиса – Tu-рецептор

Fig. 1. Characterized Ser/Thr residues of pattern recognition receptors in plants [14, с. 2].

Top: Identified and proposed autophosphorylation sites on rice XA21 and *Arabidopsis* FLS2 and EFR are highlighted in red. The conserved lysine that is essential for autophosphorylation is highlighted in green. The JM, kinase, and catalytic domains are indicated by black brackets. Center: The domain structure of rice XA21. Bottom: Alignment of the catalytic domains of XA21, FLS2, and EFR. The cysteine that replaces the R in these non-RD kinases is highlighted in blue. Putative autophosphorylation sites of FLS2 are highlighted in red. Amino acids that are conserved between XA21, FLS2, and EFR are marked as «*». SP, signal peptide; LRR domain, 23 leucine-rich repeats domain; TM – transmembrane domain; JM – juxtamembrane domain; non-RD kinase – non-arginine-aspartate kinase; XA21, rice *Xanthomonas resistance* – 21; FLS2 – *Arabidopsis* flagellin sensitive – 2; EFR, *Arabidopsis* elongation factor – Tu-receptor

В последних научных исследованиях раскрыто множество новых PRR, их соответствующие лиганды и механизмы, лежащие в основе активации PRR и внутриклеточной сигнализации. В табл. 1 представлены известные PRRs, которые относятся к генетически подтвержденным рецепторам, чье связывание с микробными структурами было биохимически продемонстрировано [11, с. 620].

Предполагаемые PRRs относятся к рецептор-подобным структурам с генетически подтвержденными функциями в распознавании микробных эффекторов, для которых еще не показано прямое связывание. Как видно из приведенной табл. 1, растения развертывают большое количество RLK и RLP в качестве паттерн-распознающих рецепторов PRR, которые обнаруживают микробные структуры и ассоциированные с ними молекулы растения-хозяина, образуя первый уровень активной защиты растений при атаке патогенами (PTI).

Таблица 1

Известные и предполагаемые PRRs, вовлеченные в иммунитет растений*

Table 1

Known and probable PRRs involved in plant immunity*

Наименование Name	Семейство Family	Лиганд Ligand	Растение Plant	Литературные источники References
FLS2	LRR-RK	flg22	Arabidopsis	Gómez-Gómez and Boller (2000); Bauer, et al. (2001)
FLS3	LRR-RK	flgII-28	Tomato	Hind, et al. (2016)
EFR	LRR-RK	elf18	Arabidopsis	Kunze et al. (2004); Zipfel, et al. (2006)
PEPR1/2	LRR-RK	Peps	Arabidopsis	Yamaguchi, et al. (2006); Huffaker, et al. (2006); Huffaker, and Ryan (2007); Krol, et al. (2010); Yamaguchi, et al. (2010)
XA21	LRR-RK	RaxX21-sY	Rice	Pruitt, et al. (2015)
DORN1	Lectin-RK	Eatp	Arabidopsis	Choi, et al. (2014)
LORE	Lectin-RK	LPS	Arabidopsis	Ranf, et al. (2015)
WAK1	EGF-Like-RLK	OGs	Arabidopsis	Decreux and Messiaen (2005); Brutus, et al. (2010)
XPS1	LRR-RK	xup25	Arabidopsis	Mott, et al. (2016)
OsCERK1	LysM-RLK	Chitin	Rice	Shimizu, et al. (2010)
CEBiP	LysM-RP	Chitin	Rice	Kaku, et al. (2006)
LYM1/3	LysM-RP	PGNs	Arabidopsis	Willmann, et al. (2011)
LYP4/6	LysM-RLP	PGNs/chitin	Rice	B. Liu, et al. (2012)
RLP23	LRR-RP	nlp20	Arabidopsis	Bi, et al. (2014); Albert, et al. (2015)
NbCSPR	LRR-RP	csp22	<i>N. benthamiana</i>	Saur, et al. (2016)
LeEix1	LRR RP	Eix	Tomato	Bar, et al. (2010)
LeEix2	LRR-RP	Eix	Tomato	Ron and Avni (2004)
ReMax/RLP1	LRR-RLP	eMax	Arabidopsis	Jehle, et al. (2013)
Ve1	LRR-RLP	Ave1	Tomato	de Jonge, et al. (2012)
Cf-2	LRR-RLP	Avr2	Tomato	Dixon, et al. (1996); Luderer, et al. (2002)
Cf-4	LRR-RLP	Avr4	Tomato	Joosten, et al. (1997); Thomas, et al. (1997)
Cf-4E	LRR-RLP	Avr4E	Tomato	Takken, et al. (1999); Westerink, et al. (2004)
Cf-9	LRR-RLP	Avr9	Tomato	Van den Ackerveken, et al. (1992); Jones, et al. (1994)
Cf-5	LRR-RLP	Unknown	Tomato	Dixon, et al. (1998)
RLP30	LRR-RLP	SCFE1	Arabidopsis	Wang, et al. (2008); Zhang, et al. (2013)
ELR	LRR-RLP	Elicitin	Potato	Du, et al. (2015)

Примечание. По [11, с. 620].

Эффектор-распознающие рецепторы растений

Эволюция патогенов позволила им приобрести способность обхода защиты РТИ: становиться либо нераспознаваемыми для рецепторов растений путем мутаций в генах, кодирующих эпитопы, или элиминации распознаваемых участков, либо ингибировать активность последних. Вследствие коэволюции с болезнетворными микроорганизмами, растения приобрели способность синтезировать специфичные белки устойчивости к определенным эффекторам проникших в клетки патогенов, в чем и проявляется специфический иммунный ответ.

Специализированные патогенные микроорганизмы продуцируют специфические внутриклеточные элиситоры [10, с. 39] – эффекторы, кодируемые специфическими генами авирулентности (AVR). Характерные свойства элиситоров: взаимодействие с эффектор-активируемыми рецепторами растительных клеток и запуск сигналов «тревоги». Продуцентами специфических эффекторов являются биотрофы, хотя некоторые некротрофы также продуцируют эффекторы.

Эффекторы, в зависимости от их доменов, распознаются специфическими рецепторами растений (R-белками), кодируемыми генами R [15, с. 19249]. Являясь второй линией защитного ответа, эффекторы «запускают» соответствующие гены, что приводит к специфическому гиперчувствительному ответу, чтобы остановить патоген, который обычно называют эффектор-активированным иммунитетом (ETI), качественной устойчивостью или вертикальной устойчивостью. Такая устойчивость считается моногенной и рассматривается на основе гипотезы взаимодействия «ген-на-ген» [16, с. 275]. Однако эти эффектор-активированные рецепторные гены являются только генами слежения, а настоящие гены устойчивости, которые вызывают гиперчувствительный ответ, представляют собой NADPH-оксидазу, каллозо-синтазу и т. д.

R-белки состоят из 2-х основных компонентов – LRRs и нуклеотид-связывающего домена (NB). Они родственны таким животным белкам, как NOD/NLR/STAND ATPases [цит. по 13, с. 34]. NB-LRRs цитоплазматические рецепторы могут непосредственно взаимодействовать с эффекторами либо опосредованно через белки, на которые воздействуют эффекторы. В связи с тем, что у растений нет соматической перестройки генов иммунных рецепторов, аналогичной той, которая происходит в лимфоцитах животных, число генов, кодирующих рецепторы врожденного иммунитета, в геномах растений значительно выше, чем число генов PRRs в геномах млекопитающих.

R-белки подразделяются на CC-NB-LRRs (содержащие на N-конце домен типа «суперспираль» и на TIR-NB-LRRs (содержащие на N-конце TIR-домен, гомологичный Toll и рецептору IL-1 у животных) (рис. 2). NB участвует в связывании и гидролизе аденозинтрифосфата (АТФ), что приводит к конформационным изменениям в молекуле рецептора и последующей активации сигнального каскада. NB-домен входит в состав NB-ARC-домена, который обнаруживается в таких молекулах, как Araf-1, CED-4, R-белках. Домены NACHT, NOD похожи по своей структуре на NB-ARC, присутствуют в белках цитоплазмы животных. Несмотря на то, что белки, имеющие в своем составе NB-ARC/NACHT/NOD-домены, структурно схожи между собой, считается, что они возникли независимо [цит. по 13, с. 35].

LRRs, как и в случае RPPs, участвует в непосредственном связывании с PAMPs. CC-домен, наряду с TIR-доменом, гомологичным Toll и рецептору IL у животных, могут участвовать в непрямом распознавании патогена, благодаря взаимодействию с модифицированными в результате действия патогена, собственными растительными белками, также TIR-домен участвует в гомотипической олигомеризации. SD-домены, характерные для семейства Solanaceae, относятся к одному из семейств ДНК-связывающих доменов транскрипционных факторов [цит. по 13, с. 35].

Распространенность как в животном, так и в растительном царстве белковых структур, в состав которых входят LRR и NB-домены, по-видимому, указывает на физико-химическую «пригодность» такой структуры для осуществления двух сопряженных процессов: узнавания лиганда и дальнейшей передачи сигнала [17, с. 267]. Факторы транскрипции WRKY являются одним из крупнейших семейств регуляторов транскрипции, обнаруженных исключительно в растениях. Они имеют разнообразные биологические функции: участвуют в регуляции биотических и абиотических стрессовых реакций, процессов старения, развития семян и трихом, эмбриогенеза. WRKY могут функционировать как транскрипционные активаторы или репрессоры в различных гомо- и гетеродимерных комбинациях.

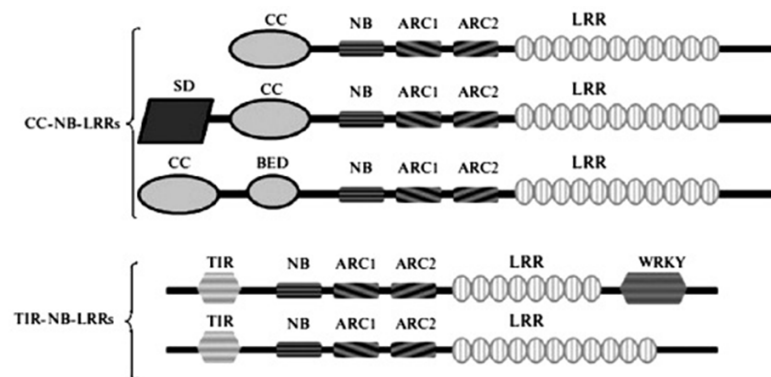


Рис. 2. Схематическое изображение R-белков растений (пояснения в тексте) [13, с. 35]

Fig. 2. Schematic representation of plant R-proteins (detailed description in the text) [13, p. 35]

За последние 15 лет более 50 растительных геномов были секвенированы и собраны [15, с. 19249]. Несмотря на этот большой ресурс, только относительно небольшое количество R-генов было клонировано и полностью охарактеризовано, что обеспечило не только информацию об их структуре, функции и эволюции, но и о создании полезных генетических ресурсов для выведения новых устойчивых сортов. Для сравнения, тысячи аналогов генов резистентности (Resistance Gene Analogs, RGAs) были идентифицированы во многих растительных геномах. Информация о клонированных R-генах для арабидопсиса, ярового ячменя, томатов, пшеницы, картофеля, салата, черного перца, риса, кукурузы, льна, сахарной свеклы и табака представлена в обзоре [15, с. 19251], в котором также содержатся сведения о RGAs в геномах растений.

Молекулярные механизмы иммунного ответа в растительной клетке

В настоящее время уже расшифрованы основные молекулярные механизмы реализации иммунного ответа в растительной клетке. В этом плане, прежде всего, следует охарактеризовать современные представления о молекулярных механизмах взаимодействия между растительными рецепторами и фитопатогенами. Хорошо документированным примером реализации неспецифического иммунного ответа (PTI) является распознавание пептида flg22 из бактериального флагеллина рецептором FLS2 растений арабидопсиса. Этот механизм можно представить как простейшую сигнальную систему, содержащую два компонента – молекулы flg22 и FLS2, связанные между собой лигандами (рис. 3а). [2, с. 720].

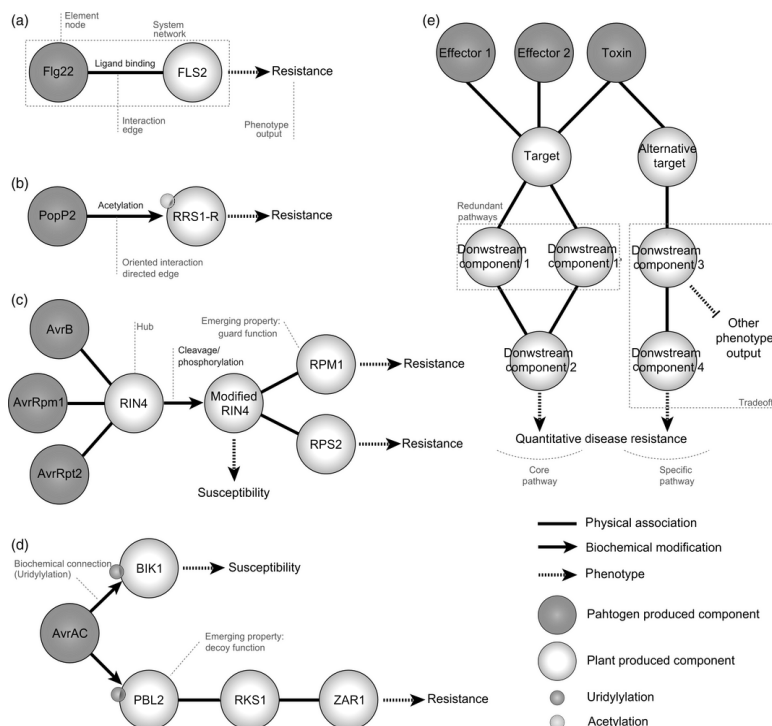


Рис. 3. Известные типы восприятия сигналов в системе «растение–патоген» по [2, с. 721], пояснения в тексте. Молекулы патогенов обозначены коричневыми, а молекулы растений – зелеными кругами

Fig. 3. Known types of signal perception in the «plant–pathogen system» [2, p. 721] (detailed description in the text). Pathogen molecules are shown as brown circles and plant molecules as green circles

В своей простейшей форме специфический иммунный ответ (ETI) может быть результатом взаимодействия такого эффектора патогена, как PopP2 у *Ralstonia solanacearum*, с R-белком растения, как RRS1-R у *Arabidopsis thaliana* (рис. 3б). Это взаимодействие является простой двухкомпонентной сигнальной сетью. На данном конкретном примере показано, что PopP2 модифицирует RRS1-R путем ацетилирования [18, с. 1075]. Данная модификация не является обратимой и взаимодействие строго ориентировано.

Однако исследования последних десятилетий свидетельствуют, что прямое взаимодействие между эффектором и R-белком является скорее исключением, чем нормой, что обуславливает более сложные модели и сигнальные пути. Так, обнаружение эффекторных белков обычно зависит от обнаружения их активности внутри растительной клетки. Для этого R-белки растений контролируют состояние других растительных белков (называемых «стражами»), которые являются прямыми мишенями для эффекторных белков возбудителя. Данная модель называется гипотезой «стража». Типичная защитная система состоит из эффектора AvrB патогенной бактерии *Pseudomonas syringae*, который непосредственно взаимодействует с растительным белком RIN4 (стражем) для его модификации. Затем модифицированный белок RIN4 распознается растительным R-белком RPM1 (рис. 3с). В отсутствие модифицированного белка RIN4, RPM1 не способен обнаружить эффектор AvrB и индуцировать ETI. Этот пример иллюстрирует возникающие свойства сети, которые появляются при взаимодействии между несколькими ее элементами. Еще более сложный пример иллюстрирует ситуацию, когда RIN4 может быть модифицирован несколькими бактериальными эффекторами AvrB, AvrRmp1 и AvrRps2 и защищен двумя R-белками,

RPM1 и RPS2 (рис. 3с). В этом случае RIN4 образует сайт связывания с большим количеством соединений, который часто обозначают как центральный узел (hub).

В некоторых ситуациях модификация белка-стража эффекторами возбудителя может нанести ущерб растениям. В этом случае работает модель «приманки», в которой участвует другая белковая молекула, которая имитирует растительный белок, модифицированный эффекторами возбудителя для повышения восприимчивости. Например, эффекторный белок AvrAC от *Xanthomonas campestris* нацелен на BIK1, центральный компонент передачи сигналов РТИ у *A. thaliana* для повышения восприимчивости. Но вместо того, чтобы непосредственно защищать BIK1, растение имеет связанный с ним белок PBL2, который «ошибочно» также модифицируется AvrAC, но при этом защищен предварительно сформированным комплексом RKS1 и R-белком ZAR1 (рис. 3d). Здесь функция «приманки» PBL2 может быть реализована только в связи с функциями BIK1, RKS1 и ZAR1, что является еще одним примером возникновения новых свойств в сети иммунного ответа растений. Недавно показано, что некоторые R-белки содержат интегрированный домен «приманки», объединяющий функции защиты и восприимчивости [19, с. 8; 20, с. 624].

В контексте молекулярно-рецепторных взаимодействий между растением и патогеном различают еще одну форму иммунного ответа растительного организма, которую обычно называют количественной болезнестойчивостью (quantitative disease resistance, QDR) [21, с. 427]. Эта форма иммунного ответа, широко наблюдаемая в культурных и естественных растительных популяциях, представлена непрерывной шкалой переходов между устойчивыми и восприимчивыми растениями без четкой дифференциации между ними. Ее можно рассматривать как результат взаимодействия между несколькими молекулярными событиями, включающими активность множественных патогенных эффекторов и токсинов на растительных мишенях и активацию множественных путей защитного ответа в растениях (рис. 3е). Однако к настоящему времени получена весьма ограниченная информация о молекулярных механизмах, лежащих в основе QDR. QDR-гены были идентифицированы только в немногих случаях и кодируют разнообразные молекулярные структуры, лежащие в основе долговременной устойчивости растений к широкому спектру фитопатогенов. Интересно отметить, что одним из них является RKS1, нетипичная киназа, которая играет ключевую роль в ETI, взаимодействуя с R-белком ZAR1 [22, с. 286].

В последние годы в связи с расшифровкой молекулярных механизмов ответных реакций растений на атаку конкретных видов патогенных микроорганизмов, терминология и классификация молекулярных структур, участвующих в формировании иммунитета в растительной клетке, претерпела некоторые изменения и уточнения, которые были изложены в обзоре [10, с. 39]. На рис. 4 представлены основные молекулярные структуры, вовлеченные во взаимодействие между растением и патогенами, исходя из сформированных в настоящее время представлений о механизмах восприятия, трансдукции и реализации иммунного ответа. Так, в процессе жизнедеятельности растения постоянно сталкиваются с проблемами, вызванными атакой патогенов (биотрофов, гемибитрофов и некротрофов) и их распространением в апопластах растительных тканей. Эти патогены обычно производят элиситоры (прежнее название – PAMP/MAMP), за исключением специализированных патогенов, которые продуцируют также эффекторы. Растения распознают эти элиситоры/эффекторы и выстраивают иммунный ответ, опосредованный иерархической системой R-генов: элиситор-распознающих рецепторов (elicitor recognition receptor, ELRR), эффектор-распознающих рецепторов (effector recognition receptor, ERR), фитогормонов (phytohormone, PHR), митоген-активируемых протеинкиназ (mitogen-activated protein kinase, MAPKs), транскрипционных факторов (transcription factor, TF), что в конечном итоге, приводит к выработке связанных с резистентностью метаболитов (resistance-related metabolites, RRM) и белков (resistance-related proteins, RRP), которые непосредственно подавляют развитие патогенов. Элиситоры распознаются локализованными на мембранах растительной клетки рецепторами ELRR (прежнее название – PRR), тогда как эффекторы распознаются ERR (прежнее название – PRR, продуцируемые R-генами). Например, эффекторы, продуцируемые биотрофами, часто распознаются белками NBS-LRR, что приводит к гиперчувствительному ответу через путь MAPK / SA / NPR1.

С другой стороны, такие элиситоры (рис. 4), как хитины, продуцируемые главным образом гемибитрофами и некротрофами, воспринимаются рецептор-подобными киназами (receptor-like kinases, RLK) и LysM-доменом хитин-элиситор рецепторной киназой (chitin elicitor receptor kinase, CERK1) соответственно, что активирует MAP-киназный сигнальный каскад через MAPK-киназу киназы (MAPKKK).

Некротрофы (рис. 4) производят такие элиситоры, как ферменты и токсины, которые повреждают оболочки растительных клеток, в результате чего накапливаются фрагменты клеточных стенок и их содержимого (растительные элиситоры, сигнальные молекулы растений, прежнее название – damage-associated molecular patterns (DAMP), которые активируют защитные ответы растений через связанные с клеточной стенкой рецепторные киназы (wall-associated receptor kinases, WAKs).

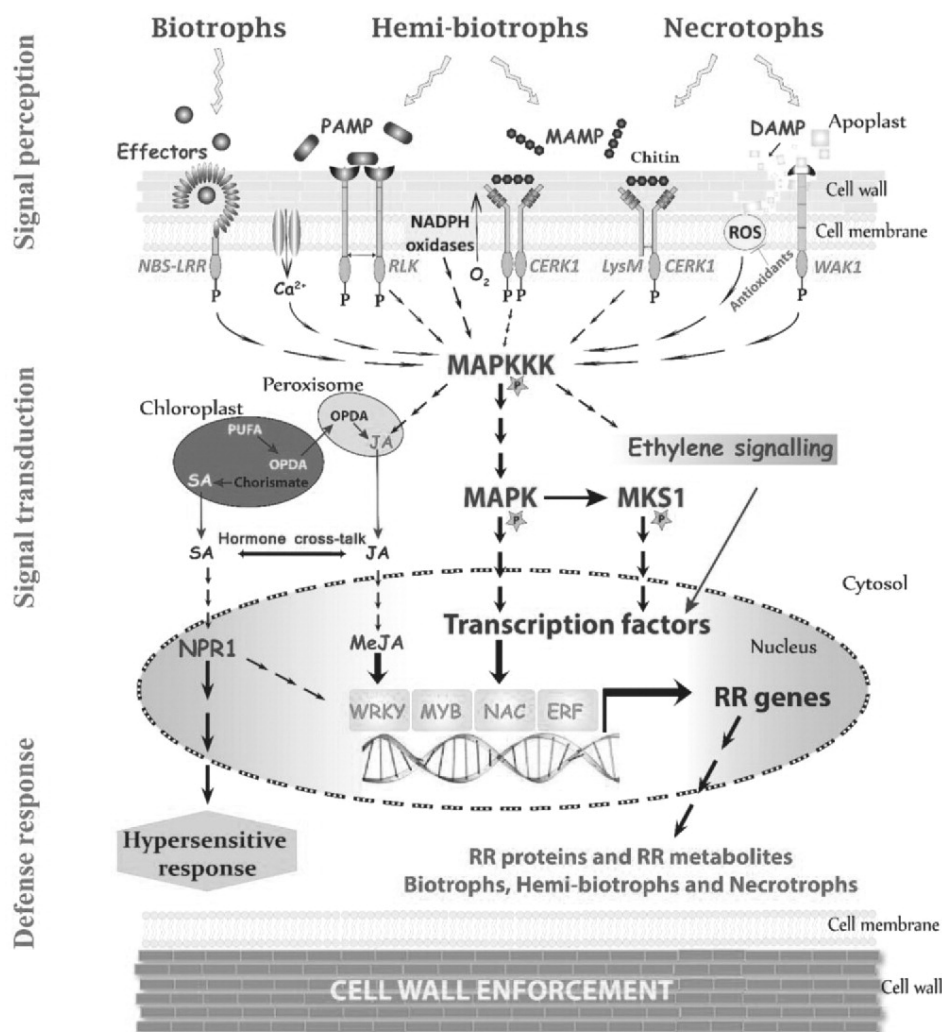


Рис. 4. Ключевые молекулярные структуры, вовлеченные во взаимодействие «растение–патоген» (пояснения в тексте) [10, с. 44]. Митоген-активируемая протеинкиназа (MAPK), транскрипционный фактор (TF), рецептор подобная киназа (RLK), LysM домен хитин-элиситор рецепторной киназы (CERK1), MAPK-киназа киназы (MAPKKK), киназа, ассоциированная с клеточной стенкой (WAKs), активные формы кислорода (ROS), гормоны растений (этилен, Ethylene, салициловая кислота, SA, жасмоновая кислота, JA), транскрипционные факторы (WRKY, MYB, NAC and ERF), RR-гены, метаболиты, ассоциированные с резистентностью (RRMs), белки, ассоциированные с резистентностью (RRPs)

Fig. 4. Key molecular players involved in the «plant-pathogen» interaction (detailed description in the text) [10, p. 44]. Mitogen-activated protein kinase (MAPK), transcription factor (TF), LysM domain chitin elicitor receptor kinase (CERK1), MAPK-kinase kinase (MAPKKK), wall-associated receptor kinases (WAKs), reactive oxygen species (ROS), plant hormones (Ethylene, SA and JA), transcription factors (WRKY, MYB, NAC and ERF), RR-genes, resistance-related metabolites (RRMs), resistance-related proteins (RRPs)

Одновременно с этим в результате биотического стресса активируются вторичные такие мессенджеры, как ионы кальция, активные формы кислорода (ROS) и опосредованные растительными гормонами (этилен, салициловой и жасмоновой кислотами (Ethylene, SA и JA) защитные механизмы, которые также вызывают активацию соответствующих генов, приводящую к гиперчувствительной реакции или пониженной восприимчивости. Итак, сигнал, воспринимаемый рецепторными киназами, эффективно передается через цитозольные протеинкиназы, такие как MAPKKK-каскад, для активации целого ряда факторов транскрипции растений (WRKY, MYB, NAC и ERF), которые регулируют несколько R-генов для продуцирования RRP и RRM.

Биосинтез белков (RRP) и метаболитов (RRM) растений, связанных с резистентностью, контролируется генами резистентности (R_{RRP} , R_{RRM}) [10, с. 45]. RRP и RRM являются либо конститутивными метаболитами (RRC), присутствующими в растительной клетке перед инвазией патогена, либо индуцированными (RRI) в результате инвазии возбудителя. Количество продуцируемых белков и метаболитов

зависит не только от активности генов R_{RRP} и R_{RRM} , но также от иерархии регуляторных R-генов, контролирующих их функционирование.

Белки RRP представляют собой связанные с патогенезом (pathogen-related, PR) белки, которые подавляют патогены, детоксифицируют токсины или факторы вирулентности, продуцируемые патогенами, и предотвращают распространение патогенов путем укрепления клеточных стенок. В настоящее время уже идентифицировано около 17 семейств таких белков. PR-белки, β -1-3-эндоглюканазы (PR-2) и эндохитиназы (PR-3, 4, 8 и 11) разрушают стенки клеток патогенов [10, с. 46]. Семейства PR-белков с молекулярной массой менее 10 кДа включают специфические ингибиторы протеиназ (PR-6), дефензины (PR-12), тионины (PR-13) и белки-переносчики липидов (PR-14), которые характеризуются широкой антибактериальной и противогрибковой активностью. Представители семейства PR-1 и тауматин-подобные белки семейства PR-5 обеспечивают устойчивость растений к мицелиальным микроорганизмам группы Oomycetes. PR-7 представляют собой эндопротеиназы томатов, разрушающие микробные клеточные стенки. Белки семейства PR-9 являются пероксидазами, семейства PR-15 – оксалаксоксидазами, а семейства PR-16 – оксалаксоксидаза-подобными соединениями [23, с. 1043]. Семейство PR-10 представлено рибонуклеаза-подобными белками, участвующими в инактивации рибосом.

Метаболиты RRM представляют собой антимикробные соединения – фитоантиципины (соединения, постоянно присутствующие в растительной клетке) и фитоалексины (соединения, синтез которых в растительной клетке индуцируется патогеном *de novo*), или их конъюгированные продукты, которые осаждаются для укрепления вторичной клеточной стенки, что препятствует дальнейшему распространению патогена по растительным тканям [10, с. 45]. Фитоантиципины обычно вырабатываются растущими растениями и запасаются в трихомах (выростах клеток эпидермы), масляных железах и в эпидермальном слое клеток в форме нетоксичных гликозидов, а их свободные токсичные формы могут высвобождаться путем простого гидролиза. Растения производят тысячи фитоантиципинов: фенолов, флавоноидов, терпенов, жирных кислот и алкалоидов, которые обладают противомикробной активностью. Биосинтез фитоалексинов в растениях индуцируется атакой патогена и контролируется генами R_{RRM} в различных специфических метаболических путях. К фитоалексинам относят *фенилпропаноиды* и *флавоноиды* (изофлавоноиды, изофлавоны, птерокарпаны, изофлаваны, куместаны, арилбензофураны и стильбены); *терпены* (монотерпены, сесквитерпены, карбоксильные сесквитерпены и семейства дитерпенов); *индол* (камалексин) [10, с. 46].

Таким образом, устойчивость растений к фитопатогенам формируется благодаря кумулятивным эффектам RRP и RRM, синтезируемым генами R_{RRP} и R_{RRM} , соответственно, на которые в свою очередь влияют регуляторные R-гены, способные регулировать несколько генов R_{RRP} и R_{RRM} . Эти защитные соединения обычно доставляются к месту заражения в форме везикул такими транспортерами, как ABC и Arabidopsis PEN3-транспортеры (R-гены).

Заключение

Таким образом, расширение международной торговли, массовые передвижения людей и глобальные изменения климата связаны с увеличением числа вспышек новых заболеваний растений. В этой связи глубокие знания о том, как возбудители и их хозяева взаимодействуют между собой и приспосабливаются к окружающей среде, являются предпосылкой для развития новых стратегий идентификации фитопатогенов, защиты растений и эпиднадзора. Тем не менее, прогнозирование болезней растений остается сложной задачей из-за отсутствия знаний об изменении патогенности возбудителей болезней и устойчивости растений-хозяев в разных климатических условиях. Системная биология может служить основой для заполнения этого пробела, предсказывая патогенность микроорганизмов и устойчивость растений-хозяев, их эволюцию с учетом молекулярных знаний, полученных в последние десятилетия.

Библиографические ссылки

1. Шкаликов В. А., Дьяков Ю. Т., Смирнов А. Н. и др. Иммуитет растений. М., 2005.
2. Peyraud R., Dubiella U., Barbacci A., et al. Advances on plant-pathogen interactions from molecular toward systems biology perspectives // The Plant J. 2017. Vol. 90, issue 4. P. 720–737.
3. Spoel S. H., Dong X. How do plants achieve immunity? Defence without specialized immune cells // Nature Reviews Immunology. 2012. Vol. 12. P. 90.
4. Miedes E., Vanholme R., Boerjan W., et al. The role of the secondary cell wall in plant resistance to pathogens // Front. Plant Sci. 2014. URL: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2014.00358> (date of access: 01.03.2018).
5. Glowacki S., Macioszek V. K., Kononowicz A. K. Proteins as fundamentals of plant innate immunity // Cellular & Molecular Biology Letters. 2011. Vol. 16. P. 1–24.
6. Coll N. S., Eppele P., Dangl J. L. Programmed cell death in the plant immune system // Cell Death Differ. 2011. Vol. 18. P. 1247–1256.

7. Lewis L. A., Polanski K., de Torres-Zabala M., et al. Transcriptional dynamics driving MAMP-triggered immunity and pathogen effector-mediated immunosuppression in Arabidopsis leaves following infection with *Pseudomonas syringae* pv tomato C3000 // *Plant Cell*. 2015. Vol. 27. P. 3038–3064.
8. Muller D. B., Vogel C., Bai Y., et al. The plant microbiota: systems-level insights and perspectives // *Annu. Rev. Genet.* 2016. Vol. 50. P. 211–234.
9. Chen L. Q., Hou B. H., Lalonde S., et al. Sugar transporters for intercellular exchange and nutrition of pathogens // *Nature*. 2010. Vol. 468. P. 527–532.
10. Kushalappa A. C., Yogendra K. N., Karre S. Plant Innate Immune Response: Qualitative and Quantitative Resistance // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2016. 35:1. 38–55. DOI: 10.1080/07352689.2016.1148980.
11. Tang D., Wang G., Zhou J.-M. Receptor Kinases in Plant-Pathogen Interactions: More Than Pattern Recognition // *The Plant Cell*. 2017. Vol. 29. P. 618–637.
12. Breiden M., Simon R. Q&A: How does peptide signaling direct plant development? // *BMC Biol.* 2016. 14:58. DOI: 10.1186/s12915-016-0280-3.
13. Копытина Д. А., Касенова А. М., Омашева М. Е. и др. Молекулярные основы иммунитета растений // *Биотехнология. Теория и практика*. 2012. № 3. С. 31–41.
14. Park C.-J., Caddell D. F., Ronald P. C. Protein phosphorylation in plant immunity: Insights into the regulation of pattern recognition receptor-mediated signaling *Frontiers in Plant Science* // *Plant Proteomics*. 2012. Vol. 3, art. 177. publ.: 03 August. DOI: 10.3389/fpls.2012.00177.
15. Sekhwal M. K., Li P., Lam I. et al. Disease Resistance Gene Analogs (RGAs) in Plants // *Int. J. Mol. Sci.* 2015. Vol. 16(8). P. 19248–19290.
16. Flor H. H. Current status of the gene-for-gene concept // *Annu. Rev. Phytopathol.* 1971. Vol. 9. P. 275–296.
17. Felix G., Duran J. D., Volko S., et al. Plants have a sensitive perception system for the most conserved domain of bacterial flagellin // *Plant J.* 1999. Vol. 18(3). P. 265–276.
18. Le Roux C., Huet G., Jauneau A., et al. A receptor pair with an integrated decoy converts pathogen disabling of transcription factors to immunity // *Cell*. 2015. Vol. 161, issue 5. P. 1074–1088.
19. Sarris P. F., Cevik V., Dagdas G., et al. Comparative analysis of plant immune receptor architectures uncovers host proteins likely targeted by pathogens // *BMC Biol.* 2016. Vol. 14. P. 8–18.
20. Kroj T., Chanchud E., Michel-Romiti C., et al. Integration of decoy domains derived from protein targets of pathogen effectors into plant immune receptors is widespread // *New Phytol.* 2016. Vol. 210. P. 618–626.
21. Roux F., Voisin D., Badet T., et al. Resistance to phytopathogens e tutti quanti: placing plant quantitative disease resistance on the map // *Mol. Plant Pathol.* 2014. Vol. 15. P. 427–432.
22. Wang G., Roux B., Feng F., et al. The decoy substrate of a pathogen effector and a pseudokinase specify pathogen-induced modified-self recognition and immunity in plants // *Cell Host Microbe*. 2015. Vol. 18. P. 285–295.
23. Saboki Ebrahim, Usha K., Bhupinder Singh. Pathogenesis Related (PR) Proteins in Plant Defense Mechanism // Méndez-Vilas A. (ed.). Science against microbial pathogens: communicating current research and technological advances. FORMATEX. 2011. P. 1043–1054.

References

1. Shkalikov V. A., Djakov U. T., Smirnov A. N., et al. [Plant immunity]. Moscow, 2005 (in Russ.).
2. Peyraud R., Dubiella U., Barbacci A., et al. Advances on plant-pathogen interactions from molecular toward systems biology perspectives. *The Plant J.* 2017. Vol. 90, issue 4. P. 720–737.
3. Spoel S. H., Dong X. How do plants achieve immunity? Defence without specialized immune cells. *Nature Reviews Immunology*. 2012. Vol. 12. P. 90.
4. Miedes E., Vanholme R., Boerjan W., et al. The role of the secondary cell wall in plant resistance to pathogens. *Front. Plant Sci.* 2014. URL: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2014.00358> (date of access: 01.03.2018).
5. Glowacki S., Macioszek V. K., Kononowicz A. K. Proteins as fundamentals of plant innate immunity. *Cellular & Molecular Biology Letters*. 2011. Vol. 16. P. 1–24.
6. Coll N. S., Epple P., Dangel J. L. Programmed cell death in the plant immune system. *Cell Death Differ.* 2011. Vol. 18. P. 1247–1256.
7. Lewis L. A., Polanski K., de Torres-Zabala M., et al. Transcriptional dynamics driving MAMP-triggered immunity and pathogen effector-mediated immunosuppression in Arabidopsis leaves following infection with *Pseudomonas syringae* pv tomato C3000. *Plant Cell*. 2015. Vol. 27. P. 3038–3064.
8. Muller D. B., Vogel C., Bai Y., et al. The plant microbiota: systems-level insights and perspectives. *Annu. Rev. Genet.* 2016. Vol. 50. P. 211–234.
9. Chen L. Q., Hou B. H., Lalonde S., et al. Sugar transporters for intercellular exchange and nutrition of pathogens. *Nature*. 2010. Vol. 468. P. 527–532.
10. Kushalappa A. C., Yogendra K. N., Karre S. Plant Innate Immune Response: Qualitative and Quantitative Resistance. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2016. 35:1. 38–55. DOI: 10.1080/07352689.2016.1148980.
11. Tang D., Wang G., Zhou J.-M. Receptor Kinases in Plant-Pathogen Interactions: More Than Pattern Recognition. *The Plant Cell*. 2017. Vol. 29. P. 618–637.
12. Breiden M., Simon R. Q&A: How does peptide signaling direct plant development? *BMC Biol.* 2016. 14:58. DOI: 10.1186/s12915-016-0280-3.
13. Kopitina D. A., Kasenova A. M., Omasheva M. E., et al. Molecular base of a plant immunity. *Biotechnology. Theory and practice*. 2012. No. 3. P. 31–41 (in Russ.).
14. Park C.-J., Caddell D. F., Ronald P. C. Protein phosphorylation in plant immunity: Insights into the regulation of pattern recognition receptor-mediated signaling *Frontiers in Plant Science. Plant Proteomics*. 2012. Vol. 3, Art. 177. DOI: 10.3389/fpls.2012.00177.
15. Sekhwal M. K., Li P., Lam I., et al. Disease Resistance Gene Analogs (RGAs) in Plants. *Int. J. Mol. Sci.* 2015. Vol. 16(8). P. 19248–19290.

16. Flor H. H. Current status of the gene-for-gene concept. *Annu. Rev. Phytopathol.* 1971. Vol. 9. P. 275–296.
17. Felix G., Duran J. D., Volko S., et al. Plants have a sensitive perception system for the most conserved domain of bacterial flagellin. *Plant J.* 1999. Vol. 18 (3). P. 265–276.
18. Le Roux C., Huet G., Jauneau A., et al. A receptor pair with an integrated decoy converts pathogen disabling of transcription factors to immunity. *Cell.* 2015. Vol. 161, issue 5. P. 1074–1088.
19. Sarris P. F., Cevik V., Dagdas G., et al. Comparative analysis of plant immune receptor architectures uncovers host proteins likely targeted by pathogens. *BMC Biol.* 2016. Vol. 14. P. 8–18.
20. Kroj T., Chancelud E., Michel-Romiti C., et al. Integration of decoy domains derived from protein targets of pathogen effectors into plant immune receptors is widespread. *New Phytol.* 2016. Vol. 210. P. 618–626.
21. Roux F., Voisin D., Badet T., et al. Resistance to phytopathogens e tutti quanti: placing plant quantitative disease resistance on the map. *Mol. Plant Pathol.* 2014. Vol. 15. P. 427–432.
22. Wang G., Roux B., Feng F., et al. The decoy substrate of a pathogen effector and a pseudokinase specify pathogen-induced modified-self recognition and immunity in plants. *Cell Host Microbe.* 2015. Vol. 18. P. 285–295.
23. Saboki Ebrahim, Usha K., Bhupinder Singh. Pathogenesis Related (PR) Proteins in Plant Defense Mechanism. Science against microbial pathogens: communicating current research and technological advances. FORMATEX. 2011. P. 1043–1054.

Статья поступила в редколлегию 07.05.2018

Received by editorial board 07.05.2018

УДК 504.062(476)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОДУКЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ЕЛИ НА ОСУШЕННОЙ И НЕОСУШЕННОЙ ТЕРРИТОРИЯХ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ

Е. В. МАТЮШЕВСКАЯ¹⁾, В. Н. КИСЕЛЕВ²⁾, А. Е. ЯРОТОВ¹⁾, П. А. МИТРАХОВИЧ¹⁾, С. В. ДЕВГУТЬ¹⁾

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

²⁾Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка,
ул. Советская, 18, 220050, Минск, Беларусь

Приведены результаты исследования современного состояния и продукционного потенциала ели для нарастания стволовой массы в изменяющихся климатических условиях Белорусского Полесья. Крупномасштабная осушительная мелиорация, в результате которой произошло снижение приповерхностных грунтовых вод на сопредельных с освоенными болотами и заболоченными землями территориях с кварцевопесчаными почвами, обострила лимитирующее значение естественных экологических факторов (солнечной радиации, температуры и осадков) в их влиянии на состояние и продукционный потенциал островных ельников, вызвав массовое усыхание древостоя.

Ключевые слова: Белорусское Полесье; ель; мелиорация; радиальный прирост; солнечная радиация; климат.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PRODUCTIVE POTENTIAL OF SPRUCE ON THE DRAINAGE AND UNDRAINAGE TERRITORIES OF THE BELARUSIAN POLESJE

E. V. MATIUSHEVSKAYA^a, V. N. KISIELIOU^b, A. E. JAROTOU^a, P. A. MITRAKHOVICH^a, S. V. DEVGUT^a

^aBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus

^bBelarusian State Pedagogical University Named after Maxim Tank, Sovetskaya street, 18, 220050, Minsk, Belarus
Corresponding author: V. N. Kisieliou (kiselev-vn@yandex.ru)

Образец цитирования:

Матюшевская Е. В., Киселев В. Н., Яротов А. Е., Митрахович П. А., Девгуть С. В. Сравнительный анализ продукционного потенциала ели на осушенной и неосушенной территориях Белорусского Полесья // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 38–47.

For citation:

Matushevskaya E. V., Kisieliou V. N., Jarotou A. E., Mitrakhovich P. A., Devgut S. V. Comparative analysis of the productive potential of spruce on the drainage and undrainage territories of the Belarusian Polesje. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 38–47 (in Russ.).

Авторы:

Екатерина Викторовна Матюшевская – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии.

Виктор Никифорович Киселев – доктор географических наук, профессор; научный руководитель временного научного коллектива «Дендрэкология».

Алексей Евгеньевич Яротов – кандидат географических наук; доцент кафедры физической географии мира и образовательных технологий.

Петр Анисимович Митрахович – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры физической географии мира и образовательных технологий.

Светлана Валентиновна Девгуть – магистрант кафедры геоэкологии.

Authors:

Ekaterina V. Matushevskaya, PhD (geography), associate professor; associate professor of the department of meteorology and general geography.

katerina.vn@icloud.com

Viktor N. Kisieliou, doctor of sciences (geography), professor; scientific adviser of the temporary scientific group «Dendroecology».

kiselev-vn@yandex.ru

Alexei E. Jarotou, PhD (geography); associate professor of the department of physical geography of the world and educational technologies.

dehrono@mail.ru

Peter A. Mitrakhovich, PhD (biology), associate professor; associate professor of the department of physical geography of the world and educational technologies.

Mitrakhovichpa@mail.ru

Svetlana V. Devgut, graduate student of the department of ecology.

Sveta.devgut@mail.ru

The increased inflow of direct solar radiation with the warming of the climate after 1998 acted as a limiting factor for spruce in island localities with an altered land drainage with changed water regime, which reduces its viability and stem productivity. As a result, there was a massive shrinkage of the stand on the reclaimed territory of the Belarusian Polesie. The main environmental factors that led to the mass drying of spruce forests were: a low groundwater level, an increase in the influx of direct solar radiation with warming of the climate after 1998, a summer drought of 2015 and 2016.

Key words: Belorussian Polesje; spruce; melioration; treering; solar radiation; climate.

Введение

Полесская низменность – южный сегмент дуги песчаных низин от Германии до Урала в окраинной зоне плейстоценового материкового оледенения. Наибольший масштаб водно-земельная мелиорация в течение более чем двух столетий приобрела в ее северной части – Белорусском Полесье. Происходящие изменения в его природной среде отражают события во всей полосе Европейского Полесья, особенно при потеплении климата.

Завершившаяся крупномасштабная водноземельная мелиорация, наряду с естественными факторами, привела к экологически напряженной ситуации с «островными» ельниками и сосновыми лесами в этом регионе, выразившейся в современном массовом усыхании древостоя. Учесть все факторы их деградации в методическом плане затруднительно. В этом плане радиальный прирост – объективный индикатор, существенно отражающий происходящие изменения в сложившейся ситуации.

Основоположник географии растений в России А. Н. Бекетов в своей работе «О влиянии климата на возрастание сосны и ели» [1] выделил основные факторы, определяющие состояние древостоя и его радиальный прирост (климатические условия – температура воздуха и осадки). Несмотря на то, что их влиянию на радиальный прирост в XX в. посвящены сотни работ, сложность анализа взаимосвязи, ее проблема не может до настоящего времени считаться решенной [2]. Нарастание стволовой массы древостоя – результат взаимодействия множества прямо или косвенно действующих факторов биологического и экологического порядка.

Один и тот же фактор не может быть постоянно лимитирующим на всем протяжении роста и развития современных поколений древостоя. Его воздействие в том или ином экотопе проявляется в определенные временные отрезки, различающиеся по климатическим показателям. Для большинства регионов лимитирующие факторы обычно сменяют друг друга в течение одного или нескольких сезонов, поэтому однозначное соответствие между шириной годичного кольца и динамикой какого-либо одного из них установить принципиально невозможно [2].

Экологические факторы, неоднозначные по природе воздействия, – климатические и антропогенные (в частности, водноземельная мелиорация) – могут сходным образом отражаться в текущем приросте, приводя к его депрессии. Уникальность природы Белорусского Полесья, которую по праву можно отнести к экологически нарядным экосистемам мира не только по вине крупномасштабной осушительной мелиорации, но и радиоактивного загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС, заставляет вновь и вновь обращаться к ее наиболее примечательным объектам. К ним относятся «островные» ельники среди транзональной формации сосны обыкновенной.

Ельники Белорусского Полесья представляются как символ биоразнообразия самобытного по своим природным особенностям лесоболотного региона в центре европейского субконтинента. В формационной структуре лесов юга Беларуси ель (*Picea abies* (L.) Karst.) занимает незначительную площадь по сравнению с другими древесными породами. Она в биологическом разнообразии имеет несравненно большее значение, чем в экономике лесного хозяйства. Учет всех факторов (естественных и антропогенных) крайне необходим для стратегии дальнейшего ведения лесного хозяйства в этом регионе.

Горизонтальная миграция металлосодержащих растворов от Балтийско-Черноморского водораздела к уровню базиса эрозии подземного стока в долине Припяти [3] привела к образованию на локальных участках почв с гидрогенным накоплением железа, алюминия, магния и других элементов – иллювиально-гумусово-железистых подзолов на кварцевых песках. Именно этот эдафотоп по окраине проточных ложбин и заболоченных пойм малых рек занят «островными» ельниками Полесья [4]. К 1950 г. лесистость только брестской части Полесья сократилась до 17–18 % по сравнению с 82 % в начале XVIII в., но увеличилась до 40 % к XIX в. [5]. Проблема сохранения и восстановления хвойных лесов на преобладающих в Полесье покровных перемертых водноледниковыми потоками палеогеннеогеновых кварцевых песках с исключительно малой влагосодержащей способностью и слабо развитыми автоморфными почвами не утратила своей актуальности [6].

Увеличение лесистости региона осуществлялась за счет культуры сосны на бросовых старопашотных угодьях на кварцевых песках (бывших «сырых песках»), которые после понижения грунтовых вод в результате осушительной мелиорации оказались не пригодными для использования в сельском хозяйстве.

Эта почвенно-литологическая особенность Полесья после практически повсеместной осушительной мелиорации приобрела решающее значение для формирования и сохранения лесных массивов юга Беларуси. «Островные» ельники выступают в роли индикатора возникшей ситуации с лесами после крупномасштабной водно-земельной мелиорации в современных климатических реалиях. В этом плане представлялось целесообразным выполнить сравнительный анализ продукционного потенциала ели в нарастании стволовой массы на осушенных и неосушенных территориях.

Материалы и методы исследования

Исследованные «островные» ельники на осушенной территории в водосборе рек Ипы и Нератовки, канализированных еще Западной экспедицией И. И. Жилинского в последней четверти XIX в., находятся в Светлогорском и Октябрьском лесхозах (тест-полигон «Ипа»). В начале 1960-х годов была проведена коренная реконструкция осушительной сети (так называемое «глубокое осушение»), и освоенные массивы торфяников и заболоченных земель стали более интенсивно использоваться в сельском хозяйстве как пахотные угодья. «Островные» ельники на неосушенной территории примыкают к юго-восточной окраине болота «Круковское» (урочище «Селище»), на которой не выполнялась осушительная мелиорация. Она не оказалась в зоне влияния мелиоративных систем на уровеньный режим грунтовых вод. Одновременно полевые исследования для получения сравнительной дендрохронологии были проведены в «островном» ельнике на «Еловой гриве» в урочище «Воротень» (южнее п. Паричи Светлогорского р-на), окруженного староречьями Березины.

Тип леса – ельник черничный, свойственный его «островному» положению на Белорусском Полесье. Эдафотоп – иллювиально-гумусово-железистый подзол на кварцевых песках. Грунтовые воды под ельником на осушенной территории в мае находились на глубине 1,5–1,6 м и понижались к осени до 2,0 м. На неосушенной территории на глубине 0,2–0,3 м к осени снижались до 0,4–0,6 м (в зависимости от микрорельефа). Образцы древесины (керны) отбирались на высоте 1,3 м. Тестируемые деревья объединены в разновозрастные серии (группы), сведения о которых представлены в табл. 1. Сравнительный анализ изменчивости радиального прироста выполнялся по сопоставляемым возрастам: 110–125 лет, 95–90 лет и 85 лет.

Таблица 1

Сведения о возрастных сериях тестируемых деревьев ели на полигонах «Ипа» (с осушительной сетью), «Селище» и «Еловая грива» (без осушительной сети) на 2017 г.

Table 1

Information on the age series of tested trees spruce at test polygons «Ipa» (with drainage canals), «Selishche» and «Spruce mane» (without drainage canals) in 2017

Ипа				Селище, Еловая грива			
Возраст, лет	Кол-во деревьев	Диаметр, см	Высота, м	Возраст, лет	Кол-во деревьев	Диаметр, см	Высота, м
110	16	54–72	24–32	125	9	30–36	22–32
95	13	36–48	20–24	90	12	28–36	20–24
85	18	34–42	18–28	85	14	26–32	18–21

Продукционный потенциал ели для нарастания стволовой массы в изменяющихся экологических условиях определялся по наиболее высоким значениям радиального прироста как отдельного дерева (максимальный индивидуальный за все время его роста), так и за конкретный год у всех деревьев одной возрастной серии (максимальный серийный) по предложенному методическому приему [7].

Результаты исследования и их обсуждение

Рост и развитие современных поколений ели в «островных» локалитетах в Белорусском Полесье шли в изменяющихся климатических условиях (табл. 2). До 1976 г. температурные перепады менялись незначительно [4]. Особо выделяется влажная черед (1906–1940 гг.) с наибольшим количеством осадков. Некоторое похолодание месяцев безлиственного периода (октябрь–апрель) и существенное сокращение осадков, особенно за вегетационные месяцы (май–сентябрь), произошло в 1941–1976 гг. Последовавшее двадцатилетнее (1977–1998 гг.) при относительном потеплении сопровождалось увеличением осадков. После 1998 г. температурные параметры месяцев (с октября по апрель) и вегетационных периодов (май–сентябрь), а также гидрологического года (октябрь–сентябрь) заметно возросли, указав на значительное потепление климата.

Максимальный индивидуальный радиальный прирост деревьев в каждой возрастной серии на осушенной и неосушенной территориях, за редким исключением, не имел одного года привязки, а «кочевал» во времени, будучи строго индивидуальным (рис. 1).

Таблица 2

Среднестатистические показатели изменчивости климата (по наблюдениям на метеостанции «Василевичи»)

Table 2

Average statistical indicators of climate variability (from observations at the «Vasilevichi» meteorological station)

Годы	t °C				Осадки, мм				Солнечная радиация, МДж / м ²			
									прямая		рассеянная	
	X-IV	V-VI	V-IX	Год	X-IV	V-VI	V-IX	Год	V-VI	V-IX	V-VI	V-IX
1879–1905	-0,6	15,4	15,7	6,2	–	–	–	600	–	–	–	–
1906–1940	-0,4	15,2	15,6	6,4	328	145	394	722	–	–	–	–
1941–1976	-0,5	15,3	15,6	6,3	285	126	318	603	618	1352	592	1351
1977–1998	0,3	15,6	15,7	6,7	265	146	374	639	557	1202	592	1316
1879–1998	-0,3	15,4	15,6	6,4	293	139	362	641	588	1277	592	1334
1999–2016	1,5	16,0	16,7	7,9	368	134	311	679	695	1526	528	1190
За период наблюдений												
1892–2016	-0,2	15,4	15,8	6,5	304	138	354	658	614	1335	577	1300

После реконструкции осушительной сети в начале 1960-х гг., начиная с этого времени и до 1990 г. с обильными осадками (811 мм, из них за вегетационный период 518 мм), эпизодов максимальной стволовой продуктивности ели на осушенной территории было крайне мало. Особенно чувствительно к снижению грунтовых вод отреагировали серии в возрасте 110 и 95 лет, менее чувствительным оказалось 85-летнее поколение. Увеличение осадков в этот период вызвало такую же ситуацию с ельниками на территории, где мелиоративные работы не выполнялись.

Наивысшие значения индивидуального радиального прироста ели 12,5 мм (1956 г.) – в возрасте 110 лет, 11, 8 мм (1977 г.) – в возрасте 95 лет и 11, 7 мм (1990 г.) – в возрасте 85 лет можно принять за потенциал ее максимальной стволовой продуктивности в комфортных метеорологических условиях (при средней положительной температуре безлиственного периода и оптимальном, но не чрезмерном увлажнении; табл. 3).

Максимальный индивидуальный радиальный прирост ели в своей временной реализации на территории без осушительной сети не отличался постоянством и характеризовался значительной календарной изменчивостью в зависимости от биологических особенностей каждого дерева, его положения в ценозе и внутривидовой конкуренции. Изменяющиеся климатические условия, как и обводненность эдафотопы, оказывали влияние на реализацию елью своего продукционного потенциала.

Диапазон изменчивости максимального индивидуального радиального прироста и его наивысшие значения на осушенной территории были больше до 1998 г., чем при потеплении климата после этого года (тест-полигон «Ипа», табл. 4). Эта же закономерность свойственна и для «островных» ельников на неосушенной территории (тест-полигоны «Селище» и «Еловая грива»). Ликвидировав переувлажнение эдафотопы, мелиорация способствовала увеличению продукционного потенциала ели в нарастании стволовой массы при измененных водных условиях, поэтому статистические показатели радиального прироста в преобразованной среде оказались значительнее: более чем в 2 раза, по сравнению с территорией без осушительной сети (см. табл. 4). Максимальный индивидуальный радиальный прирост ели в «островных» локалитетах на осушенной и неосушенной территориях формировался в климатических условиях до и после 1998 г., незначительно отличающихся от средних многолетних (табл. 5).

Диапазон метеорологических величин, мало различающихся по годам и его периодам (безлиственному и вегетационному), указывает на то, что максимально возможная реализация биопродукционного потенциала ели осуществляется при любых их значениях, не имея при этом одновременной годичной привязки. Более благоприятные условия для нее возникли только при меньших значениях температуры месяцев активного роста (мая и июня).

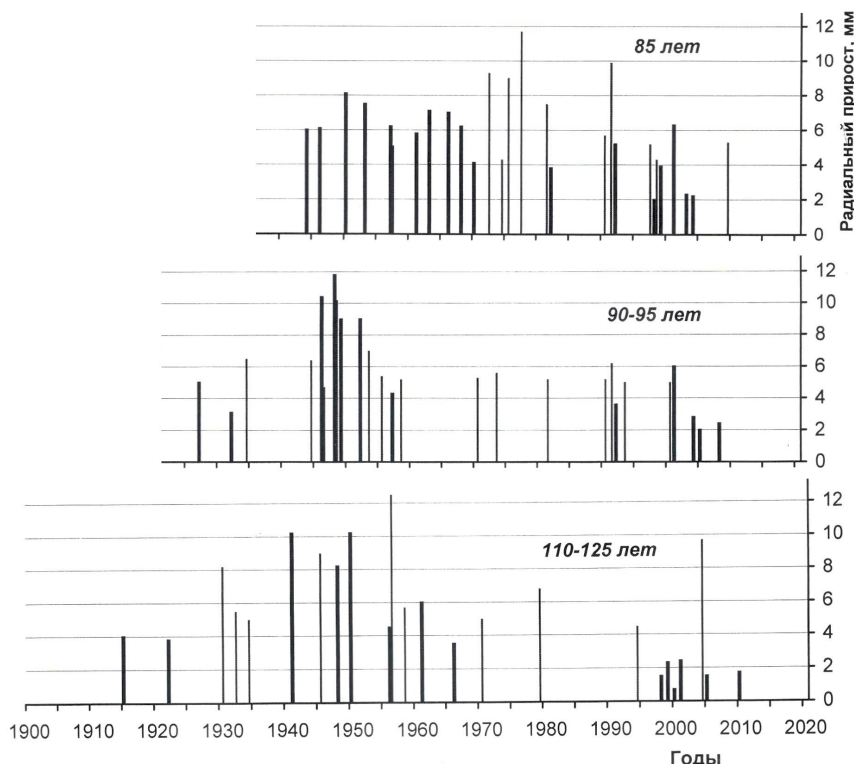


Рис. 1. Многолетний ход изменчивости внутрисериального максимального индивидуального радиального прироста ели на осушенной (утопченные значения) и неосушенной (утолщенные значения) территориях

Fig. 1. Long-term variation of the intra-serial maximum individual radial growth of spruce on drained (delicate values) and undrained (thickened values) territories

Таблица 3

Метеорологические условия лет с потенциальной стволовой продуктивностью ели в Белорусском Полесье на территории с осушительной сетью

Table 3

Meteorological conditions of years with potential barrel productivity of spruce in the Belorussian Polesje in the territory with a drainage canals

	Температура, t °C				Осадки, мм			
	Годы	Май–июнь	Май–сентябрь	Год	Октябрь–апрель	Май–июнь	Май–сентябрь	Год
1948	0,4	17,6	16,2	7	308	169	386	694
1977	0,3	15,6	15	6,4	258	164	449	707
1989	1,9	16,3	16,3	7,9	421	130	277	698

Следовательно, погодно-климатические условия не могут быть единственной основной причиной массового отмирания ели в «островных» локалитетах на Белорусском Полесье, хотя ее усыхание на осушенной территории наступает после аномально холодного, бесснежного или малоснежного безлиственного периода, а угнетение на неосушенной территории при повышенном выпадении осадков [8].

В многолетней изменчивости погодичного сериального максимального радиального прироста ели отражены особенности нарастания ее стволовой массы на неосушенной и осушенной территориях (рис. 2). С началом потепления климата и ростом атмосферных осадков после 1977 г. он оказался значительнее на территории с осушительной сетью (за исключением 90–95-летних поколений). Это свидетельствует о том, что, сняв переувлажнение эдафотоп, мелиорация улучшила лесорастительные условия для «островных» ельников.

Из примечательных событий следует отметить заметное нарастание стволовой массы у 110-летнего поколения елей на осушенной территории, в противоположность депрессии прироста у 125-летних елей на неосушенных землях 1920–1940 гг. влажного климата (см. табл. 2). Как отмечалось, в череду относительно засушливых 1945–1952 гг. (кроме 1948 г.) ель на неосушенной территории имела наивысшие показатели стволовой продуктивности.

Таблица 4

Годы с максимальным индивидуальным радиальным приростом ели (диапазон в мм) в Белорусском Полесье на территориях с осушительной сетью (тест-полигон «Ипа») и без нее (тест-полигоны «Селище» и «Еловая грива»)

Table 4

Years with the maximum individual radial growth of spruce (range, mm) in Belorussian Polesje in areas with a drainage canals (test polygon «Ipa») and without them (test polygons «Selishche» and «Spruce mane»)

«Ипа»					
Возрастные группы деревьев					
110 лет		95 лет		85 лет	
Годы	Радиальный прирост	Годы	Радиальный прирост	Годы	Радиальный прирост
До 1998 года					
1930, 1932, 1934, 1945, 1956, 1958, 1970, 1979, 1990	4,7–12,5	1934, 1944, 1946, 1948, 1953, 1955, 1958, 1970, 1973, 1981, 1986, 1991, 1993	5,0–11,8	1946, 1954, 1955, 1957–1959, 1962, 1967, 1970–1973, 1987, 1989, 1991	5,3–11,7
После 1998 года					
2000, 2001, 2004, 2006, 2009	3,3–9,7	2000, 2001, 2006	2,0–5,0	2000, 2004, 2005	2,5–3,2
«Селище» и «Еловая грива»					
125 лет		90 лет		85 лет	
До 1998 года					
1915, 1922, 1941, 1948, 1950, 1956, 1961. 1966	2,6–10,2	1927, 1932, 1946, 1948, 1949, 1952, 1953, 1957, 1992	3,1–9,8	1944, 1946, 1950, 1953, 1957, 1961, 1963, 1966, 1968, 1970, 1982, 1992	1,3–6,3
После 1998 года					
1999, 2000, 2001, 2005. 2010. 2010	0,7–2,4	2001, 2004, 2005, 2008	0,9–2,3	1999, 2001, 2003, 2004	1,2–2,1

Как показывает весь многолетний ход радиального прироста ели, детерминированным компонентом метеорологической среды служат отдельные экстремальные погодные эпизоды, вызывающие возмущения в дендрометрических рядах. К таким эпизодам относится аномально относительно теплый и влажный (по зимним меркам) климат 1989 г., который обеспечил максимально возможный радиальный прирост 85-летней ели на осушенной территории.

Глубокую депрессию прироста вызывали аномально холодные малоснежные зимы 1987 и 1996 гг. (с морозами до $-30,0^{\circ}\text{C}$). Эта депрессия особенно резко проявилась у старых елей, чем у более возрастных. Очевидно, это связано со значительным повреждением проводящих корней уже вышедших у них на поверхность. За пределами Белорусского Полесья групповое и куртинное усыхание ели в средневозрастных и в более старших насаждениях началось именно в 1996 г. в Российском Полесье (в Брянской, Смоленской, Калужской и Орловской областях) по границе с Беларусью [9].

Ситуация обострилась в 2015 г. Хотя зима (декабрь–февраль) этого года была теплой ($-1,6^{\circ}\text{C}$ при норме $-5,4^{\circ}\text{C}$, 111 мм осадков) в бесснежном феврале (малоснежный покров образовался только к концу месяца) морозы достигали -22°C . На востоке Белорусского Полесья (Гомельская обл.) после аномально теплой, малоувлажненной весны (март–апрель, $8,9^{\circ}\text{C}$ при норме $6,4^{\circ}\text{C}$, 107 мм осадков при норме 133 мм) наступило жаркое, засушливое лето (июнь–август, $19,9^{\circ}\text{C}$ при норме $17,4^{\circ}\text{C}$, 134 мм осадков при норме 239 мм) [10]. Погодные условия 2016 г. были похожи на предыдущий год (в летние месяцы 162 мм осадков при $19,8^{\circ}\text{C}$) [11].

Таблица 5

Метеорологические условия периодов с максимальным индивидуальным радиальным приростом ели в Белорусском Полесье на территориях с осушительной сетью (тест-полигон «Ипа») и без нее (тест-полигоны «Селище» и «Еловая грива»)

Table 5

Meteorological conditions of years with the maximum individual spurious growth of spruce in the Belorussian Polesie in territories with drainage canals (test polygon «Ipa») and without them (test polygons «Selishche» and «Spruce mane»)

Значения	Температура, t °C				Осадки, мм			
	Октябрь–апрель	Май–июнь	Май–сентябрь	Год	Октябрь–апрель	Май–июнь	Май–сентябрь	Год
«Ипа»								
До 1998 г.								
Средние	0,3	15,7	15,9	6,7	291	130	355	646
диапазон	-2,9–3,4	13,5–19,2	14,5–17,4	5,1–9,0	146–452	45–242	186–527	355–905
После 1998 г.								
Средние	1,6	14,3	16,1	7,6	355	142	325	680
диапазон	-0,2–2,8	12,1–15,4	15,3–16,5	6,7–8,5	311–419	69–254	277–389	606–790
«Селище» и «Еловая грива»								
До 1998 г.								
Средние	-0,3	15,6	15,8	6,6	294	137	328	622
диапазон	-2,4–1,8	12,9–18,2	12,7–17,3	5,1–7,9	169–398	45–229	204–468	355–905
После 1998 г.								
Средние	1,4	15,2	16,5	7,7	341	105	357	698
диапазон	-0,2–2,8	12,1–16,3	13,5–17,3	6,7–8,5	262–419	51–171	271–457	533–790

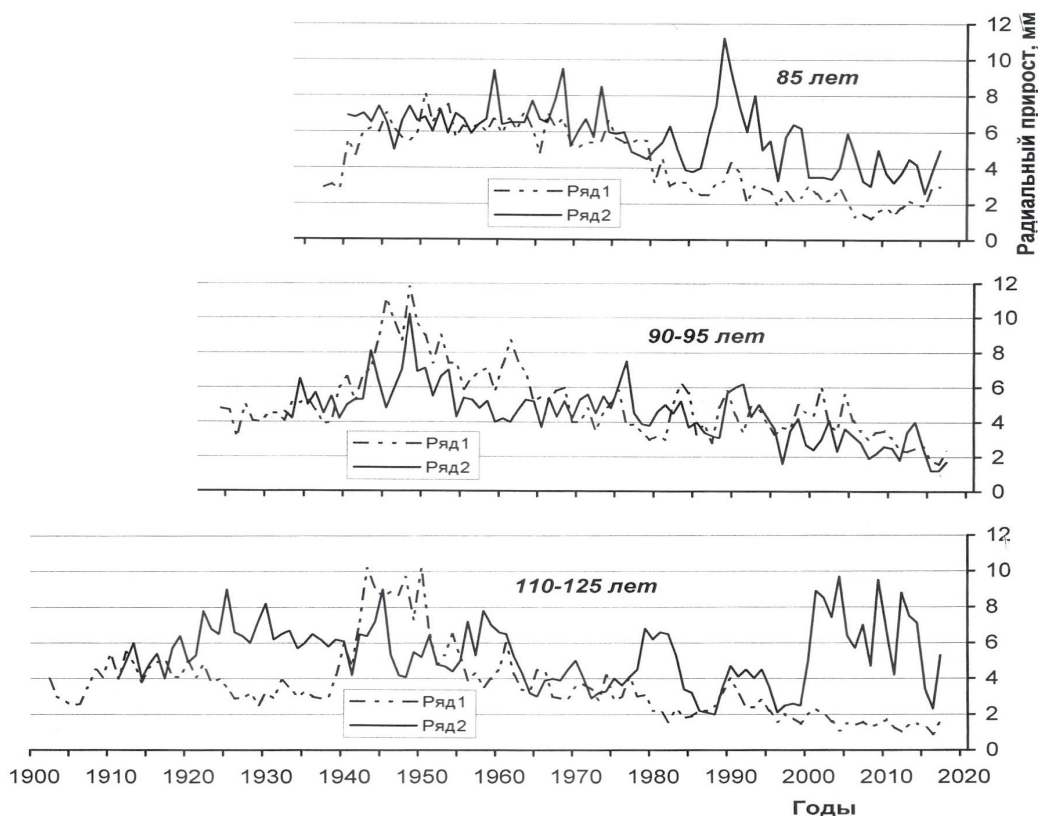


Рис. 2. Многолетний ход изменчивости погодичного максимального радиального прироста возрастных серий ели в «островных» локалитетах на неосушенной (ряд 1) и осушенной (ряд 2) территориях

Fig. 2. Long-term variation of the intra-serial maximum individual radial growth of spruce on drained (delicate values) and undrained (thickened values) territories

Одно изменение только метеорологических величин (температуры и осадков) не могло привести к усыханию ели. У перестойных (110 лет) елей на осушенной территории радиальный прирост при этом потеплении, наоборот, резко увеличился, превысив значения относительно засушливых 1945–1952 гг. (см. рис. 2).

Следует отметить, что в поисках причин угнетения и отмирания лесов в умеренном климатическом поясе Евразии попытки привлечения солнечной радиации как возможного фактора ограничены (основное внимание уделяется 11-летней солнечной активности). Солнечная радиация является важнейшим фактором в изменчивости радиального прироста деревьев. Поступление солнечной радиации, обеспечивающей энергией все физические и физиологические процессы в фитоценозах Белорусского Полесья, изменялось в значительных пределах (рис. 3).

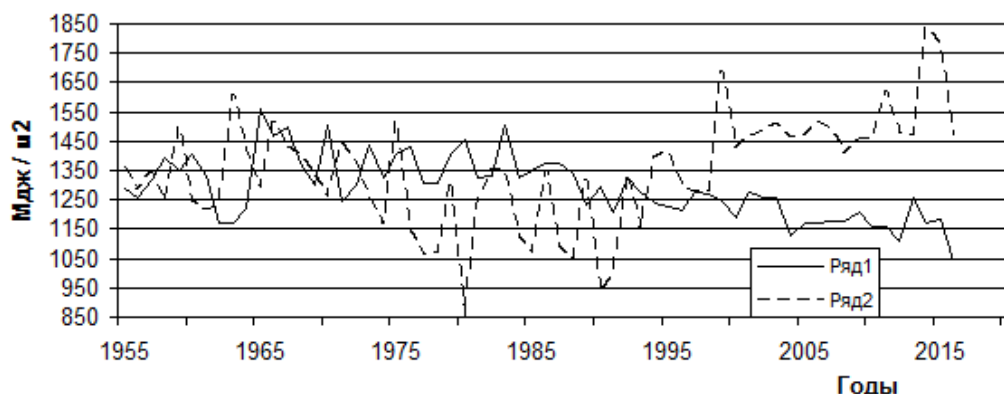


Рис. 2. Динамика рассеянной (1) и прямой (2) солнечной радиации (по наблюдениям на метеостанции «Василевичи»)

Fig. 2. Dynamics of scattered (1) and direct (2) solar radiation (according to observations at the «Vasilevichi» meteorological station)

После 1998 г. с сокращением продолжительности южной циркуляции и господством западной [12] приток прямой солнечной радиации в экосистемы лесов Полесья за месяцы вегетационного периода увеличился на 319 МДж / м² (или 25,7 %) по сравнению с предыдущими 1977–1998 гг., но рассеянной, зависящей от содержания водяного пара и других аэрозолей в атмосфере, сократилось на 126 МДж / м² (или 9,6 %). Если соотношение прямой радиации к рассеянной до 1998 г. было 1 : 0,91, то после этого года стало 1 : 1,27. До 1998 г. рассеянной радиации в атмосфере за вегетационный период было больше на 114 МДж / м², после этого года приток прямой уже преобладал на рассеянной на 321 МДж / м². Приток прямой солнечной радиации оказался рекордным в 2014 г. (1840 МДж / м²) и в 2015 г. (1776 МДж / м²).

При этом количество осадков за вегетационный период уменьшилось. Это указывает на то, что продолжительность и интенсивность солнечного сияния после 1998 г. увеличились в течение суточного фотопериода. Увеличение притока прямой солнечной радиации активизировало продукционный процесс в нарастании стволовой массы только у 110-летнего поколения ели в результате возможного обеспечения транспирационного тока влагой трихогоризонта, который смогла достичь его мощная корневая система, преодолев плотный иллювиально-гумусово-железистый почвенный горизонт. Это выразилось в наибольшем значении радиального прироста за все время роста и развития насаждения. Однако при недоборе осадков в 2015–2016 гг. это перестойное поколение постигла участь более молодых возрастов: большинство деревьев усохло, сохранившись по окраине ельника.

При суммации прямой солнечной радиации с недобором осадков все в любом возрасте деревья (110-летние не явились исключением) на осушенной территории усохли. Увеличение ее притока выступило в значении лимитирующего фактора для ели в островных локалитетах с измененным мелиорацией водным режимом, снижающего ее жизнеспособность и стволовую продуктивность.

Таким образом, прослеживается последовательная цепь взаимозависимых физических явлений в их влиянии на стволовую продуктивность ели (не только ели) в локалитетах с измененным осушительной мелиорацией водным режимом: поступление солнечной радиации → рост температуры воздушной среды и хвои → не полная обеспеченность транспирационным потоком эвапотранспирации из-за снижения грунтовых вод и недобора осадков → лимитирующее влияние прямой солнечной радиацией на радиальный прирост как начального звена этой цепи. В результате наступило массовое усыхание древостоя на мелиорированной территории Белорусского Полесья со свойственными ей почвенно-гидрогеологическими условиями.

Заключение

Эдафотопом островных ельников Белорусского Полесья (преобладающий тип леса – ельник черничный) служит иллювиально-гумусово-железистый подзол на кварцевых песках. Майский уровень грунтовых вод под ними на неосушенной территории залегает на глубине 0,2–0,3 м, снижаясь к осени до 0,4–0,6 м в зависимости от микрорельефа; на осушенной – на глубине 1,5–1,6 м, понижаясь к осени до 1,8–2,0 м. Ликвидировав переувлажненность эдафотопы, осушительная мелиорация способствовала увеличению продукционного потенциала ели в нарастании стволовой массы при измененных водных условиях. Выявленный максимальный радиальный прирост у ельников на осушенной территории до потепления климата после 1998 г. достигал значений 11,7–12,3 мм (возраст 85, 95 и 110 лет), по сравнению с 6,3–10,2 мм (возраст 85, 90 и 125 лет) на неосушенной территории, не зависимо от погодных условий (за исключением аномально холодных зим 1987 и 1996 гг.). Потепление климата после 1998 г. (в среднем за май–сентябрь на 1,1 °С при сокращении осадков на 51 мм) увеличило приток прямой солнечной радиации за эти месяцы до 1526 (1277 МДж/м² в предшествующие годы), обострило потребность ели во влаге, вызвав угнетение радиального прироста на осушенной (до минимальных 2,0 мм) и неосушенной (до 0,7 мм) территориях. Массовое усыхание древостоя островных ельников наступило после наивысшего притока прямой солнечной радиации (1840 МДж/м² за вегетационные месяцы май–сентябрь 2014 г.) в 2015 г. (1776 МДж/м²) с жарким, засушливым летом (июнь–август, 19,9 °С при норме 17,4 °С, 134 мм осадков при норме 239 мм) и в 2016 г. с аналогичными погодными условиями (в летние месяцы 162 мм осадков при 19,8 °С). Увеличение притока прямой солнечной радиации при потеплении климата после 1998 г. выступило в значении дополнительного лимитирующего фактора для ели в островных локалитетах, снизившего ее жизнеспособность, приведшую к крупномасштабной гибели древостоя.

Библиографические ссылки

1. Бекетов А. Н. О влиянии климата на возрастание сосны и ели // Труды 1-го съезда естествоиспытателей в Петербурге, происходившего с 28 декабря 1867 г. по 4 января 1968 г. Санкт-Петербург, 1868. С. 111–163.
2. Демаков Ю. П. Диагностика устойчивости лесных экосистем (методологические и методические аспекты). Йошкар-Ола, 2000.
3. Лавров А. П. Гидрохимические особенности подземного стока в южных частях Беларуси // Геология и гидрогеология Припятского прогиба. Минск, 1963. С. 160–170.
4. Киселев В. Н., Матюшевская Е. В., Яротов А. Е. и др. Ельники Белорусского Полесья в современных климатических условиях // Мелиорация. № 1 (69). 2013. С. 66–79.
5. Окорокно И. В. Динамика лесной растительности Брестского Полесья: исторический аспект // Вестник БГУ. Сер. 2. 2006. № 2. С. 128–130.
6. Киселев В. Н., Матюшевская Е. В. Азональные лесные сообщества Белорусского Полесья с позиций учения о лесе Г. Ф. Морозова // Природные ресурсы Полесья: оценка, использование, охрана: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Пинск, 8–11 июня 2015 г. В 2 ч. Ч. 1. Пинск, 2015. С. 135–138.
7. Матюшевская Е. В., Киселев В. Н., Яротов А. Е. и др. Продукционный потенциал ели для нарастания стволовой массы в условиях изменяющегося климата // Журнал Белорус. гос. ун-та «География, геология». 2017. № 2. С. 66–79.
8. Матюшевская Е. В. Факторы изменчивости радиального прироста деревьев. Минск, 2017.
9. Современное усыхание популяций ели европейской в Российском Полесье. URL: Zoofirma.ru/knigi/vostles/8843 (дата обращения: 08.03.2017).
10. Обзор климатических особенностей и опасных гидрометеорологических явлений на территории Республики Беларусь в 2002, 2012, 2013, 2014 и 2015 гг. Минск, 2016.
11. Обзор климатических особенностей и опасных гидрометеорологических явлений на территории Республики Беларусь в 2016 г. Минск, 2017.
12. Кононова Н. К. Сезонные особенности колебаний циркуляции атмосферы и температуры воздуха на Европейской территории России в XXI веке // Региональные эффекты глобальных изменений климата (причины, следствия, прогнозы): материалы Междунар. науч. конф., 26–27 июня 2012 г. Воронеж, 2012. С. 58–62.

References

1. Beketov A. N. [On the influence of climate on the growth of pine and spruce]. *Proceedings of the First Congress of Russian Naturalists in St. Petersburg, which took place from December 28, 1867 to January 4, 1868*. St.-Petersburg, 1868. P. 111–168 (in Russ.).
2. Demakov Y. P. [Diagnostics of the sustainability of forest ecosystems (methodological and methodological aspects)]. Ioshkar-Ola, 2000 (in Russ.).
3. Lavrov A. P. *Gidrokhimicheskiye osobennosti podzemnogo stoka v yuzhnykh chastyakh Belarusi. Geology and hydrogeology of the Pripyat Trough*. Minsk, 1963. P. 160–170 (in Russ.).
4. Kiselev V. N., Matyushevskaya Ye. V., Yarotov A. Ye., et al. *Yel'niki Belorusskogo Polyes'ya v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh. Melioration*. 2013. No. 1 (69). P. 66–79 (in Russ.).

5. Okorokno I. V. [Dynamics of forest vegetation of Brest Polissya: a historical aspect]. *Vestik BSU*. Ser. 2. 2006. No. 2. P. 128–130 (in Russ.).
6. Kiselev V. N., Matyushevskaya E. V. [Azonal forest communities of the Byelorussian Polesie from positions of the doctrine of the forest G. F. Morozova]. Intern. scientific-practical. Conf. *Natural resources of Polesie: estimation, use, protection*. V. 2. Pinsk, 2015. P. 135–138 (in Russ.).
7. Matyushevskaya E. V., Kiselev V. N., Jarotov A. E., et al. [Productive potential of spruce for the growth of stem mass in natural-zonal conditions in the territory of Belarus under a changing climate]. *J. Bel. Stat. Univ. «Geography, Geology»*. 2017. No. 2. P. 66–79.
8. [Factors of variability of radial growth of trees]. Minsk, 2017 (in Russ.).
9. [Modern desiccation of European spruce populations in Russian Polesye]. URL: Zoofirma.ru/knigi/vostles/8843 (date of access: 08.03.2017) (in Russ.).
10. [Review of climatic features and dangerous hydrometeorological phenomena in the territory of the Republic of Belarus in 2002, 2012, 2013, 2014 and 2015]. Minsk, 2016 (in Russ.).
11. [Review of climatic features and dangerous hydrometeorological phenomena in the territory of the Republic of Belarus in 2016]. Minsk, 2016. (in Russ.).
12. Kononova N. K. Sezonnyye osobennosti kolebaniy tsirkulyatsii atmosfery i temperatury vozdukha na Yevropeyskoy territorii Rossii v XXI veke. *Regional effects of global climate change (causes, consequences, forecasts)*: material Intern. scientific. conf., 26–27 iyunya 2012 g. Voronezh, 2012. P. 58–62 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 07.05.2018
Received by editorial board 07.05.2018

УДК 631.415.2

ОПЕРАТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ ПОЧВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗЛИЧНЫХ НАГРУЗОК

А. С. ХОЛОДНАЯ¹⁾, К. А. ДЕСЯТНИК¹⁾

¹⁾Институт почвоведения и агрохимии им. А. Н. Соколовского Национальной академии аграрных наук Украины, ул. Чайковская, 4, 61024, Харьков, Украина

Предложенные нами методы значительно ускоряют экологическую диагностику почв, не беря во внимание их происхождение и внешние факторы. При этом упрощается мониторинг почвенных ресурсов и выявляется влияние, которое негативно или положительно влияет на ход почвенных процессов. Данные методы положены в основу методологии оперативной диагностики воздействия природных и антропогенных нагрузок на функциональную устойчивость кислых почв и могут быть использованы не только учеными в специальных научных учреждениях, но и производителями (при наличии необходимого минимума приборной базы). Следует отметить, что данная разработка не требует высоких финансовых затрат, однако дает максимально полную картину состояния почвы в текущий период.

Ключевые слова: функциональная устойчивость; буферность; активность протеазы; коэффициент функциональной устойчивости.

OPERATIONAL DIAGNOSTICS OF FUNCTIONAL STABILITY OF SOILS UNDER THE ACTION OF VARIOUS LOADS

A. S. KHOLODNA^a, K. O. DESYATNYK^a

^aInstitute of Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovski National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine Chaikovska street, 4, 61024, Kharkiv, Ukraine

Corresponding author: A. S. Kholodna (lonakalt@gmail.com)

Methods proposed by us considerably speed up the ecological diagnostics of soils, regardless their origin and external factors. This facilitates monitoring of soil resources and reveals the factors that negatively or positively influence the course of soil processes. These methods had already become the basis of «Methodology of operational diagnostics of natural and anthropogenic loads' influence on the functional stability of acid soils». As the final stage of the diagnosis, we proposed a formula for calculating the coefficient of functional stability of soils (K f.st.), based on their genetic features. The fact that this scientific development does not require high financial costs, but gives the fullest possible picture of the soil state in the current period is very important.

Key words: functional stability; buffer ability; activity of protease; coefficient of functional stability.

Образец цитирования:

Холодная А. С., Десятник К. А. Оперативная диагностика функциональной стойкости почв под действием различных нагрузок // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 48–56.

For citation:

Kholodna A. S., Desyatnyk K. A. Operational diagnostics of functional stability of soils under the action of various loads. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 48–56 (in Russ.).

Авторы:

Алёна Сергеевна Холодная – аспирант.
Карина Александровна Десятник – кандидат биологических наук; научный сотрудник.

Authors:

Alona S. Kholodna, PhD student.
lonakalt@gmail.com
Karina A. Desyatnyk, PhD (biology); researcher.
lonakalt@gmail.com

Введение

В последние годы из-за желания получить максимальные урожаи растет антропогенное давление на почвы. Оно связано с использованием физиологически кислых удобрений, пестицидов, гербицидов, химических мелиорантов разной степени качества, а также с применением в качестве «заменителей» навоза сидератов, которые вследствие быстрой минерализации их свежего высоколабильного органического вещества, обуславливают подкисление почвы. Вместе с этим почвы подвержены стрессу в связи с глобальными изменениями климата, поскольку прогнозируемое повышение температуры почвы усиливает в ней диссоциацию органических кислот, интенсивность воздействия почвенной биоты на минерализацию органического вещества и дополнительное образование кислотообразующих оксидов азота, серы и углерода. Таким образом, в наше время одними из основных критериев диагностики функциональной устойчивости почв должны быть оперативность и способность отражать их «здоровье».

Традиционная система агрохимической и агроэкологической диагностики состояния почв базируется в основном на комплексе таких агрохимических и физико-химических показателей, как уровень рН, гидролитическая кислотность, сумма поглощенных оснований, степень насыщенности основаниями, содержание подвижного алюминия, содержание тяжелых металлов, биологических показателей, но значительно реже – физических. Определение содержания каких-либо веществ в почве по традиционным аналитическим методам является трудоемкими и длительным, поскольку включает отбор и транспортировку образцов, а также их лабораторно-химический анализ.

Нами предложена удобная, ресурсоохранная и, что особенно важно, относительно дешевая разработка, представляющая собой оперативную диагностику функциональной устойчивости почв под влиянием природных и антропогенных нагрузок. Диагностирование выполняется в несколько этапов: потенциометрические исследования *insitu*, моделирование нагрузок (природных и антропогенных), диагностика изменений в почве путем биоиндикации с использованием чувствительных к изменениям окружающей среды организмов и определение кислотно-основной буферности почвы. Такой способ позволяет комплексно отразить эффективность функционирования почвы.

Следует отметить, что впервые было предложено использование коэффициента функциональной устойчивости почвы (К ф.уст.), как интегрального показателя физико-химических (буферная способность и активность кальция) и биологических (активность фермента протеазы) свойств почв. Все это является весомым фактором, если рассматривать почву как живое биологическое тело, которое нельзя представлять через призму отдельных составляющих, а только через определенную их совокупность [1, с. 3].

Буферные свойства почв играют важную роль в стабилизации почвенного плодородия, поэтому в прогнозировании эволюционной направленности плодородного потенциала почв именно это свойство было выбрано нами как одно из тех, что наиболее влияет на их устойчивость. Буферная емкость относительно того или иного элемента плодородия является надежным критерием его устойчивости и показателем для оценки функционирования питательного режима по конкретному элементу.

Одним из ключевых показателей плодородия почвы является их кислотно-основное состояние. Кислотно-основное равновесие почв непосредственно связано с содержанием щелочных и щелочно-земельных катионов в качестве основных антагонистов водорода и других элементов, которые влияют на формирование уровня рН. Именно баланс этих элементов в почве определяет вектор направления почвенных процессов в сторону подкисления или, наоборот, подщелачивания почвенной среды.

Величина активной или потенциальной кислотности, а также щелочности часто не могут служить объективной характеристикой кислотно-основной функции почв. В теоретическом и практическом плане важнее четкое определение уровня податливости почв к подкислению и, наоборот, к ощелачиванию. Применение последних достижений почвоведческой науки в направлении использования теоретических и практических положений буферной способности почв позволяет избавиться от этих недостатков. Пример диагностики и оптимизации кислотно-основного состояния конкретного типа почвы приведены в работах [2–4].

Говоря о стабильности почвы, необходимо обратить внимание на кальций, который является важной составляющей стабильности почвы как природного тела. Он одновременно – один из важнейших макроэлементов питания растений, фактор структурирования почвы и стабилизации гумуса, регулятор почвенной кислотности. Поэтому устойчивость запасов почвенного кальция и оптимизация процессов его аккумуляции-диссипации в почве является первостепенным вопросом. Особую актуальность эта проблема приобретает в современных условиях климатической нестабильности в связи с накоплением в атмосфере двуокси углерода, а следовательно, опасности сдвигов карбонатного равновесия.

Характеристику почвенных процессов с участием кальция осуществляют через группу потенциалов, среди которых главное место занимает известковый потенциал $pH - 0,5pCa$ или потенциал водородно-кальциевого обмена.

Среди многих существующих сегодня методов диагностики и оптимизации кислотно-щелочного равновесия в почвах преобладают методы, опирающиеся на определение в них гидролитической кислотности, солевого и водного pH.

Почвенные микроорганизмы – пионеры почвенно-образовательного процесса. Они в значительной степени определяют биологическую активность почв, их плодородие, экологическое состояние. Однако на сегодняшний день актуальным является их свойство служить индикаторами «здоровья почвы». Именно микроорганизмы одними из первых реагируют даже на незначительные изменения окружающей среды, поэтому их реакции на разного рода поллютанты, чаще – тяжелые металлы, или колебания условий существования являются очень ценными для экологического мониторинга, в том числе и для почвенного.

Среди микробиоты значительную роль играют ферменты – органические катализаторы белковой природы, которые накапливаются в почве в процессе жизнедеятельности живых организмов. Благодаря ферментам в почвах происходят процессы гумусообразования, восстановления, активизируются трофическая и санитарная функции и т. д. Однако природные катализаторы сплошь и рядом ингибируются за счет:

- 1) применения интенсифицированной обработки почв;
- 2) загрязнения почвы пестицидами;
- 3) образования таких специфических природных соединений, как танины и терпены в почвах под лесной растительностью, а также микроцистинов в почвах озерных отложений;
- 4) загрязнение окружающей природной среды и др.

Ферменты составляют весомую долю почвенной фауны, поэтому в современных условиях интенсификации сельскохозяйственного производства, улучшение условий их существования является одной из важнейших задач экологического почвоведения. В частности, применение научно обоснованной системы обработки и удобрения почвы способствует увеличению популяций различных микроорганизмов. Однако, в связи с популяризацией именно ресурсоохранных методик, в мире появляются новые пути оптимизации микробного режима почв. Одним из таких методов является запахивание дубового (и других видов) биоугля в пахотный слой почвы [5, с. 215]. Доказано, что это приводит к увеличению количества общего органического углерода, микробиологической активности и, как следствие, качества почвы.

Деградационные процессы имеют дуалистический характер – природный, с одной стороны, и антропогенный – с другой. Новым в почвоведении является вопрос рекультивации и восстановления нарушенных почв городских массивов. В последнее время в литературе все чаще появляется термин «урбаноземы» – антропогенно измененные [6, с. 5] почвы городских территорий, искусственный профиль которых имеет поверхностный слой толщиной до 50 см, созданный человеком путем отсыпки, перемешивания, захоронения материалов (субстратов) чисто урбаногенного происхождения. Поэтому функции и свойства таких почв подвергаются значительному нарушению, особенно в плане функционирования их биологической составляющей.

Нас заинтересовали исследования на экологически уязвимых почвах городских массивов (урбаноземах) с целью активизации их биологической составляющей и, как следствие, частичного самовосстановления. Было предложено выращивание некоторых видов энергетических культур, которые положительно влияют на состояние почвенной фауны и активности фермента протеазы [7; 8], причем не только на урбаноземы, но и на ряд других почв. Важно отметить, что такие энергетические культуры, как мискантус гигантский (*Miscanthus Giganteus*) и ива энергетическая (*Salix*) являются также и декоративными растениями, что особенно ценно при их культивировании в городских зонах.

Протеазная активность – один из интегральных показателей общей биологической активности почвы, ее потенциальная способность разлагать белки и пептиды. Протеаза участвует в мобилизации и круговороте азота. Чем выше содержание подвижного азота и других элементов питания в почве, тем активнее происходит процесс окисления целлюлозы. Целлюлозоразрушающие микроорганизмы расщепляют клетчатку, синтезируют и частично выделяют аминокислоты в среду.

Протеазу считают одним из важнейших ферментов в почвах черноземного типа, однако нельзя недооценивать ее положительное влияние и в других почвенных видах. Определение протеазной активности в кислых и лесных почвах, почвах, подвергшихся деградационным процессам, – эффективный прием почвенно-экологического мониторинга. Именно деградированные почвы представляют собой широкое поле для исследования в области экологического почвоведения, так как в первую очередь они нуждаются в мероприятиях по рекультивации, причем экологически безопасных из-за своей уязвимости.

Биологическое воспроизводство и поддержание плодородия почв как деградированных, так и с нарушенным строением невозможно без учета микробиологической, следовательно, и ферментативной составляющей. Особое значение в данной работе мы предоставляем именно протеазе как ферменту, участвующему в преобразовании азотистых соединений. Определению протеазной активности уделялось много внимания и в прошлом веке, однако даже после многих лет исследований в литературе остается

значительное количество пробелов по реакции протеазы на посторонние факторы. Существующие методики подсчета активности этого фермента отличаются трудоемкостью и применением достаточно большого количества реактивов и приборов. Кроме того, погрешности при таком анализе весьма существенны.

Нами был усовершенствован метод определения протеазной активности по Мишустину и разработан точный экспресс-механизм определения количественного показателя протеазной активности почвы, который позволяет значительно упростить и ускорить существующие методики, получить объективные данные о качестве почвы. Важно и то, что данный метод достаточно легко воспроизвести на практике, имея в наличии необходимый минимум материалов. Именно поэтому предложенный метод имеет значительные преимущества по сравнению с уже существующими.

Исходя из того, что в современном мире предпочтение отдается не только качеству, но и скорости получения результатов, изложенная ниже методика диагностики изменений и экологического состояния почв позволит значительно усовершенствовать экологический мониторинг почв различного генезиса и, как следствие, воспроизвести физические и биологические свойства.

Материалы и методы исследования

При проведении исследований использовали потенциометрические, биологические методы и методы определения кислотно-основной буферности.

Кислотно-основное состояние почвы эффективно оценивать через прямое потенциометрическое определение ион-селективными электродами, которое позволяет проводить измерения непосредственно в почве без отбора образца, а в лабораторных условиях не требует никаких операций обработки почвенного материала, кроме разведения водой.

Определяемая потенциометрически активность вещества в почве – это активное содержание данного вещества в водной фазе в натурной почве, или в условиях, максимально приближенных к таковой.

Активность обычно измеряют в мг-экв/л; или приводят в виде логарифмического показателя, аналогичного рН: $p_a = -\lg a$.

Для перехода от миллиграммов на литр следует умножить значение a на атомную или молекулярную массу определяемого элемента, отнесенную к единице его валентности (эквивалентную массу). Для перехода к содержанию в почве следует учесть содержание в ней водной фазы (влажность).

Для обменных катионов кальция (Ca^{++}) активность следует трактовать как активное содержимое подвижной, водорастворимой формы.

Любое потенциометрическое измерение является эффективным для непосредственного изучения динамики содержания подвижного вещества в почве, а также для определения пространственной вариативности (пестроты) этой информации – например, для нахождения «пятен», чтобы корректировать нормы удобрений на полях, что особенно важно в практике точного земледелия.

В настоящее время существует общепринятый способ потенциометрического определения рН. Кальций может быть определен по ДСТУ 4725:2008.

Метод определения кислотно-основного буферности почвы базируется на измерении изменения рН почвенной суспензии в результате добавления серии возрастающих доз кислоты и щелочи. Он определяется по ДСТУ 4456:2005. Результаты оформляют графически в виде зависимости рН дозы добавки (д). Полученная кривая рН-буферности является основой для нормативного прогнозирования потребностей химической мелиорации для той или иной почвы.

Кислотное плечо буферности для кислых почв нами принято за отрицательное (негативное) крыло рН-буферности, а щелочная – за положительное. Основными показателями рН-буферной способности почв являются:

- буферная емкость почвы в щелочном плече (интервале) нагрузок (БЕ_щ);
- буферная емкость почвы в кислом плече (интервале) нагрузок (БЕ_к);
- коэффициент буферной асимметрии (КБА) – соотношение между разницей и суммой вышеназванных емкостей:

$$\frac{\text{БЕ}_{\text{л}} - \text{БЕ}_{\text{к}}}{\text{БЕ}_{\text{л}} + \text{БЕ}_{\text{к}}};$$

- общий оценочный показатель буферности (ООПБ), включающий сумму буферных емкостей с учетом коэффициента асимметрии, определяется по формуле:

$$(\text{БЕ}_{\text{щ}} + \text{БЕ}_{\text{к}}) (1 - |\text{КБА}|).$$

Чем ниже коэффициент асимметрии, тем более высокий уровень течения обратных процессов, или уровень саморегуляции генетически присущей кислотно-щелочному равновесию почвы.

Диагностику и оптимизацию кислотно-основного состояния конкретной почвы осуществляют путем:

- определения оптимальных значений рН почвенного раствора для сельскохозяйственных культур;
- построения графика рН-буферности для конкретной почвы с отделением оптимальных зон рН на графике;
- определения оптимального уровня рН почвы в пределах конкретного севооборота, для достижения которого необходимо рассчитать дозу мелиоранта;
- расчета и внесения соответствующей дозы мелиоранта в почву с целью достижения заданного уровня.

Определение ферментативной активности по показателям активности протеазы выполнено модифицированным методом фотоавтографии на базе лаборатории плодородия гидроморфных и кислых почв ННЦ «ИПА им. А. Н. Соколовского». В основу способа положен метод определения протеазной активности по Мишустину [9, с. 146].

В качестве аппликационного материала были использованы фотопленки. Нами усовершенствован метод подсчета протеазной активности с помощью графического редактора Adobe Photoshop.

Для проведения определения протеолитической активности необходимы:

- 1) почвенные образцы (50 г – масса одного образца);
- 2) чашки Петри;
- 3) неэкспонированная фотопленка;
- 4) дистиллированная вода.

В чашку Петри на дно кладут отрезок пленки (в нашем исследовании использованы пленки размером 2,5 смх7,5 см) желатиновым слоем вверх. На пленку выкладывают максимально гомогенизированную почву навеской 50 г. Одной из поставленных нами задач было определение скорости полного разложения желатинового слоя пленки, поэтому мы увлажняли почвенные образцы дистиллированной водой, доведя до 80 % от полной влагоемкости почвы.

Пленки вынимают через 3–5 дней (в зависимости от типа почвы) для дальнейшего определения количественной величины активности протеазы, осторожно промывают дистиллированной водой, высушивают и прикрепляют на картон, желательно черного или желтого цвета (наиболее удобные цвета для дальнейшей работы в графическом редакторе). Полученные пленки сканируют. За контроль принимаем пленку с неразложившимся желатином.

Отсканированное изображение открывают с помощью графического редактора Adobe Photoshop. Создают графический документ размером 2,5 см х 7,5 см с прозрачным фоном и разрешением 78,74 пикселей на сантиметр (пкс/см). На отсканированном изображении выделяют участок с фотопленкой, копируют и вставляют в предварительно созданный файл, масштабируют.

С помощью инструмента «Выделение → Цветовой диапазон» пипеткой выбираем цвет фона (разложенный слой желатина), при этом значение команды «разброс» для максимальной точности должно равняться 200. После чего открываем инструмент «Гистограмма», где в пикселях указаны площади как всего изображения (в нашем случае это 116427 пикселей), так и съеденного желатинового слоя – то есть непосредственно фона изображения. По соотношению площадей вариантов с разложенным желатином к контрольному образцу получаем величину общей биологической активности почвы в процентах.

Важно отметить, что от качества отсканированного изображения и от цвета фона будет зависеть результат дальнейших измерений. Для более лучшей визуализации желательно отредактировать изображение в графическом редакторе, как показано на рис. 1.

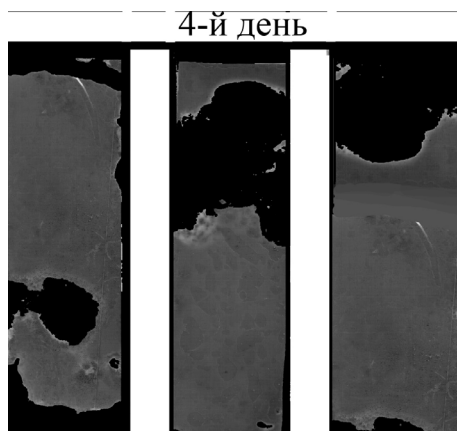


Рис. Оцифрованное изображения фотопленки на 4-й день проведения опыта

Fig. Digitized image of a photo-film piece on the 4th day of research

Ниже приведен алгоритм пересчета протеолитической активности для изображений с разрешением 78,74 пкс/см и пленок, размером 2,5 см х 7,5 см:

площадь одного квадратного сантиметра в пересчете на пиксели:

$$S = 78,74 \times 78,74 = 6200 \text{ пкс};$$

1) площадь пленки в пикселях

$$S_{\text{пл.}} = 116427 \text{ пкс.}$$

Проверка:

$$\text{а) } S_{\text{пл.}} = 2,5 \text{ см} \times 7,5 \text{ см} = 18,8 \text{ см}^2;$$

$$\text{б) } S_{\text{пл.}} = 116427/6200 = 18,8 \text{ см}^2;$$

2) площадь разложившегося желатинового слоя в см²

$$S_{\text{ж.}} = S_{\text{ж.}}(\text{пкс})/6200;$$

3) активность протеазы в %

$$\text{ПА} = S_{\text{ж.}} / S_{\text{пл.}} \times 100.$$

По полученным данным, при анализе различных видов почв было обнаружено, что в лабораторных условиях при указанной влагоемкости, проводить сравнение результатов между контролем и полученными вариантами опыта можно уже через 3–4 дня. В табл. 1 сведены данные наблюдения за процессом разложения желатинового слоя пленки в почвах на третий день проведения опыта. Согласно полученным результатам, можно наглядно убедиться в достаточности продолжительности процесса (до 3 дней назад), так как на 4–5-й день желатиновый слой почти полностью уничтожен на всех пленках.

Таблица 1

**Протеазная активность почв разного происхождения
(при условии увлажнения образцов до 80 % от полной влагоемкости)**

Table 1

Protease activity of soils of various origin (in conditions of moistening the samples to 80 % of the total moisture capacity)

Название почвы	ПА I, %	ПА II, %	ПА III, %	Среднее, %	НСР ₀₅ , %
Чернозем типичный среднесмытый	76,90	73,59	75,72	75,40	1,32
Чернозем обычный среднесмытый	51,54	49,03	50,53	50,37	1,87
Дерново-подзолистый	4,85	5,62	5,15	5,21	2,02
Луговая аллювиальная почва	45,05	45,18	44,65	44,69	4,04
Лугово-болотная аллювиальная почва	34,55	37,12	34,13	35,27	5,15
Урбанозем черноземный	39,30	39,81	38,18	39,10	2,11
Урбанозем литоземный	38,44	41,91	40,74	40,36	2,81
Урбанозем черноземно-луговой	70,67	72,07	71,36	71,37	4,58

Кроме того, благодаря этому методу можно определить скорость действия протеаз в отдельных почвах при различных условиях обработки и при различных нагрузках.

Результаты исследования и их обсуждение

Финальным этапом оперативной диагностики функциональной устойчивости почв является непосредственно вывод коэффициента их функциональной устойчивости. В связи с тем, что кислотнo-основная буферность почвы является интегральным показателем, отражающим изменения в нем (колебания pH и рСа) и способность почвы противостоять внешним нагрузкам, данный показатель должен быть одним из ключевых при определении устойчивости почвы.

Но, упуская из виду живую составляющую почвы, невозможно сделать объективную оценку реакции почвы на экзогенное влияние. Поэтому нами предложены следующие варианты формулы вывода коэффициента функциональной устойчивости почв (К ф.уст.), исходя из их генетических особенностей:

- для дерново-подзолистых почв

$$K_{\text{ф.уст.}} = 0,4 \times B + 0,6 \times П;$$

- для серых лесных

$$K_{\text{ф.уст.}} = 0,6 \times B + 0,4 \times П;$$

- для черноземов оподзоленных

$$K_{\text{ф.уст.}} = 0,7 \times B + 0,3 \times П;$$

- для луговых почв

$$K_{\text{ф.уст.}} = 0,5 \times B + 0,5 \times П,$$

где B – соотношение значения общего оценочного показателя буферности (ООПБ) исследуемой почвы под влиянием антропогенных или природных нагрузок к значению ООПБ той же почвы без нагрузок;

$П$ – соотношение значения протеазной активности исследуемой почвы под влиянием антропогенных или природных нагрузок к значению протеазной активности той же почвы без нагрузок.

В табл. 2 приведены изменения коэффициента функциональной устойчивости почв под влиянием антропогенных нагрузок, которые имеют место на почвах сельскохозяйственного использования, и изменение коэффициента на почвах (в том числе и деградированных), на которых не выращиваются сельскохозяйственные культуры. Кроме того, нами просчитан коэффициент функциональной устойчивости почв при выращивании энергетических культур.

Таблица 2

**Функциональная устойчивость почв с разным кислотно-основным равновесием
под воздействием антропогенных нагрузок**

Table 2

Functional stability of soils with various acid-base balance under the pressure of anthropogenic loads

Вариант	ООПБ, балы	ПА, %	К функц. уст.
Дерново-подзолистые почвы			
Контроль	13,3	37,0	1,00
НРК	11,4	25,0	0,74
Гашеная известь	15,0	36,0	1,03
Сидераты	11,8	20,0	0,67
Энергетические культуры	12,1	39,0	0,99
Серые лесные почвы			
Контроль	16,4	42,0	1,00
НРК	14,2	36,0	0,86
Гашеная известь	18,0	30,0	0,94
Сидераты	16,0	38,0	0,95
Энергетические культуры	16,2	40,0	0,98
Черноземные почвы			
Контроль	30,2	50,0	1,00
НРК	28,2	45,0	0,92
Гашеная известь	29,0	39,0	0,91
Сидераты	30,0	58,0	1,04
Энергетические культуры	30,1	63,0	1,10
Луговые почвы			
Контроль	38,7	63,0	1,00
НРК	–	–	–
Гашеная известь	–	–	–
Сидераты	36,4	61,0	0,95
Энергетические культуры	38,0	65,0	1,01

Исходя из того, что дерново-подзолистые почвы имеют наименьшую буферную емкость, ее роль в поддержании функциональной устойчивости почвы будет менее значимой, чем в серых лесных и черноземных почвах. Луговые почвы отличаются как высокой буферной способностью, так и значительным биологическим разнообразием, то есть эти показатели в равной степени влияют на их свойства.

Поэтому нами предложено вышеприведенное соотношение показателя буферности ООПБ и биологического ПА, которые в совокупности составляют коэффициент функциональной устойчивости почв.

Из табл. 2 следует, что самая высокая функциональная устойчивость присуща черноземам. Дерново-подзолистые почвы более склонны к потере функциональной устойчивости под воздействием внешних нагрузок.

Целесообразно было бы определить преимущества предлагаемых нами методов относительно существующих способов определения выше рассмотренных показателей.

Таким образом, определение каких-либо показателей почвы непосредственно в поле значительно быстрее и менее затратно, так как исключаются расходы времени и материальных ресурсов на подготовку и транспортировку образцов, приобретение реактивов и прочее. Поэтому преимущество потенциометрического метода исследования кислотно-основного состояния почвы очевидно.

До сих пор существовало несколько методов определения биологической активности почвы, но все они – довольно сложные в исполнении, а получение результатов занимает очень много времени. Наиболее распространенные из них следующие:

- метод, основанный на применении целлюлозных стандартов;
- метод по интенсивности разложения льняного полотна;
- метод определения протеолитической активности почв с помощью фотобумаги или фотопленки.

Заключение

Проводилась модернизация уже существующих методов определения протеазной активности почв, что позволило воспроизвести этот анализ при наличии персонального компьютера и незначительного количества лабораторных принадлежностей.

В современных условиях интенсивного роста антропогенного давления человека на окружающую среду одними из основных критериев диагностики функциональной устойчивости почв должна быть ее оперативность, поскольку ряд почв легко поддается изменениям в результате внешних нагрузок. Следовательно, возникает насущная необходимость в своевременном выявлении этих изменений с целью эффективного управления их плодородием.

Впервые был предложен алгоритм определения функциональной устойчивости почв, включающий ряд несложных, нетрудоемких, дешевых этапов, благодаря которым можно получить данные по отдельному типу почвы в очень короткие сроки:

- диагностика кислотно-основного состояния почв ион-селективными методами с определением уровней активности иона кальция и pH почвы;
- моделирование нагрузок (природных и антропогенных) на почвы;
- диагностика изменений биологической активности почвы путем оперативного способа определения протеазной активности в ней;
- определение изменения кислотно-основной буферности почвы под воздействием нагрузок;
- вывод коэффициента функциональной устойчивости почв.

Таким образом, предложенная оперативная диагностика позволяет комплексно отразить эффективность функционирования почвы и, соответственно, быстро разрабатывать управленческие меры по улучшению показателей почвы с целью получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур.

Библиографические ссылки

1. Цапко Ю. Л., Десятник К. О., Холодна А. С. Методологія оперативної діагностики впливу природних та антропогенних навантажень на функціональну стійкість кислих ґрунтів. Харків, 2017.
2. Гамкало М. З., Гамкало З. Г. pH-буферність ґрунтів чорногірського масиву Карпатського біосферного заповідника // Агрохімія та ґрунтознавство. 1998. № 3. С. 142–143.
3. Жарикова Е. А. Оценка параметров калийного состояния почв Среднеамурской низменности // Почвоведение. 2004. № 7. С. 819–827.
4. Зайцева Т. Ф. Буферность почв и вопросы диагностики // Изв. СО АН СССР. 1987. № 14/2. С. 69–80.
5. Demisie W., Liu Z., Zhang M. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of redsoil // Catena. 2014. № 121. P. 214–21.
6. Тихоненко Д. Г., Горін М. О. Проблеми картографування урбаноземів // Вісник ХНАУ. 2013. № 2. С. 5–11.
7. Цапко Ю. Л., Холодная А. С. Изменение биологической активности деградированных черноземов Харьковской области при выращивании мискантуса гигантского // Colloquium-journal. 2017. № 10. С. 9–12.
8. Цапко Ю. Л., Холодна А. С. Протеазна активність урбаноземів Харківської області за умов вирощування міскантусу гігантського // Ґрунтознавство. 2017. № 18 (1–2). С. 66–71.
9. Мишустин Е. Н., Никитин Д. И., Востров И. С. Модернизация методов учёта почвенного микронаселения и его активности // Микроорганизмы в сельском хозяйстве. Минск, 1968. С. 144–150.

References

1. Tsapko Yu. L., Desyatnik K. O., Kholodna A. S. [Methodological guidelines for operational diagnostic of natural and anthropogenic loads' influence on the functional stability of acid soils]. Kharkiv, 2017 (in Ukrainian).
2. Gamkalo M. Z., Gamkalo Z. G. [pH-buffer of soil of chornohora massif of the Carpathian biosphere reserve]. *Agrokhimiya ta ґruntознаvstvo*. 1998. No. 3. P. 142–143 (in Ukrainian).

3. Zharikova E. A. [Potential buffer ability of soils due to Potassium of Amur region plains.] *Pochvovedenie*. 2004. No. 7. P. 819–827 (in Russ.).
4. Zayceva T. F. [Soil buffer and questions of diagnosis]. *New sof AAS USSR*. 1987. No. 14/2. P. 69–80 (in Russ.).
5. Demisie W., Liu Z., Zhang M. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil. *Catena*. 2014. No. 121. P. 214–21.
6. Tyhonenko D. G., Gorin M. O. [Problems of mapping of urban soils]. *Bulletin of KhNAU*. 2013. No. 2. P. 5–11 (in Ukrainian).
7. Tsapko Yu. L., Kholodnaya A. S. [Changes of biological activity of degraded chernozems in Kharkiv region due to giant miscanthus cultivation]. *Colloquium-journal*. 2017. No. 10. P. 9–12 (in Russ.).
8. Tsapko Yu. L., Kholodna A. S. [Protease activity of urban soils of Kharkiv region after the influence of giant miscanthus cultivation]. *Gruntoznavstvo*. 2017. No. 18 (1–2). P. 66–71 (in Ukrainian).
9. Mishustin E. N., Nikitin D. I., Vostrov I. S. [Modernization of methods of accounting of soil micro-population and its activity]. *Microorganisms in agriculture*. Minsk, 1968. P. 144–50 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 10.05.2018

Received by editorial board 10.05.2018

РАДИОЭКОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOECOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 632.15:631.4

ОЦЕНКА РИСКОВ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ С ПРЕВЫШЕНИЕМ ДОПУСТИМЫХ УРОВНЕЙ СОДЕРЖАНИЯ ^{137}Cs И ^{90}Sr НА ТЕРРИТОРИИ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Н. Н. ЦЫБУЛЬКО¹⁾

¹⁾Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Казинца, 90, 220108, Минск, Беларусь

Выполнена прогнозная оценка рисков производства сельскохозяйственной продукции с превышением допустимых уровней по содержанию радионуклидов. Оценка базировалась на показателях предельно допустимой плотности загрязнения почв ^{137}Cs и ^{90}Sr для получения разных видов товарной продукции растениеводства, сельскохозяйственного сырья и кормов. Все районы на территории радиоактивного загрязнения сгруппированы в зависимости от степени риска производства различных видов сельскохозяйственной продукции.

Ключевые слова: ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; почвы; оценка; риски; сельскохозяйственная продукция; дозовые нагрузки.

Образец цитирования:

Цыбулько Н. Н. Оценка рисков производства сельскохозяйственной продукции с превышением допустимых уровней содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr на территории радиоактивного загрязнения // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 57–70.

For citation:

Tsybulka M. M. Assessment of agricultural production risks with exceeding the admissible levels content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the territory of radioactive contamination. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 57–70 (in Russ.).

Авторы:

Николай Николаевич Цыбулько – доктор сельскохозяйственных наук, доцент; заместитель директора по научной работе.

Authors:

Mikalai M. Tsybulka, doctor of science (agriculture), associate professor; deputy director for science.
nik.nik1966@tut.by

ASSESSMENT OF AGRICULTURAL PRODUCTION RISKS WITH EXCEEDING THE ADMISSIBLE LEVELS CONTENT OF ^{137}Cs AND ^{90}Sr IN THE TERRITORY OF RADIOACTIVE CONTAMINATION

M. M. TSYBULKA^a

^aThe Institute for Soil Science and Agrochemistry of National Academy of Sciences of Belarus,
Kazinets street, 90, 220108, Minsk, Belarus

The forecast estimation of risks of production of agricultural products with excess of admissible levels on the maintenance of radionuclides is performed. The assessment was based on the maximum permissible density of soil pollution ^{137}Cs and ^{90}Sr to obtain different types of marketable crop production, agricultural raw materials and feed. All areas of radioactive contamination are grouped according to the degree of risk of producing different types of agricultural products.

Key words: ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; почвы; оценка; риски; сельскохозяйственная продукция; дозовые нагрузки.

Введение

Пространственные различия в характере и уровнях радиоактивного загрязнения и особенностях почвенного покрова территории обуславливают пространственную дифференциацию радиационной обстановки, радиационные риски (вероятности) производства пищевых продуктов, сельскохозяйственной продукции и сырья с превышением гигиенических нормативов по содержанию радионуклидов и дозовые нагрузки на население на определенной территории.

Под радиационными рисками понимается присутствие радионуклидов, которые могут оказать вредное воздействие на здоровье людей в результате производства и потребления пищевых продуктов со сверхнормативным их содержанием. На основе измеряемых характеристик рассчитываются показатели, которые определяют прогнозные риски производства основных видов растениеводческой продукции (зерно, картофель, овощи) на пищевые цели и кормов для получения основных видов продукции животноводства (молоко, мясо) с содержанием ^{137}Cs и ^{90}Sr , превышающим установленные нормативы.

Цель исследования – на основе анализа территориальных сочетаний радиологических и почвенных факторов, характера и интенсивности их проявления определить риски (вероятности) производства сельскохозяйственной продукции с содержанием радионуклидов, превышающем допустимые нормативы, а также установить взаимосвязь их с дозовыми нагрузками на население по группам районов.

Почвенно-радиологические условия и риски загрязнения сельскохозяйственной продукции

Из 118 административных районов Беларуси в 57 имеются сельскохозяйственные земли, загрязненные ^{137}Cs с плотностью от 1 до 40 Ки/км². Кроме этого в 26 районах сельскохозяйственные земли одновременно загрязнены и ^{90}Sr с плотностью от 0,15 до 3,0 Ки/км². В разрезе районов площади и доля загрязненных ^{137}Cs и ^{90}Sr земель колеблются в очень широких пределах. Удельный вес земель, загрязненных ^{137}Cs , изменяется от 0,1 до 100 %, ^{90}Sr – от 0,1 до 96,3 % от общей площади сельскохозяйственного землепользования района. В зависимости от удельного веса земель, загрязненных ^{137}Cs с плотностью 1,0–40,0 Ки/км² и (или) загрязненных ^{90}Sr с плотностью 0,15–3,0 Ки/км², все районы разделены на 4 группы (табл. 1).

Первую группу представляют районы, в которых доля таких земель не превышает 10 %, вторую группу – районы с долей 11–25 %, третью группу – с долей 26–50 % и четвертую группу – районы с долей загрязненных земель >50 %. Из 57 районов в 25 удельный вес загрязненных ^{137}Cs сельскохозяйственных земель не превышает 10 %, в 9 районах такие земли занимают 11–25 %, в 10 районах – 26–50 % и в 13 районах – более 50 %.

В 23 районах, относящихся к третьей и четвертой группам по степени загрязнения, сосредоточено 81 % (79 тыс. га) всех загрязненных ^{137}Cs сельскохозяйственных земель, тогда как в остальных 34 районах, относящихся к первой и второй группам, – 19 % (18,5 тыс. га).

Доля загрязненных ^{137}Cs земель в составе землепользования не превышает 10 % в Березовском, Дрогичинском, Ивановском, Пинском р-нах Брестской обл., Толочинском р-не Витебской обл., Житковичском, Петриковском и Светлогорском р-нах Гомельской обл., Кореличском, Сморгонском и Дятловском р-нах Гродненской обл., Борисовском, Вилейском, Крупском, Логойском, Минском, Молодечненском,

Слуцком и Столбцовском р-нах Минской обл., Бельничском, Бобруйском, Кировском, Климовичском, Кличевском, Мстиславском р-нах Могилевской обл. От 11 до 25 % загрязнены ^{137}Cs земли в Столинском р-не Брестской обл., Жлобинском, и Калинковичском р-нах Гомельской обл., Новогрудском и Ивьевском р-нах Гродненской обл., Березинском, Воложинском и Солигорском р-нах Минской обл., Могилевском р-не Могилевской обл. Земли загрязнены от 26 до 50 % в Лунинецком р-не Брестской обл., Гомельском, Добрушском, Лельчицком, Лоевском, Мозырском и Речицком р-нах Гомельской обл., Костюковичском, Кричевском и Чаусском р-нах Могилевской обл. Наиболее высокий удельный вес (более 50 %) загрязненных ^{137}Cs земель отмечается в Брагинском, Буда-Кошелевском, Ветковском, Ельском, Кормянском, Наровлянском, Рогачевском, Хойникском и Чечерском р-нах Гомельской обл., Быховском, Краснопольском, Славгородском и Чериковском р-нах Могилевской обл.

Таблица 1

Распределение районов по удельному весу загрязненных ^{137}Cs и ^{90}Sr сельскохозяйственных земель

Table 1

The distribution of districts according to the specific weight of ^{137}Cs and ^{90}Sr contaminated agricultural land

Градации по удельному весу земель в районе, %	Радионуклид	Площадь земель		Всего районов
		га	% от общей площади	
До 10	^{137}Cs	47714	4,9	25
	^{90}Sr	12065	3,6	14
11–25	^{137}Cs	137679	14,1	9
	^{90}Sr	32863	9,8	3
26–50	^{137}Cs	232445	23,7	10
	^{90}Sr	104642	31,1	6
Более 50	^{137}Cs	561664	57,3	13
	^{90}Sr	186748	55,5	5

Из 28 районов, загрязненных ^{90}Sr , в 14 удельный вес загрязненных земель не превышает 10 %, в 3 районах такие земли занимают 11–25 %, в 6 районах – 26–50 % и в 5 районах – более 50 %. В 14 наиболее загрязненных ^{90}Sr районах сосредоточено 96 % всех загрязненных этим радионуклидом земель, тогда как в остальных 14 районах – 4 %. Незначительная доля (до 10 %) сельскохозяйственных земель загрязнена ^{90}Sr в Лунинецком, Пинском и Столинском р-нах Брестской обл., Жлобинском, Лельчицком, Кормянском, Мозырском, Рогачевском и Светлогорском р-нах Гомельской обл., Быховском, Климовичском, Краснопольском, Кричевском и Славгородском р-нах Могилевской обл. Земли Буда-Кошелевского р-на Гомельской обл., Костюковичского и Чериковского р-нов Могилевской обл. загрязнены ^{90}Sr в средней степени (от 11 до 25 %). В Гомельском, Добрушском, Ельском, Калинковичском, Лоевском и Чечерском р-нах Гомельской обл. загрязнено от 26 до 50 % земель. Наибольший удельный вес (более 50 %) загрязненных ^{90}Sr земель в Брагинском, Ветковском, Наровлянском, Речицком и Хойникском р-нах Гомельской обл.

Удельный вес загрязненных ^{137}Cs и ^{90}Sr земель в составе сельскохозяйственного землепользования является количественным показателем, характеризующим степень радиоактивного загрязнения территории, определяющей ограничения в возделывании сельскохозяйственных культур. Качественными являются показатели, отражающие плотности загрязнения земель ^{137}Cs и ^{90}Sr . В качестве таких критериев были приняты значения удельного веса в составе загрязненных ^{137}Cs и ^{90}Sr сельскохозяйственных земель, почв с плотностью загрязнения соответственно 5 Ки/км², 0,30 Ки/км² и выше, которые являются наиболее «проблемными» для производства продукции, отвечающей гигиеническим нормативам.

Земли, загрязненные ^{137}Cs 5 Ки/км² и выше, имеются в Брестской, Гомельской, Гродненской, Минской и Могилевской обл. Общая площадь их составляет 210670 га или 21,5 % от общей площади загрязненных ^{137}Cs земель. В 33 из 57 загрязненных ^{137}Cs районов в составе земель имеются земли, загрязненные с плотностью 5 Ки/км² и выше. Основные массивы их сосредоточены в 6 районах Гомельской обл. – Ветковском, Кормянском, Хойникском, Наровлянском, Чечерском, Буда-Кошелевском и 3 районах Могилевской обл. – Славгородском, Костюковичском и Чериковском.

Из 28 районов, загрязненных ^{90}Sr , в 13 районах имеются сельскохозяйственные земли, загрязненные данным радионуклидом с плотностью 0,30 Ки/км² и выше. Общая площадь этих земель составляет 138906 га и основные массивы их находятся в 6 районах Гомельской обл. – Брагинском, Хойникском, Речицком, Добрушском, Ветковском и Калинковичском.

По удельному весу земель, загрязненных ^{137}Cs с плотностью 5 Ки/км² и выше и ^{90}Sr 0,30 Ки/км² и выше, районы объединены в 4 группы. Первую группу представляют районы, в которых доля таких земель не превышает 1 % от общей их площади по республике, вторую группу – районы с долей 1,1–5,0 %, третью группу – с долей 5,1–10,0 % и четвертую группу – районы с долей загрязненных земель >10,0 % (табл. 2).

На 18 районов, в которых доля земель с плотностью загрязнения ^{137}Cs 5 Ки/км² и выше составляет не более 1 % от общей их площади, приходится 10 тыс. га земель, тогда как на остальные 15 районов, относящихся ко второй (1,1–5,0 %), третьей (5,1–10,0 %) и четвертой группам (более 10 %) – более 200 тыс. га или 95 %.

Из 13 районов, где имеются земли, загрязненные ^{90}Sr с плотностью 0,30 Ки/км² и выше, в 6 районах, которые относятся к третьей (5,1–10,0 %) и четвертой группам (более 10 %), сосредоточено 85 % (118,5 тыс. га) этих земель, а в остальных 7 районах, относящихся к первой (до 1 %) и второй (1,1–5,0 %) группам, – только 15 % (20,3 тыс. га).

Генетические свойства и плодородие почв, наряду с характером и степенью их радиоактивного загрязнения, играют важнейшую роль, связанную с поведением радионуклидов в агроэкосистемах, параметрами поступления их по пищевым цепочкам.

Таблица 2

Распределение районов по удельному весу земель, загрязненных ^{137}Cs с плотностью 5 Ки/км² и выше и ^{90}Sr 0,30 Ки/км² и выше

Table 2

The distribution of districts according to the specific weight of land contaminated with ^{137}Cs with a density of 5 Ki/km² and above and ^{90}Sr of 0.30 Ki/km² and above

Градации по удельному весу земель в районе, %	Радионуклид	Площадь земель		Всего районов
		га	% от общей площади	
До 1,0	^{137}Cs	10268	4,9	18
	^{90}Sr	308	0,2	2
1,1–5,0	^{137}Cs	65397	31,0	8
	^{90}Sr	20003	14,4	5
5,1–10,0	^{137}Cs	64079	30,4	4
	^{90}Sr	39905	28,7	4
Более 10,0	^{137}Cs	70926	33,7	3
	^{90}Sr	78690	56,7	2
Всего	^{137}Cs	210670	100	33
	^{90}Sr	138906	100	13

Сельскохозяйственные земли районов, подвергшихся радиоактивному загрязнению, характеризуются значительной пестротой почвенного покрова, широким разнообразием его компонентного состава, обусловленным типовыми различиями, степенью увлажнения, гранулометрическим составом почвообразующих и подстилающих пород. На почвенных картах отдельных землепользователей часто выделяется до 40 и более разновидностей, различающихся между собой водно-физическими и агрохимическими свойствами [1].

В составе сельскохозяйственных земель встречаются дерново-подзолистые, дерново-подзолистые заболоченные, дерново-карбонатные, дерновые, торфяно-болотные, аллювиальные (пойменные, торфяно-болотные), дерновые заболоченные, деградированные торфяно-минеральные, минеральные остаточные-торфяные и минеральные постторфяные. Однако на фоне общей пестроты, основной фонд представляют дерново-подзолистые и дерново-подзолистые заболоченные почвы, занимающие соответственно 33,4 и 35,6 %. Всего на территории радиоактивного загрязнения эти почвы в сумме составляют около 700,0 тыс. га. Значительные площади занимают также торфяно-болотные (11,4 %), дерновые заболоченные (10,3 %) и аллювиальные дерновые заболоченные (5,6 %) почвы. В последние годы увеличились площади антропогенно-преобразованных торфяных почв (3,7 %), образовавшиеся в результате деградации торфяно-болотных почв при их интенсивном сельскохозяйственном использовании.

По районам наблюдаются колебания в распределении почв по типам. Дерново-подзолистые автоморфные почвы преобладают в Бельничском, Быховском, Кричевском, Могилевском, Славгородском, Чаусском, Чечерском, Ветковском, Кормянском, Добрушском районах, где их площади составляют

40–60 % от площади сельскохозяйственных земель. Среди дерново-подзолистых почв в виде мелких пятен и островов встречаются дерновые и дерново-карбонатные почвы с высоким потенциальным плодородием. Однако площадь их составляет только около 95 тыс. га или 9,5 % от площади загрязненных радионуклидами земель. Крупноконтурные массивы и участки этих почв расположены в районах Полесья – Лунинецком, Пинском и Столинском р-нах Брестской обл., Житковичском, Лоевском, Рогачевском и Хойникском р-нах Гомельской обл., а также в Солигорском р-не Минской обл. В этих районах удельный вес дерновых и дерново-карбонатных почв в составе сельскохозяйственных земель занимает 20 % и более. Дерново-подзолистые заболоченные почвы характерны для Белорусского Полесья (Наровлянский, Ельский и др. р-ны), а также для некоторых р-нов Могилевской обл. с выровненным рельефом (Костюковичский, Краснопольский р-ны), где их площадь составляет более 50 %. Дерновые заболоченные почвы занимают большие площади в Лунинецком, Пинском, Столинском, Брагинском, Добрушском, Лоевском, Речицком и Хойникском р-нах (15–40 %), а аллювиальные дерновые заболоченные – в Столинском, Гомельском, Лоевском, Мозырском, Рогачевском и Быховском (более 10 %).

В Полесском регионе значительное распространение получили торфяно-болотные почвы, в ряде районов их площади составляют 15–35 % (Лунинецкий, Брагинский, Ельский, Калинковичский, Лельчицкий, Хойникский р-ны). Большие площади торфяных почв имеются также в Быховском р-не Могилевской обл. (13,6 %). Наибольшие площади деградированных (торфяно-минеральных, минеральных остаточно-торфяных и минеральных постторфяных) почв имеются в Лунинецком, Ельском, Калинковичском р-нах (более 10 %).

Поступление радионуклидов в растения существенно зависит от гранулометрического состава почвы. По гранулометрическому составу в составе сельскохозяйственных земель загрязненной радионуклидами территории преобладают супесчаные почвы – 46,4 %, песчаные занимают 27,9 %, а глинистые и суглинистые – 12,5 %. Высоким удельным весом суглинистых почв характеризуются отдельные районы Могилевской области (Кричевский – 63,8 %, Могилевский – 36,8 %, Бельничский – 36,3 %, Чериковский – 28,5 %), а также Столинский р-н Брестской обл. (25,9 %). В ряде районов такие почвы практически отсутствуют (менее 1 %). Это Лунинецкий, Пинский, Брагинский, Ельский, Калинковичский, Лельчицкий р-ны. Наибольшие площади супесчаных почв в Могилевской обл. Более 60 % сельскохозяйственных земель они занимают в Быховском, Костюковичском, Краснопольском, Славгородском, Чауском и Чериковском р-нах. В некоторых районах Гомельской области они также преобладают (Будакашелевский, Ветковский, Добрушский, Кормянский, Рогачевский – более 50 %). Песчаные почвы преобладают на территории Полесья, занимающие более 50 % площади земель в Лунинецком, Пинском, Гомельском, Ельском, Калинковичском, Лельчицком, Лоевском, Мозырском, Наровлянском р-нах.

Степень увлажнения – важнейший фактор, определяющий параметры миграции радионуклидов в системе «почва–растение». На территории радиоактивного загрязнения в составе сельскохозяйственных земель автоморфные почвы занимают 33,1 %, полугидроморфные – 52,0 %, гидроморфные – 14,9 %. Площади полугидроморфных и гидроморфных почв составляют 66,9 %. По районам этот показатель колеблется от 40,8 % в Чериковском р-не до 94,9 % – в Лунинецком.

При оценке почвенного покрова важное значение имеет выделение почв с высокими параметрами перехода радионуклидов в растения. К таким почвам относятся: торфяно-болотные, торфяно-глеевые, деградированные торфяно-минеральные, минеральные остаточно-торфяные и минеральные постторфяные и аллювиальные (пойменные) почвы. Значительные площади таких почв отмечаются в Лунинецком и Пинском р-нах Брестской обл., Петриковском р-не Гомельской обл., Солигорском р-не Минской обл. От 20 до 30 % таких почв в Брагинском, Ельском, Лельчицком р-нах Гомельской обл. (рис. 1).

В результате оценки получена итоговая сумма баллов по каждому району, которая характеризует степень радиоэкологической напряженности территории. Суммарный балл по районам, в зависимости от сочетаний радиологических и почвенных условий, колеблется от 1 до 19. Минимальным баллом (1) характеризуются районы, в которых загрязненные ^{137}Cs земли составляют не более 10 %, отсутствуют земли с плотностью загрязнения 5 Ки/км² и выше, а также земли, загрязненные ^{90}Sr , и почвы с высокими параметрами перехода радионуклидов в растения.

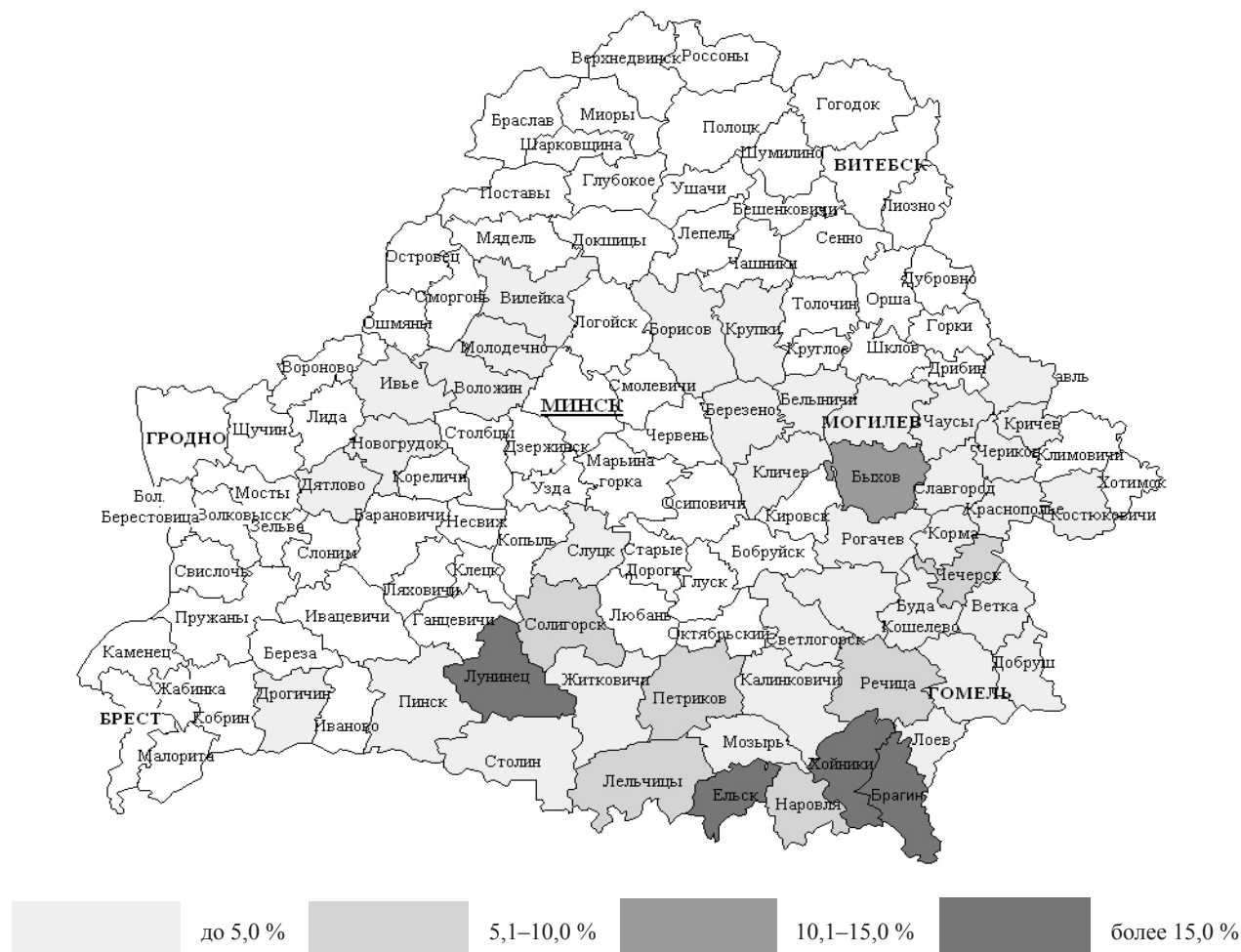


Рис. 1. Удельный вес почв с высокими параметрами перехода радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию

Fig. 1. Specific gravity of soils with high radionuclide transport parameters agricultural product

Из 57 загрязненных районов минимальный балл отмечается в 10 районах. Максимальный балл (19) имеют районы, в которых почти вся площадь земель загрязнена ^{137}Cs и ^{90}Sr , в том числе с высокой плотностью, а также в структуре почвенного покрова значительную долю занимают почвы с высокими параметрами перехода радионуклидов. Максимальный балл имеет 1 район (табл. 3).

Таблица 3

Суммарная балльная оценка районов по радиологическим и почвенным факторам

Table 3

Total score assessment of areas by radiological and soil factors

Сумма баллов	Количество районов	Максимальный удельный вес в составе землепользования почв, %				
		загрязненных ^{137}Cs 1–40 Ки/км ²	загрязненных ^{90}Sr 0,15–3,0 Ки/км ²	загрязненных ^{137}Cs 5–40 Ки/км ²	загрязненных ^{90}Sr 0,30–3,0 Ки/км ²	с высоким переходом ^{137}Cs и ^{90}Sr
1–2	20	7,9	0	0	0	0,6
3–4	9	22,2	0	0,2	0	6,8
5–6	7	44,8	4,9	0,9	0	6,3
7–8	2	55,0	0,2	2,3	0	10
9–10	10	100,0	34,6	13,1	6,5	17,6
11–12	1	82,1	21,3	5,1	1,5	4,4

Окончание табл. 3

Ending table 3

Сумма баллов	Количество районов	Максимальный удельный вес в составе землепользования почв, %				
		загрязненных ^{137}Cs 1–40 Ки/км ²	загрязненных ^{90}Sr 0,15–3,0 Ки/км ²	загрязненных ^{137}Cs 5–40 Ки/км ²	загрязненных ^{90}Sr 0,30–3,0 Ки/км ²	с высоким переходом ^{137}Cs и ^{90}Sr
13–14	4	88,3	56,5	8,1	8,4	23,6
15–16	2	98,6	77,8	11,2	5,1	6,8
17–19	2	94,2	95,7	9,4	29,5	19,0

Интегральными показателями степени экологической напряженности или состояния территорий являются экологические риски. При рассмотрении последствий облучения термин «риск» используется в его общем смысле, рассматривая его в качестве эквивалента понятию «опасность» [2]. По определению МАГАТЭ, риск – это многозначная величина, выражающая угрозу, опасность или возможность возникновения вредных или поражающих последствий в результате действительного или потенциального облучения [3].

Для оценки последствий воздействия техногенных факторов на агроэкосистемы в рамках существующей экологической ситуации предложено использовать два вида риска [4]:

- риск воздействия техногенных факторов на «критические» компоненты агроценозов с точки зрения их чувствительности и системообразующей роли;
- риск негативного воздействия на человека в результате увеличения содержания загрязняющих веществ в компонентах агроэкосистем и сельскохозяйственной продукции.

Радиационное воздействие на агроэкосистему может вызвать не только изменение ее компонентов и устойчивости в целом, но и нарушение целевой функций этой системы – производство продукции, отвечающей гигиеническим нормативам по содержанию радионуклидов.

К основным характеристикам радиационного фактора, оказывающего негативное влияние на человека при загрязнении агроэкосистемы радионуклидами, относятся содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции и дозовая нагрузка на различные категории населения, формируемая в результате внутреннего и внешнего облучения. В связи с этим оценка последствий радиоактивного загрязнения агроэкосистемы должна выполняться с использованием в качестве нормативов допустимых содержаний радионуклидов в продукции.

В качестве критериев оценки рисков для населения наиболее целесообразно использовать нормативы, законодательно утвержденные и отраженные в соответствующих нормативных документах – гигиенические нормативы содержания радионуклидов в пищевых продуктах, сельскохозяйственной продукции, сырье и кормах.

Оценка последствий радиационного воздействия на компоненты экосистем и человека может быть выполнена на основе как фактических, так и прогнозируемых рисков. Идентификация фактических рисков осуществляется на получении данных радиационного контроля содержания радионуклидов в пищевых продуктах, сельскохозяйственном сырье и кормах. Определение фактических рисков целесообразно при локальных загрязнениях и в условиях квазиравновесной ситуации, когда воздействие радиационного фактора носит хронический характер. Расчет прогнозируемых рисков выполняется с использованием соответствующих методов прогноза.

Оценка радиационных рисков включает прогноз накопления радионуклидов в пищевых продуктах и прогноз дозовых нагрузок на человека в результате употребления данных продуктов. Выделены «критические» виды пищевых продуктов и сельскохозяйственной продукции. Прогноз радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции и соответствующих дозовых нагрузок от внутреннего облучения при потреблении такой продукции дают возможность: определить целесообразность производства той или иной продукции на имеющихся землях; выяснить возможность прямого использования продукции или необходимость ее переработки; выявить критические продукты питания и разработать рекомендации по изменению структуры пищевых рационов населения; определить необходимость проведения защитных мероприятий для снижения загрязнения продукции.

В разрезе районов выполнена прогнозная оценка рисков производства сельскохозяйственной продукции с превышением допустимых уровней по содержанию радионуклидов. Оценка базировалась на показателях предельно допустимой плотности загрязнения почв ^{137}Cs и ^{90}Sr для получения разных видов товарной продукции растениеводства, сельскохозяйственного сырья и кормов. Выделены «критические»

виды сельскохозяйственной продукции – зерно на пищевые цели, картофель, овощи, зернофураж и зеленая масса для получения цельного молока и мяса.

На основе сравнительного анализа данных фактических уровней и площадей загрязненных сельскохозяйственных земель и расчетных параметров предельно допустимых плотностей загрязнения почв ^{137}Cs и ^{90}Sr при получении разных видов растениеводческой продукции определен удельный вес площадей земель, на которых возможно превышение установленных нормативов по содержанию данных радионуклидов.

Для обеспечения высокого запаса прочности и оценки максимально возможного риска загрязнения продукции при расчетах допустимых плотностей загрязнения почв ^{137}Cs и ^{90}Sr принимались коэффициенты перехода радионуклидов из почвы в растениеводческую продукцию при низких показателях плодородия ($\text{pH} - 4,6-5,0$, $\text{K}_2\text{O} - 81-140$ мг/кг почвы). По удельному весу земель, на которых возможно превышение в производимой продукции нормативов содержания радионуклидов, принята следующая градация степени рисков (табл. 4).

Таблица 4

Схема градации по степени риска производства сельскохозяйственной продукции

Table 4

Grading scheme for the degree of risk of agricultural production

Степень риска	Риск превышения нормативов в продукции, %
Риск отсутствует	0
Слабая	0,1–10,0
Средняя	10,1–25,0
Высокая	25,1–50,0
Очень высокая	> 50,0

На основании полученных данных рисков производства с превышением допустимых уровней содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в зерне на пищевые цели, картофеле и овощах, зернофураже, корнеплодах и зеленой массе для получения молока и мяса выполнен корреляционно-регрессионный анализ с целью установления зависимостей между значениями (баллами) комплексной оценки районов и рисками производства в них перечисленных видов продукции.

Установлены тесные взаимосвязи показателей комплексной оценки районов и рисков производства с превышением допустимых уровней содержания ^{137}Cs в зерне на пищевые цели, а также зерновых культур (проса и гороха). Коэффициенты корреляции (r) составили 0,72–0,87 (табл. 5).

Таблица 5

Зависимости между показателями комплексной почвенно-радиологической оценки районов и рисками производства в них разных видов растениеводческой продукции по содержанию ^{137}Cs и ^{90}Sr

Table 5

Dependences between indicators of complex soil-radiological assessment of areas and production risks of different types crop production on the content of ^{137}Cs and ^{90}Sr

Вид продукции	Культура	Уравнение регрессии	r
	^{137}Cs		
Зерно на пищевые цели	Озимая рожь, озимая пшеница	$y = 0,0331x^2 + 0,1993x + 0,1957$	0,72
	Яровая пшеница, ячмень, овес	$y = 0,046x^2 + 0,344x + 0,2435$	0,87
Картофель и овощи	Картофель, столовая свекла, морковь, капуста	$y = 0,0135x^2 + 0,114x + 0,3867$	0,60
Зерно на фураж для производства молока	Озимая рожь, озимое тритикале, ячмень и овес	$y = 0,0346x^2 + 0,3138x + 0,4751$	0,85
	Горох, люпин	$y = 0,0813x^2 + 1,2746x - 3,3842$	0,70
Зерно на фураж для производства мяса	Озимая рожь, озимое тритикале, ячмень и овес	$y = 0,0346x^2 - 0,3138x + 0,4751$	0,82
	Горох	$y = 0,0521x^2 + 0,0489x - 0,5431$	0,66
	Люпин	$y = 0,0813x^2 + 1,2746x - 3,3842$	0,69
Зеленая масса для производства молока	Многолетние злаковые травы	$y = 0,0813x^2 + 1,2746x - 3,3842$	0,70
Зеленая масса для производства мяса	Многолетние злаковые травы	$y = 0,0742x^2 + 0,1389x - 0,2622$	0,71

Окончание табл. 5

Ending table 5

Вид продукции	Культура ⁹⁰ Sr	Уравнение регрессии	r
Зерно на пищевые цели	Озимая рожь, озимая пшеница и яровая пшеница, ячмень, овес	$y = 0,4129x^2 - 2,7677x + 3,439$	0,93
Картофель на пищевые цели	Картофель	$y = 0,3285x^2 - 4,0271x + 7,2647$	0,83
Овощи	Столовая свекла, морковь, капуста	$y = 0,4328x^2 - 4,867x + 8,3953$	0,91
Зерно на фураж для производства молока	Озимая рожь, озимое тритикале, ячмень и овес	$y = 0,3285x^2 - 4,0271x + 7,2647$	0,84
	Горох	$y = 0,4328x^2 - 4,867x + 8,3953$	0,91
	Люпин	$y = 0,4129x^2 - 2,7677x + 3,439$	0,93
Корнеплоды для производства молока	Кормовая свекла	$y = 0,4129x^2 - 2,7677x + 3,439$	0,93
Зеленая масса для производства молока	Многолетние бобово-злаковые травы	$y = 0,3205x^2 - 3,9303x + 7,0934$	0,83

Заметная взаимосвязь ($r = 0,60$) установлена между показателями комплексной оценки районов и рисками производства с превышением допустимых уровней по содержанию ¹³⁷Cs картофеля и овощей. Даже в районах с высокими оценочными баллами (12–16) риск получения продукции этих культур с превышением допустимых уровней невысокий – 4–6 %.

Высокие взаимосвязи показателей комплексной оценки районов установлены с рисками производства с превышением допустимых уровней по ¹³⁷Cs фуражного зерна, зеленой массы многолетних трав для использования при получении цельного молока. Коэффициенты корреляции составили от 0,70 до 0,85. Тесная взаимосвязь показателей установлена также с рисками производства фуражного зерна озимой ржи, озимого тритикале, ячменя и овса с превышением допустимых уровней по ¹³⁷Cs для использования с целью получения мяса.

Установлены тесные взаимосвязи показателей балльной оценки районов и рисков производства с превышением допустимых уровней содержания ⁹⁰Sr в пищевом зерне, картофеле и овощах (свекла, морковь, капуста), фуражном зерне зерновых культур, гороха и люпина, корнеплодов и зеленой массы многолетних бобово-злаковых трав.

На основе комплексной оценки почвенно-радиологических условий и рисков производства продукции все районы, расположенные на территории радиоактивного загрязнения, ранжированы по радиоэкологической напряженности. В зависимости от суммарной балльной оценки выделено 4 группы районов. Первую группу представляют районы, в которых суммарный балл колеблется от 1 до 4, вторую группу – районы от 5 до 8 баллов, третью группу – от 9 до 12 баллов, четвертую группу – районы с баллом 13 и выше (табл. 6).

Таблица 6

Распределение районов по степени радиоэкологической напряженности

Table 6

The distribution of districts according to the degree of radio-ecological tension

Группа	Степень радиоэкологической напряженности территории	Диапазон баллов	Всего районов	В том числе по областям					
				Брестская	Витебская	Гомельская	Гродненская	Минская	Могилевская
I	Низкая	1–4	29	4	1	3	5	10	6
II	Средняя	5–8	9	1	–	4	–	1	3
III	Высокая	9–12	11	1	–	5	–	–	5
IV	Очень высокая	13 и более	8	–	–	8	–	–	–
Всего			57	6	1	20	5	11	14

На рис. 2 представлена синтезированная картодиаграмма выделенных групп районов по степени радиоэкологической напряженности. Первая группа с низкой степенью радиоэкологической напряженности

объединяет 29 районов, в которых доля земель, загрязненных ^{137}Cs с плотностью от 1 до 5 Ки/км², как правило, не превышает 10 % (в отдельных случаях может достигать 20 %), отсутствуют, или не превышают 0,5 % земли с плотностью загрязнения выше 5 Ки/км², а также отсутствуют земли, загрязненные ^{90}Sr . Доля почв, характеризующихся повышенным переходом радионуклидов в растения, как правило, не превышает 5 %, только в отдельных случаях (Петриковский р-н) может достигать 6,8 %.

Анализ рисков производства сельскохозяйственной продукции с превышением допустимых уровней содержания радионуклидов в первой группе районов показал следующее. Из 29 районов, относящихся к этой группе, в 10 районах отсутствует риск превышения норматива по содержанию ^{137}Cs в зерне на пищевые цели озимых и яровых зерновых культур, в 19 районах существует слабая степень риска (не более 7 %). Возделывание гороха на пищевые цели в 24 районах имеет слабую степень риска, в 5 районах – среднюю степень (до 25 %). Во всех 29 районах отсутствуют риски производства картофеля и овощей с превышением допустимых уровней по содержанию ^{137}Cs . Только в 6 районах первой группы (Березинском, Воложинском, Житковичском, Могилевском, Новогрудском и Светлогорском) в кормопроизводстве имеется слабая степень риска (0,1–1,4 %) превышения содержания ^{137}Cs в фуражном зерне гороха и люпина, зеленой массе многолетних трав для использования при получении цельного молока, а также в фуражном зерне люпина – при использовании его для получения мяса. В остальных районах риски отсутствуют. В этой группе районов также отсутствуют риски производства товарной продукции растениеводства и кормов с превышением нормативов по содержанию ^{90}Sr .

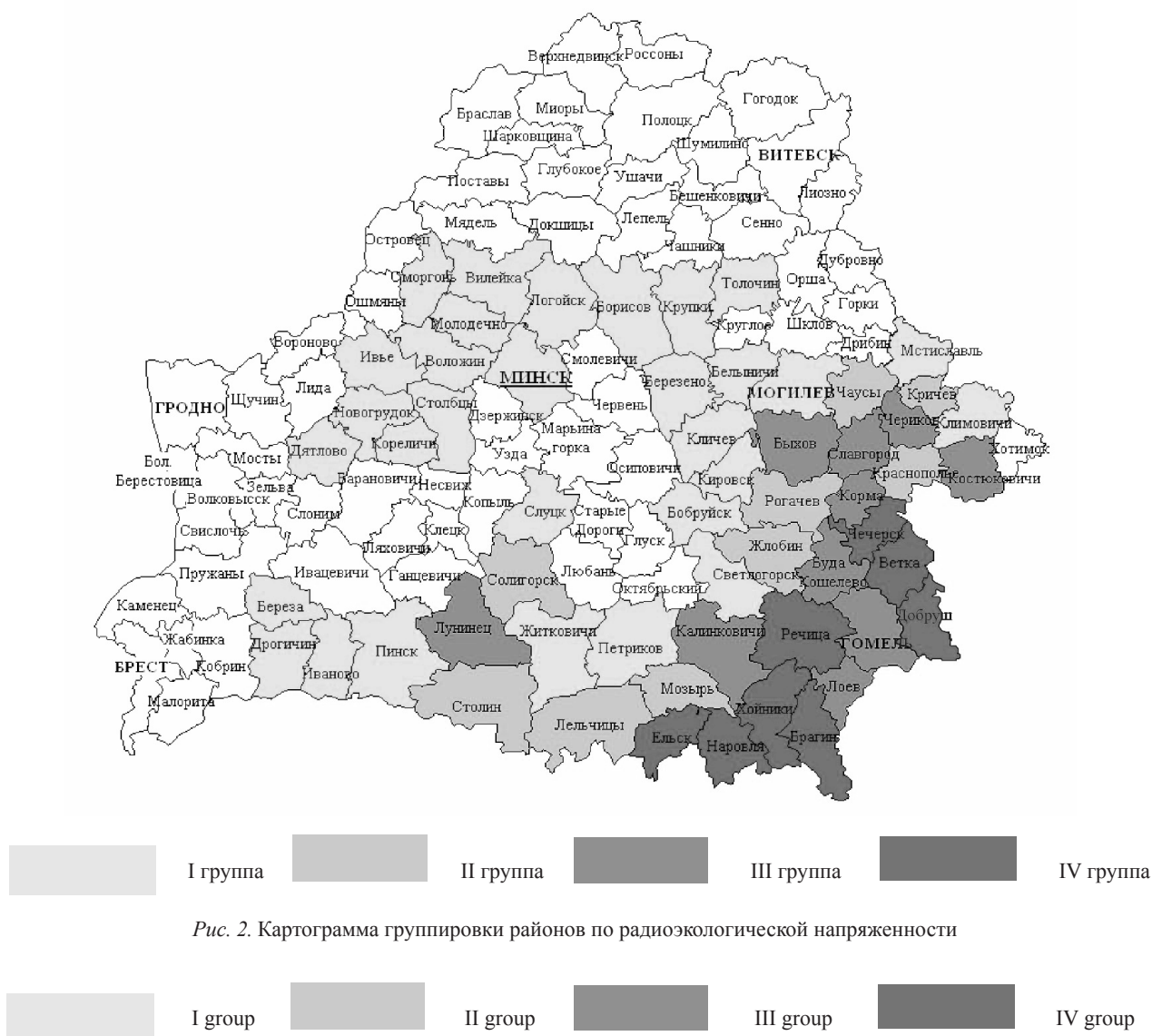


Рис. 2. Картограмма группировки районов по радиоэкологической напряженности

Fig. 2. The map of groupings of districts on radioecological tension

Во вторую группу (средняя степень радиоэкологической напряженности) входит 9 районов четырех областей – Брестской, Гомельской, Минской и Могилевской. Эта группа объединяет районы, в которых площади загрязненных ^{137}Cs земель колеблются от 11,9 до 100 %, в том числе имеются незначительные площади земель с плотностью загрязнения выше 5 Ки/км². Доля земель, загрязненных ^{90}Sr с плотностью 0,15–0,30 Ки/км², не превышает 10 % и отсутствуют с плотностью выше 0,30 Ки/км². Почвы, характеризующиеся повышенными параметрами поступления радионуклидов в растения, занимают 0,1–5,0 %. Только в таких районах, как Солигорский и Лельчицкий, их площади достигают 7–10 %.

В районах второй группы наблюдается слабый риск (0,1–6,3 %) превышения допустимого уровня содержания ^{137}Cs в зерне на пищевые цели озимых и яровых зерновых культур (озимая рожь, озимая пшеница, озимое тритикале, яровая пшеница, ячмень, овес), в 1-ом районе (Лельчицком) – средняя степень риска (1,1 %). В отношении возделывания проса и гороха на пищевые цели в 3-х районах (Лельчицком, Рогачевском и Чаусском) существует средняя степень риска. Высокие риски возделывания гороха пищевого (28,4–44,8 %) отмечаются в 4-х районах – Чаусском (44,8 %), Лельчицком (38,6 %), Мозырском (28,9 %) и Кричевском (28,4 %), в 1-ом районе (Рогачевском) наблюдается очень высокий риск – 59,8 %. При возделывании продовольственного картофеля и овощей только в 1-ом районе (Столинском) имеется слабый риск, в остальных районах они отсутствуют. Зерно фуражное озимых и яровых зерновых культур при использовании его для получения цельного молока и мяса (заклучительный откорм) можно производить без ограничений в 4-х районах (Жлобинском, Мозырском, Климовичском и Кричевском), в 5 районах (Лельчицком, Рогачевском, Солигорском, Столинском и Чаусском) имеются слабые риски (0,1–0,4 %). Возделывание гороха и люпина на зернофураж при использовании его для производства молока и мяса, многолетних трав при скармливании зеленой массы животным для производства молока цельного имеет слабый риск в 7 районах. В 6 районах этой группы (Жлобинском, Климовичском, Лельчицком, Мозырском, Рогачевском, Столинском) отмечается слабая степень риска производства со сверхнормативным содержанием ^{90}Sr пищевого зерна озимых и яровых зерновых, фуражного зерна люпина и зеленой массы многолетних трав при использовании этих кормов для получения цельного молока. По остальным группам продукции риски отсутствуют.

Третью группу с высокой степенью напряженности включают 12 районов, в том числе 1 район Брестской области, 6 районов – Гомельской обл. и 5 районов Могилевской области. В этих районах площади загрязненных ^{137}Cs земель колеблются от 19 до 100 %, в том числе с плотностью загрязнения выше 5 Ки/км² могут достигать 11 %. Доля земель, загрязненных ^{90}Sr , изменяется от 1,0 до 31,0 %, в том числе с плотностью загрязнения выше 0,30 Ки/км² может достигать 10 %. В отдельных районах (Лунинецкий, Быховский) радиологическая ситуация усугубляется значительным (11–18 %) удельным весом в структуре землепользования почв с повышенными параметрами поступления радионуклидов в растениеводческую продукцию.

В 11 районах данной группы существуют высокие и очень высокие риски производства пищевого зерна гороха с превышением норматива по содержанию ^{137}Cs , а также в 3-х районах фуражного зерна гороха и люпина при использовании его для получения цельного молока и мяса. В 4-х районах этой группы (Гомельском, Добрушском, Калинковичском и Лоевском) наблюдаются высокие риски производства пищевого зерна озимых и яровых зерновых культур, гороха с превышением норматива по содержанию ^{90}Sr , а также фуражного зерна люпина и многолетних трав при использовании этих кормов для получения цельного молока.

В четвертую группу с очень высокой степенью радиоэкологической напряженности входит 7 наиболее загрязненных районов Гомельской обл. В этой группе практически весь земельный фонд подвержен загрязнению ^{137}Cs и ^{90}Sr . В этих районах сконцентрировано 44 % всех земель, загрязненных ^{137}Cs выше 5 Ки/км², и 79 % земель, загрязненных ^{90}Sr выше 0,30 Ки/км². В ряде районов (Ельском, Брагинском, Хойникском) радиологическая ситуация обостряется значительной долей (17–24 %) торфяно-болотных, аллювиальных (пойменных) и деградированных торфяно-минеральных почв.

В 6 из 7 районов этой группы наблюдается средняя степень риска производства пищевого зерна зерновых культур с превышением норматива по содержанию ^{137}Cs , а в 6 районах очень высокая степень риска производства гороха на пищевые цели. В 3-х районах имеется слабая степень и в 2-х средняя степень риска производства картофеля и овощей. Наибольшие риски в этой группе районов существуют в отношении ^{90}Sr . В 5 районах очень высокая вероятность получения со сверхнормативным содержанием ^{90}Sr пищевого зерна зерновых культур и гороха, фуражного зерна люпина, многолетних трав при использовании их для получения молока.

Оценочные данные рисков производства продукции с превышением допустимых уровней по содержанию радионуклидов согласуются с фактическими данными производства продукции с превышением содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в разрезе административных районов.

Оценка дозовых нагрузок на население по группам районов

Интегральным показателем оценки воздействия радиационного фактора на человека является дозовая нагрузка, формируемая внутренним и внешним облучением в результате загрязнения продукции и компонентов экосистем (прежде всего почв). В соответствии с законодательством Беларуси, жизнедеятельность на территории радиоактивного загрязнения не требует каких-либо ограничений, если средняя годовая эффективная доза облучения населения (СГЭД) не превышает 1 мЗв над уровнем естественного и техногенного радиационного фона. При превышении СГЭД 1 мЗв над уровнем естественного и техногенного радиационного фона проводятся защитные мероприятия [5]. Согласно КATALOGу 2015 г., средняя годовая эффективная доза облучения населения равна или превышает 1 мЗв в 82 населенных пунктах, что составляет 3,4 % от общего количества населенных пунктов, расположенных в зонах радиоактивного загрязнения. В этих населенных пунктах проживает 23,4 тыс. чел. или 2 % населения, проживающего на территории радиоактивного загрязнения [6].

В результате корреляционно-регрессионного анализа установлено, что между показателями комплексной почвенно-радиологической оценки районов, с одной стороны, и СГЭД в разрезе районов существует тесная взаимосвязь. Коэффициент корреляции составил 0,77 (рис. 3). Также высокая корреляция ($r = 0,70$) показателей суммарной оценки районов установлена с коллективными дозами облучения населения в разрезе районов (рис. 4).

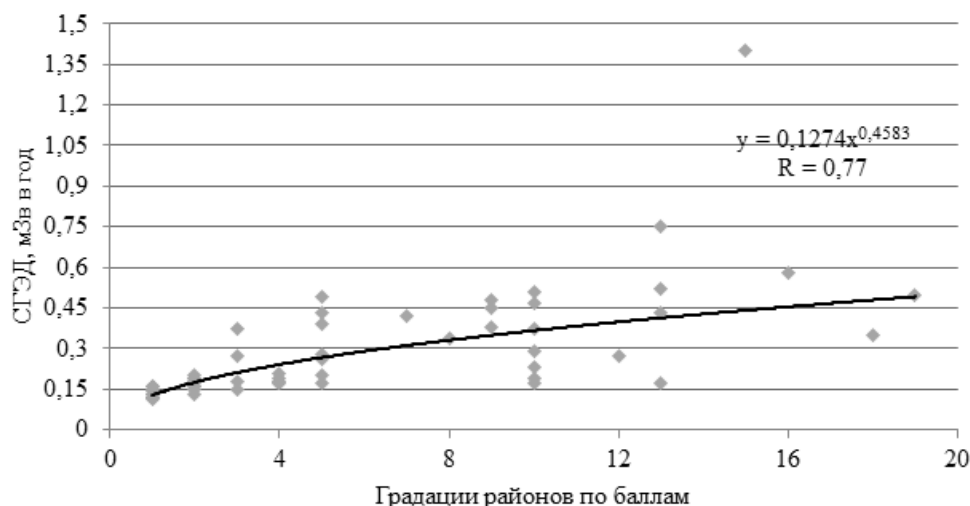


Рис. 3. Взаимосвязь показателей суммарной балльной оценки районов и средних годовых эффективных доз облучения населения по районам

Fig. 3. Interrelation of indicators of the total score estimation of areas and average annual effective doses of irradiation of the population on areas

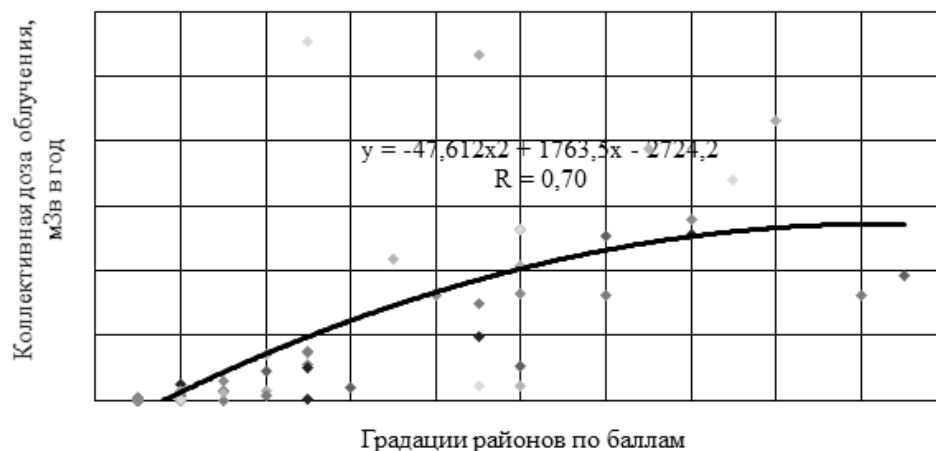


Рис. 4. Взаимосвязь показателей суммарной балльной оценки районов и коллективных доз облучения населения по районам

Fig. 4. Correlation between the total scores of the areas and collective doses of irradiation of the population in areas

Анализ данных перечня населенных пунктов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, показал, что в первой группе районов отсутствуют населенные пункты, в которых СГЭД равна или превышает законодательно установленный предел (рис. 5). В этой группе районов средние годовые эффективные дозы облучения населения колеблются от 0,10 до 0,37 мЗв, составляя в среднем 0,17 мЗв, то есть они не превышают 37 % законодательно установленного дозового предела 1 мЗв.

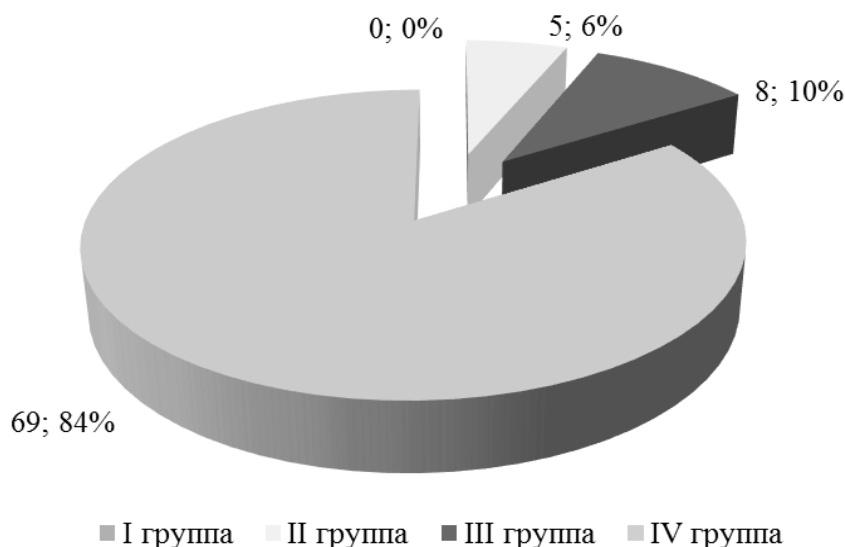


Рис. 5. Данные по количеству населенных пунктов, в которых СГЭД равна или превышает 1 мЗв по выделенным группам районов

Fig. 5. Data on the number of localities in which the average annual effective dose equal to or greater than 1 mSv for selected groups of areas

Во второй и третьей группах районов находится соответственно 5 и 8 населенных пунктов, в которых СГЭД равна или превышает законодательно установленный предел (1 мЗв), что составляет 6 и 10 % от общего их количества (82). Во второй и третьей группах районов СГЭД в среднем составляют соответственно 0,33 и 0,35 мЗв с колебаниями от 0,17 до 0,51 мЗв.

Из 82 населенных пунктов, в которых СГЭД равна или превышает законодательно установленный предел (1 мЗв), 69 населенных пунктов (84 % от их общего количества) расположены в районах четвертой группы. В этой группе районов значения СГЭД варьируют от 0,17 до 1,40 мЗв при среднем значении по группе районов 0,59 мЗв. В 4-х районах (Ветковском, Ельском, Чечерском, Хойникском) четвертой группы этот показатель также колеблется в пределах 0,50–0,75 мЗв и в 1-м районе (Наровлянском) он превышает 1,0 мЗв.

Заключение

Установлены тесные взаимосвязи показателей комплексной оценки районов и рисков производства с превышением допустимых уровней содержания ^{137}Cs в зерне на пищевые цели зерновых культур, проса и гороха с коэффициентами корреляции (r) 0,72–0,87. Заметная взаимосвязь ($r = 0,60$) установлена между показателями комплексной оценки районов и рисками производства с превышением допустимых уровней по содержанию ^{137}Cs картофеля и овощей. Даже в районах с высокими оценочными баллами (12–16) риск получения продукции этих культур с превышением допустимых уровней невелик – 4–6 %. Выявлены тесные взаимосвязи показателей балльной оценки районов и рисков производства с превышением допустимых уровней содержания ^{90}Sr в пищевом зерне, картофеле и овощах (свекла, морковь, капуста), фуражном зерне зерновых культур, гороха и люпина, корнеплодов и зеленой массе многолетних бобово-злаковых трав.

Между показателями комплексной почвенно-радиологической оценки районов, с одной стороны, СГЭД и коллективными дозами облучения населения в разрезе районов существуют тесные взаимосвязи с коэффициентами корреляции 0,77 и 0,70. Из 82 населенных пунктов, в которых СГЭД равна или превышает законодательно установленный предел (1 мЗв), 69 населенных пунктов (84 % от их общего количества) расположены в районах четвертой группы.

Библиографические ссылки

1. Смеян Н. И. Классификация, диагностика и систематический список почв Беларуси. Минск, 2007. –220 с.
2. Рекомендации международной комиссии по радиологической защите // Публикация 60. М., 1994. Ч. 2.
3. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. Международное агентство по атомной энергии. Вена, 2008.
4. Методология оценки риска воздействия техногенных факторов различной природы на агросистемы. Обнинск, 2007.
5. Закон Республики Беларусь от 5 января 1998 г. № 122-З «О радиационной безопасности населения» // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь, 2008 г. № 266. 2/1537.
6. Цыбулько Н. Н. Научно-методологическое обоснование и реализация мер радиационной защиты населения после катастрофы на Чернобыльской АЭС // Эколог. вестн. 2015. № 2 (32). С. 111–120.

References

1. Smeyan N. I. Klassifikatsiya, diagnostika i sistematiicheskiy spisok pochv Belarusi. Minsk, 2007 (in Russ.).
2. Rekomendatsii mezhdunarodnoy komissii po radiologicheskoy zashchite. *Publikatsiya 60*. Moscow, 1994. Ch. 2 (in Russ.).
3. Glossariy MAGATE po voprosam bezopasnosti. Terminologiya, ispolzuyemaya v oblasti yadernoy bezopasnosti i radiatsionnoy zashchity. Mezhdunarodnoye agentstvo po atomnoy energii. Vena, 2008 (in Russ.).
4. Metodologiya otsenki riska vozddeystviya tekhnogennykh faktorov razlichnoy prirody na agrosistemy. Obninsk, 2007 (in Russ.).
5. Zakon Respubliki Belarus ot 5 yanvarya 1998 g. No. 122-Z «O radiatsionnoy bezopasnosti naseleniya». *Natsionalnyy reyestr pravovyykh aktov Respubliki Belarus*. 2008. No. 266. 2/1537 (in Russ.).
6. Tsybulka N. N. Nauchno-metodologicheskoye obosnovaniye i realizatsiya mer radiatsionnoy zashchity naseleniya posle katastrofy na Chernobylskoy AES. *Ekolog. vestn.* 2015. No. 2 (32). P. 111–120 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 10.05.2018
Received by editorial board 10.05.2018

УДК 577.25:612.111.7:618.3-06

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ДИАДЕНОЗИН ТЕТРАФОСФАТА НА ТРОМБИН-ИНДУЦИРОВАННУЮ АГРЕГАЦИЮ ТРОМБОЦИТОВ БЕРЕМЕННЫХ ЖЕНЩИН С ПРЕЭКЛАМПСИЕЙ

А. В. БАКУНОВИЧ¹⁾, О. Д. БИЧАН²⁾, Л. М. ЛОБАНОК³⁾, К. Я. БУЛАНОВА¹⁾

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

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Беларусь

³⁾Белорусский государственный медицинский университет, пр. Держинского, 83, 220116, Минск, Беларусь

Образец цитирования:

Бакунович А. В., Бичан О. Д., Лобанок Л. М., Буланова К. Я. Особенности влияния диаденозин тетрафосфата на тромбин-индуцированную агрегацию тромбоцитов беременных женщин с преэклампсией // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 71–78.

For citation:

Bakunovich A. V., Bichan O. D., Lobanok L. M., Bulanova K. Ya. Features of diadenosine tetraphosphate influence on thrombin-induced platelet aggregation of pregnant women with pre-eclampsia. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 71–78 (in Russ.).

Авторы:

Андрей Валерьевич Бакунович – старший преподаватель кафедры экологической химии и биохимии.

Ольга Дмитриевна Бичан – заведующий лабораторией кафедры биофизики физического факультета.

Леонид Михайлович Лобанок – доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси; профессор кафедры нормальной физиологии.

Клавдия Яковлевна Буланова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры экологической химии и биохимии.

Authors:

Andrei V. Bakunovich, senior lecturer of the department of ecological chemistry and biochemistry, faculty of environmental medicine.

andy.bakunovich@gmail.com

Olga D. Bichan, head of the laboratory of the department of biophysics, faculty of physics.

bichan@bsu.by

Leonid M. Lobanok, doctor of sciences (medical), corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, full professor; professor at the department of normal physiology.

andy.bakunovich@gmail.com

Klavdiya Ya. Bulanova, PhD (biology), associate professor; associate professor of the department of ecological chemistry and biochemistry, faculty of environmental medicine.

bichan@bsu.by

У беременных женщин с преэклампсией установлено достоверное повышение степени агрегации тромбоцитов в ответ на действие тромбина, по сравнению с физиологически протекающей беременностью. В экспериментах *in vitro* выявлено, что диаденозин-5',5'''-P¹,P⁴-тетрафосфат (Ap₄A) снижает степень и скорость агрегации тромбоцитов, индуцированной тромбином у беременных женщин с преэклампсией. Ap₄A может быть рекомендован в качестве субстрата для разработки лекарственных препаратов, нацеленных на снижение повышенной функциональной активности тромбоцитов при преэклампсии.

Ключевые слова: преэклампсия, тромбоциты, агрегация, тромбин, диаденозин тетрафосфат.

FEATURES OF DIADENOSINE TETRAPHOSPHATE INFLUENCE ON THROMBIN-INDUCED PLATELET AGGREGATION OF PREGNANT WOMEN WITH PRE-ECLAMPSIA

A. V. BAKUNOVICH^a, O. D. BICHAN^b, L. M. LOBANOK^c, K. YA. BULANOVA^a

^aBelarusian State University, International Sakharov Environmental Institute,
Dolgobrodskaya street, 23/1, 220070, Minsk, Belarus

^bBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus

^cBelarusian State Medical University, Dzerzhinski avenue, 83, 220116, Minsk, Belarus

Corresponding author: A. V. Bakunovich (andy.bakunovich@gmail.com)

Pregnant women with pre-eclampsia have a significant increase in the degree of platelet aggregation in response to thrombin, in comparison with a physiologically occurring pregnancy. In vitro experiments revealed that diadenosine-5',5'''-P¹,P⁴-tetraphosphate (Ap₄A) reduces the degree and rate of thrombin-induced platelet aggregation in pregnant women with preeclampsia. Ap₄A can be recommended as a substrate for the development of drugs aimed at reducing the increased functional activity of platelets in pre-eclampsia.

Key words: pre-eclampsia, platelets, aggregation, thrombin, diadenosine tetraphosphate.

Введение

Преэклампсия – это мультисистемное осложнение беременности, характеризующееся развитием гипертензии после 20-й недели беременности у ранее нормотензивной женщины с наличием протеинурии или, в ее отсутствие, признаков или симптомов, указывающих на повреждение органов-мишеней [1], включая печень, почки, сердце, легкие, мозг и поджелудочную железу. Данное осложнение может привести к ограничению внутриутробного роста, преждевременному нарушению плаценты или, в большинстве серьезных ситуаций, прекращению беременности и смерти плода [2]. Преэклампсия и ее осложнение – эклампсия считаются основными причинами материнской и перинатальной заболеваемости и смертности [3]. Этими заболеваниями сопровождаются от 3 до 5 % всех беременностей, составляя более 60 тыс. материнских и 500 тыс. смертей плода в год во всем мире [4], а риск его возникновения наиболее велик при активации процессов, вызванных стрессами (психогенными, бытовыми, техногенными и ионизирующим излучением).

Ведущим звеном патогенеза преэклампсии является тромбоцитарно-эндотелиальная дисфункция в результате нарушения адаптационных механизмов системы гемостаза. Нарушения тромбоцитарного звена системы гемостаза усиливаются по мере увеличения степени тяжести изучаемой патологии, приводят к усилению тромбообразования и развитию патологических изменений кровообращения, что чревато обратным эффектом – тромбоцитарной недостаточности. Следовательно, важная роль в патогенезе преэклампсии принадлежит нарушениям функциональной активности тромбоцитов, а исследование механизмов повышенной агрегационной способности тромбоцитов и их коррекции является необходимым этапом для решения проблем лечения и профилактики преэклампсии.

Стандартным способом лечения тромботических осложнений является применение ингибитора активации тромбоцитов посредством синтеза тромбосана A2 (аспирин) и ингибитора P2Y₁₂ пуринорецептора аденозиндифосфата (клопидогрел). Однако рецидивирующие тромботические события могут продолжаться, несмотря на использование стандартных схем двойного антитромбоцитарного лечения [5]. Это объясняется существованием множества путей, способствующих процессам активации и агрегации тромбоцитов. Аспирин и клопидогрел не ингибируют пути, отличные от тех, которые стимулируются тромбосаном A2 и АДФ, оставляя другие (например, опосредованные тромбином) открытыми.

Кроме того, в ряде исследований показано [6; 7], что значительное число пациентов могут иметь неадекватное реагирование на терапию этими препаратами.

Ограничения текущих способов терапии повышенной агрегационной способности тромбоцитов подчеркивают необходимость в выявлении новых способов, направленных на обеспечение регуляции процесса агрегации тромбоцитов.

Материалы и методы исследования

Объекты исследования. Кровь беременных женщин с физиологически протекающей беременностью, составивших контрольную группу (22 пациентки), и беременных с установленным диагнозом преэклампсии (17 пациенток). От пациентов было взято письменное согласие на забор биологического материала, а также разъяснены цели исследования. Забор крови у пациенток проводили в клинических условиях при обязательном контроле отсутствия в течение месяца приема препаратов, влияющих на агрегацию тромбоцитов. Кровь стабилизировали 3,8 % раствором цитрата натрия (9:1 по объему).

Исследование агрегации тромбоцитов. Кинетику агрегации тромбоцитов регистрировали путем измерения светопропускания с применением анализатора агрегации AP2110 (ЗАО «СОЛАР»). Обогащенную тромбоцитами плазму (ОПТ) и отмывые тромбоциты выделяли при комнатной температуре. ОПТ получали центрифугированием крови при 200 g в течение 10 мин. ОПТ центрифугировали при 600 g в течение 3 мин для полного осаждения тромбоцитов. Бестромбоцитарную плазму удаляли, а к осадку тромбоцитов добавляли Трис-буфер, содержащий ЭДТА (120 ммоль/л NaCl, 15,4 ммоль/л KCl, 1,5 ммоль/л ЭДТА, 6 ммоль/л D-глюкозы, 13,3 ммоль/л Трис-HCl, pH 6,5). Для исследования агрегации отмывых от плазмы тромбоцитов в кювету агрегометра вносили 450 мкл ФСБ с Ca^{2+} и 50 мкл исходной суспензии тромбоцитов в Трис-буфере (конечная концентрация $2,5 \times 10^8$ кл/мл), инкубировали при 37 °C и перемешивании в течение 3-х или более минут (в отсутствие и присутствии Ar_4A), а затем добавляли тромбин. В качестве дезагреганта использовали Ar_4A в концентрациях от 100 до 500 мкмоль/л.

Обработка данных. Характер распределения данных анализировали с применением критерия Шапиро–Уилка. Поскольку распределение экспериментальных данных подчинялось закону нормального распределения, достоверность различий между средними значениями изучаемых параметров оценивалась по t-критерию Стьюдента. Различия рассматривались как статистически достоверные при уровне значимости $P < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Для изучения агрегационной способности тромбоцитов у беременных с физиологически протекающей беременностью и беременных женщин с преэклампсией использовали тромбин как наиболее мощный активатор тромбоцитов [8]. Взаимодействие тромбина с тромбоцитом происходит посредством необратимого связывания с мембранными протеазо-активируемыми рецепторами (PAR), скрепленных с G-белками (G_q , $G_{12/13}$, G_i) [9]. Так, воздействие на G_q -белок активирует фосфолипазу $\text{C}\beta$ и приводит к образованию инозитол-1,4,5-трифосфата (IP_3), который, в свою очередь, за счет связывания с IP_3 рецептором (IP_3R), инициирует изменение формы и агрегацию тромбоцитов за счет мобилизации внутриклеточных запасов ионов кальция. Передача сигналов на $G_{12/13}$ -белок активирует Rho-киназы, участвующие в секреции гранул [10], а воздействие на G_i -белок, приводит к ингибированию аденилатциклазы и, тем самым, снижению уровня цАМФ в тромбоцитах.

На поверхности тромбоцитов человека присутствуют 2 типа PAR рецепторов: PAR-1 и PAR-4 [11]. PAR-1 опосредует активацию тромбоцитов человека при низких концентрациях тромбина, в то время как PAR-4 способствует тромбин-индуцированной активации тромбоцитов только при его высоких концентрациях [11]. PAR-1 способствует резкому увеличению концентрации внутриклеточного кальция, и очень быстро десенсибилизируется при больших концентрациях тромбина, в то время как PAR-4 характеризуется более продолжительным ответом, а также может поддерживать этот эффект при больших концентрациях тромбина [12].

В эксперименте установлено, что при действии тромбина (0,05 мг/мл), степень агрегации у беременных женщин с преэклампсией ($88,4 \pm 7,3$) % была выше степени агрегации у женщин с физиологической беременностью ($74,3 \pm 5,8$) % (рис. 1), указывая на повышенную реактивность тромбоцитов беременных с преэклампсией.

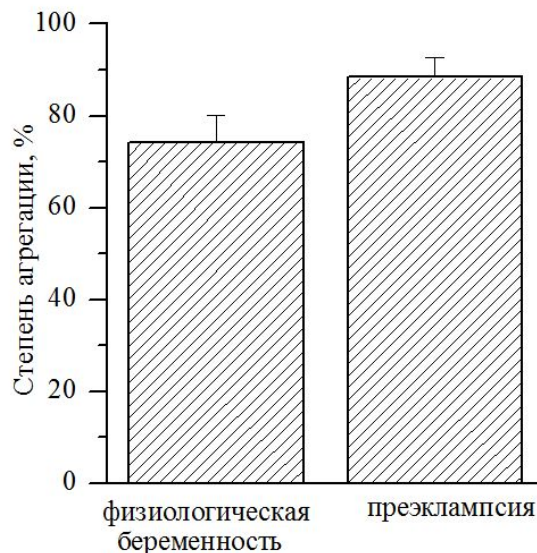


Рис. 1. Степень тромбин-индуцированной агрегации тромбоцитов у беременных женщин с физиологически протекающей беременностью и беременных женщин с преэклампсией

Fig. 1. The degree of thrombin-induced platelet aggregation in pregnant women with a physiologically occurring pregnancy and pregnant women with pre-eclampsia

Важным обстоятельством для выбора сдвига процесса в сторону повышения или снижения степени активности тромбоцитов является состояние баланса между количеством агрегантов и дезагрегантов снаружи и внутри тромбоцитов. Так, при физиологической беременности в цитоплазме тромбоцитов четко выражены плотные гранулы, в состав которых входят не только АДФ, усиливающий агрегацию, но АТФ и диаденозин-5',5'''-P¹,P⁴-тетрафосфат (Ar₄A), способствующие их дезагрегации.

Ar₄A и другие диаденозин полифосфаты (Ar_nA) представляют собой природные соединения, широко распространенные в клетках и тканях млекопитающих, в том числе и тромбоцитах человека [13]. Ar₄A, как и другие Ar_nA, способен модулировать активность мембраносвязанных белков и ферментов, особенно тех, которые участвуют в обмене пуриновых и пиримидиновых нуклеотидов. Кроме того, Ar_nA стимулируют различные реакции в сердечно-сосудистой системе, а их метаболиты могут служить потенциальными источниками внеклеточного АТФ и других пуринов [14].

В тромбоцитах беременных с преэклампсией отмечается значительное снижение числа плотных гранул [15], что приводит к уменьшению количества выбрасываемых в кровь дезагрегантов на фоне преобладающего количества токсинов, являющихся стимуляторами агрегации. Активация растворимых компонентов коагуляционного каскада при преэклампсии приводит к чрезмерной генерации тромбина [16], стимулирующего агрегацию. Кроме того, плаценты женщин с преэклампсией продуцируют больше тромбоксана А₂, чем простагличина, что также может вызывать вазоконстрикцию и агрегацию тромбоцитов [2].

Можно полагать, что восполнение дефицита Ar₄A в крови беременных с преэклампсией будет способствовать восстановлению нарушенного функционального состояния тромбоцитов.

На рис. 2 представлены типичные кинетические кривые тромбин-индуцированной агрегации тромбоцитов в группе контроля в присутствии и отсутствие различных концентраций Ar₄A. В концентрации 0,05 мг/мл тромбин индуцировал необратимую агрегацию тромбоцитов. Для данных экспериментов использовали Ar₄A в диапазоне концентраций от 100 до 500 мкмоль/л. Степень ингибирования тромбин-индуцированной агрегации тромбоцитов зависела от концентрации Ar₄A.

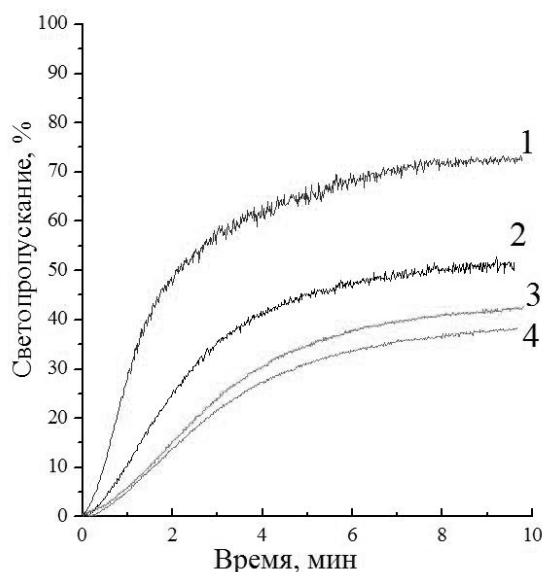


Рис. 2. Кинетические кривые агрегации тромбоцитов, индуцированной тромбином в присутствии и отсутствии Ap_4A . Концентрация тромбина – 0,05 мг/мл: 1 – контроль, 2 – 100 мкмоль/л Ap_4A , 3 – 250 мкмоль/л Ap_4A , 4 – 500 мкмоль/л Ap_4A

Fig. 2. Kinetic curves of thrombin-induced platelet aggregation in the presence and absence of Ap_4A . Thrombin concentration – 0,05 mg/ml: 1 – control, 2 – 100 $\mu\text{mol/l}$ of Ap_4A , 3 – 250 $\mu\text{mol/l}$ of Ap_4A , 4 – 500 $\mu\text{mol/l}$ of Ap_4A

Из рис. 2 следует, что в присутствии Ap_4A происходило ингибирование агрегации тромбоцитов, проявляющееся в снижении степени и скорости агрегации клеток. Наибольший ингибирующий эффект наблюдался в присутствии Ap_4A в концентрации 500 мкмоль/л (рис. 3).

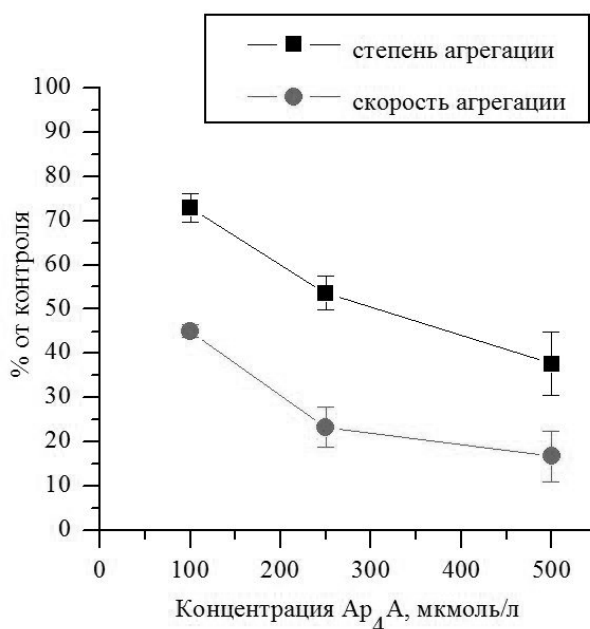


Рис. 3. Зависимость степени и скорости тромбин-индуцированной агрегации от концентрации Ap_4A

Fig. 3. Dependence of the degree and rate of thrombin-induced aggregation on the concentration of Ap_4A

При исследовании дезагрегационной способности Ap_4A при тромбин-индуцированной агрегации тромбоцитов беременных женщин с преэклампсией использовали тромбин в концентрации 0,05 мг/мл, приводящий к необратимой агрегации тромбоцитов и Ap_4A в концентрации 500 мкмоль/л, проявляющий наибольший ингибирующий эффект в контрольной группе.

Таблица

Влияние Ar_4A на параметры тромбин-индуцированной агрегации тромбоцитов беременных женщин с физиологической беременностью и беременных с преэклампсией

Table

Effect of Ar_4A on the thrombin-induced platelet aggregation parameters of pregnant women with physiological pregnancy and pregnant women with preeclampsia

Концентрация внесенных реагентов	Физиологическая беременность		Преэклампсия	
	степень агрегации	скорость агрегации	степень агрегации	скорость агрегации
Тромбин (0,05 мг/мл) + Ar_4A (500 мкМ)	51,8±10,2	34,9±9,4	39,7±8,3	23,5±7,5

Из таблицы следует, что эффект Ar_4A проявляется по-разному для тромбоцитов женщин с физиологической беременностью и беременных с преэклампсией. Так, ингибирование степени агрегации составило (51,8±10,2) % для тромбоцитов женщин с физиологически протекающей беременностью и (39,7±8,3) % для тромбоцитов беременных женщин с преэклампсией. Ингибирование скорости агрегации у женщин с физиологической беременностью и беременных с преэклампсией составило (34,9±9,4) и (23,5±7,5) % соответственно.

Ингибирующий эффект Ar_4A при тромбин-индуцированной агрегации, вероятно, связан с его воздействием на $P2Y_{12}$ рецепторы тромбоцитов. Так, ингибирование $P2Y_{12}$ рецептора приводит к активации аденилатциклазы и увеличению уровня цАМФ в клетке. Антагонистические эффекты цАМФ и цГМФ опосредованы через цАМФ- и цГМФ-зависимые протеинкиназы (РКА и РKG), которые фосфорилируют субстратный белок IP_3R , ингибируя мобилизацию кальция [17]. Кроме того, Ar_4A снижает стабилизацию тромбоцитарных агрегатов и их чувствительность к другим индукторам агрегации, в том числе тромбосану A2, тромбину и коллагену посредством $P2Y_{12}$, воздействуя на активность гликопротеина $IIb-IIIa$ и интегрин $\alpha IIb\beta_3$, имеющих важное значение для полной активации тромбоцитов [18].

В дополнение к этому известно, что Ar_4A является ингибитором $P2Y_1$ рецептора, приводящего к стабилизации внутриклеточной концентрации Ca^{2+} , блокируя мобилизацию этих ионов из внутриклеточных депо посредством Rho-киназ, связанных с $G_{12/13}$ белками, тем самым снижая вероятность агрегации.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что Ar_4A способен эффективно снижать повышенную агрегационную активность тромбоцитов беременных женщин с преэклампсией. Потенциальное преимущество Ar_4A и его производных в качестве терапевтических антиагрегантных агентов заключается в том, что, в отличие от клопидогрела, аспирина, ворапаксара (антагонист $PAR-1$ [19]) или другого антагониста, механизм действия которых направлен всего на один рецептор, они оказывают синергическое ингибирующее действие сразу на несколько путей активации тромбоцитов ($P2Y_{12}$ и $P2Y_1$ рецепторы), тем самым усиливая возможности терапии и снижая количество препаратов, которые необходимо принимать пациенту.

Заключение

У беременных женщин с преэклампсией установлено достоверное повышение степени агрегации в ответ на действие тромбина, по сравнению с физиологически протекающей беременностью. Увеличение степени агрегации, возможно, связано с нарушением баланса выделяемых в ходе реакции высвобождения биологически активных веществ, регулирующих агрегацию тромбоцитов (АТФ, Ar_4A , Ca^{2+} и др.).

В результате исследования влияния Ar_4A на функциональные свойства тромбоцитов выявлено, что данный динуклеотид обладает способностью снижать тромбин-индуцированную агрегацию тромбоцитов.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об эффективности Ar_4A в качестве соединения, способного регулировать функциональные свойства клеток крови. Оно может быть использовано для разработки доступных лекарственных препаратов на основе Ar_4A при регуляции функциональной активности тромбоцитов при преэклампсии.

Библиографические ссылки

1. Moussa H. N., Arian S. E., Sibai B. M. Management of hypertensive disorders in pregnancy // Womens Health (Lond). 2014. Vol. 10, № 4. P. 385–404. DOI: 10.2217/whe.14.32.

2. Chaiworapongsa T., Chaemsaitong P., Yeo L., et al. Pre-eclampsia part 1: current understanding of its pathophysiology // *Nat. Rev. Nephrol.* 2014. Vol. 10, № 8. P. 466–480. DOI: 10.1038/nrneph.2014.102.
3. Lindheimer M. D., Taler S. J., Cunningham F. G. Hypertension in pregnancy // *J. Am. Soc. Hypertens.* 2010. Vol. 4, № 2. P. 68–78. DOI: 10.1016/j.jash.2010.03.002.
4. Kuklina E. V., Ayala C., Callaghan W. M. Hypertensive disorders and severe obstetric morbidity in the United States // *Obstet. Gynecol.* 2009. Vol. 113, № 6. P. 1299–1306. DOI: 10.1097/AOG.0b013e3181a45b25.
5. Tello-Montoliu A., Tomasello S. D., Ueno M., et al. Antiplatelet therapy: thrombin receptor antagonists // *Br. J. Clin. Pharmacol.* 2011. Vol. 72, № 4. P. 658–671. DOI: 10.1111/j.1365-2125.2010.03884.x.
6. Krasopoulos G., Brister S. J., Beattie W. S., et al. Aspirin «resistance» and risk of cardiovascular morbidity: systematic review and meta-analysis // *BMJ.* 2008. Vol. 336, № 7637. P. 195–198. DOI: 10.1136/bmj.39430.529549.BE.
7. Angiolillo D. J., Fernandez-Ortiz A., Bernardo E., et al. Variability in individual responsiveness to clopidogrel: clinical implications, management, and future perspectives // *J. Am. Coll. Cardiol.* 2007. Vol. 49, № 14. P. 1505–1516. DOI: 10.1016/j.jacc.2006.11.044.
8. Brummel K. E., Paradis S. G., Butenas S., et al. Thrombin functions during tissue factor-induced blood coagulation // *Blood.* 2002. Vol. 100, № 1. P. 148–152. DOI: 10.1182/blood.V100.1.148.
9. Шатурный В. И., Шахиджанов С. С., Свешикова А. Н. и др. Активаторы, рецепторы и пути внутриклеточной сигнализации в тромбоцитах крови // *Биомедицинская химия.* 2014. Т. 60, № 2. С. 182–200. DOI: 10.18097/PBMC20146002182.
10. Stalker T. J., Newman D. K., Ma P., et al. Platelet Signaling // *Handb. Exp. Pharmacol.* 2012. № 210. P. 59–85. DOI: 10.1007/978-3-642-29423-5_3.
11. Kahn M. L., Zheng Y. W., Huang W., et al. A dual thrombin receptor system for platelet activation // *Nature.* 1998. Vol. 394, № 6694. P. 690–694. DOI: 10.1038/29325.
12. De Candia E. Mechanisms of platelet activation by thrombin: A short history // *Thromb. Res.* 2012. Vol. 129, № 3. P. 250–256. DOI: 10.1016/j.thromres.2011.11.001.
13. McLennan A. G. Dinucleoside polyphosphates-friend or foe? // *Pharmacol. Ther.* 2000. Vol. 87, № 2–3. P. 73–89. DOI: 10.1016/S0163-7258(00)00041-3.
14. Jankowski V., van der Giet M., Mischak H., et al. Dinucleoside polyphosphates: strong endogenous agonists of the purinergic system // *Br. J. Pharmacol.* 2009. Vol. 157, № 7. P. 1142–1153. DOI: 10.1111/j.1476-5381.2009.00337.x.
15. Hayashi M., Kiumi F., Mitsuya K. Changes in platelet ATP secretion and aggregation during pregnancy and in preeclampsia // *Am. J. Med. Sci.* 1999. Vol. 318, № 2. P. 115–121.
16. Chaiworapongsa T., Yoshimatsu J., Espinoza J., et al. Evidence of in vivo generation of thrombin in patients with small-for-gestational-age fetuses and pre-eclampsia // *J. Matern Fetal Neonatal Med.* 2002. Vol. 11, № 6. P. 362–367. DOI: 10.1080/jmf.11.6.362.367.
17. Schwarz U. R., Walter U., Eigenthaler M. Taming platelets with cyclic nucleotides // *Biochem. Pharmacol.* 2001. Vol. 62, № 9. P. 1153–1161. DOI: 10.1016/S0006-2952(01)00760-2.
18. Remijn J. A., Wu Y. P., Jenning E. H., et al. Role of ADP Receptor P2Y₁₂ in Platelet Adhesion and Thrombus Formation in Flowing Blood // *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 2002. Vol. 22, № 4. P. 686–691. DOI: 10.1161/01.ATV.0000012805.49079.23.
19. Gryka R. J., Buckley L. F., Anderson S. M. Vorapaxar: The Current Role and Future Directions of a Novel Protease-Activated Receptor Antagonist for Risk Reduction in Atherosclerotic Disease // *Drugs in R&D.* 2017. Vol. 17, № 1. P. 65–72. DOI: 10.1007/s40268-016-0158-4.

References

1. Moussa H. N., Arian S. E., Sibai B. M. Management of hypertensive disorders in pregnancy. *Womens Health (Lond).* 2014. Vol. 10, No. 4. P. 385–404. DOI: 10.2217/whe.14.32.
2. Chaiworapongsa T., Chaemsaitong P., Yeo L., et al. Pre-eclampsia part 1: current understanding of its pathophysiology. *Nat. Rev. Nephrol.* 2014. Vol. 10, No. 8. P. 466–480. DOI: 10.1038/nrneph.2014.102.
3. Lindheimer M. D., Taler S. J., Cunningham F. G. Hypertension in pregnancy. *J. Am. Soc. Hypertens.* 2010. Vol. 4, No. 2. P. 68–78. DOI: 10.1016/j.jash.2010.03.002.
4. Kuklina E. V., Ayala C., Callaghan W. M. Hypertensive disorders and severe obstetric morbidity in the United States. *Obstet. Gynecol.* 2009. Vol. 113, No. 6. P. 1299–1306. DOI: 10.1097/AOG.0b013e3181a45b25.
5. Tello-Montoliu A., Tomasello S. D., Ueno M., et al. Antiplatelet therapy: thrombin receptor antagonists. *Br. J. Clin. Pharmacol.* 2011. Vol. 72, No. 4. P. 658–671. DOI: 10.1111/j.1365-2125.2010.03884.x.
6. Krasopoulos G., Brister S. J., Beattie W. S., et al. Aspirin «resistance» and risk of cardiovascular morbidity: systematic review and meta-analysis. *BMJ.* 2008. Vol. 336, No. 7637. P. 195–198. DOI: 10.1136/bmj.39430.529549.BE.
7. Angiolillo D. J., Fernandez-Ortiz A., Bernardo E., et al. Variability in individual responsiveness to clopidogrel: clinical implications, management, and future perspectives. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2007. Vol. 49, No. 14. P. 1505–1516. DOI: 10.1016/j.jacc.2006.11.044.
8. Brummel K. E., Paradis S. G., Butenas S., et al. Thrombin functions during tissue factor-induced blood coagulation. *Blood.* 2002. Vol. 100, No. 1. P. 148–152. DOI: 10.1182/blood.V100.1.148.
9. Shaturny V., Shakhidzhanov S., Sveshnikova A., et al. Activators, receptors and intracellular signaling pathways in blood platelets. *Biomedical Chemistry.* 2014. Vol. 60, No. 2. P. 182–200. DOI: 10.18097/PBMC20146002182 (in Russ.).
10. Stalker T. J., Newman D. K., Ma P., et al. Platelet Signaling. *Handb. Exp. Pharmacol.* 2012. No. 210. P. 59–85. DOI: 10.1007/978-3-642-29423-5_3.
11. Kahn M. L., Zheng Y. W., Huang W., et al. A dual thrombin receptor system for platelet activation. *Nature.* 1998. Vol. 394, No. 6694. P. 690–694. DOI: 10.1038/29325.
12. De Candia E. Mechanisms of platelet activation by thrombin: A short history. *Thromb. Res.* 2012. Vol. 129, No. 3. P. 250–256. DOI: 10.1016/j.thromres.2011.11.001.
13. McLennan A. G. Dinucleoside polyphosphates-friend or foe? *Pharmacol. Ther.* 2000. Vol. 87, No. 2–3. P. 73–89. DOI: 10.1016/S0163-7258(00)00041-3.

14. Jankowski V., van der Giet M., Mischak H., et al. Dinucleoside polyphosphates: strong endogenous agonists of the purinergic system. *Br. J. Pharmacol.* 2009. Vol. 157, No. 7. P. 1142–1153. DOI: 10.1111/j.1476-5381.2009.00337.x.
15. Hayashi M., Kiumi F., Mitsuya K. Changes in platelet ATP secretion and aggregation during pregnancy and in preeclampsia. *Am. J. Med. Sci.* 1999. Vol. 318, No. 2. P. 115–121.
16. Chaiworapongsa T., Yoshimatsu J., Espinoza J., et al. Evidence of in vivo generation of thrombin in patients with small-for-gestational-age fetuses and pre-eclampsia. *J. Matern Fetal Neonatal Med.* 2002. Vol. 11, No. 6. P. 362–367. DOI: 10.1080/jmf.11.6.362.367.
17. Schwarz U. R., Walter U., Eigenthaler M. Taming platelets with cyclic nucleotides. *Biochem. Pharmacol.* 2001. Vol. 62, No. 9. P. 1153–1161. DOI: 10.1016/S0006-2952(01)00760-2.
18. Remijn J. A., Wu Y. P., Jeninga E. H., et al. Role of ADP Receptor P2Y₁₂ in Platelet Adhesion and Thrombus Formation in Flowing Blood. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 2002. Vol. 22, No. 4. P. 686–691. DOI: 10.1161/01.ATV.0000012805.49079.23.
19. Gryka R. J., Buckley L. F., Anderson S. M. Vorapaxar: The Current Role and Future Directions of a Novel Protease-Activated Receptor Antagonist for Risk Reduction in Atherosclerotic Disease. *Drugs in R&D.* 2017. Vol. 17, No. 1. P. 65–72. DOI: 10.1007/s40268-016-0158-4.

Статья поступила в редколлегию 07.05.2018
Received by editorial board 07.05.2018

УДК 616-089.843:[616.36-018+616.419-018.4

КО-ТРАНСПЛАНТАТЫ НА ОСНОВЕ ГЕПАТОЦИТОВ И МЕЗЕНХИМАЛЬНЫХ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК: ХАРАКТЕРИСТИКА, КЛИНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И ПЕРВИЧНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДХОДА

**А. А. СЫМАНОВИЧ¹⁾, Е. А. ПРИМАКОВА¹⁾, А. А. ГОМОН¹⁾, Н. И. ДЕДЮЛЯ¹⁾, Е. Г. ПЕТРОВСКАЯ¹⁾,
Е. С. БУЗУК¹⁾, В. В. СМОЛЬНИКОВА¹⁾, А. Е. ЩЕРБА¹⁾, С. И. КРИВЕНКО¹⁾**

¹⁾Республиканский научно-практический центр трансплантации органов и тканей
на базе 9-й городской клинической больницы, ул. Семашко, 8, 210045, Минск, Беларусь

Представлены результаты исследования по изучению влияния совместного культивирования мезенхимальных стволовых клеток, выделенных из жировой ткани, и дифференцированных в гепатогенном направлении мезенхимальных стволовых клеток на жизнеспособность и функциональную активность гепатоцитов в совместной культуре. Установлено, что высокий уровень секреции протеинов печени дифференцированными мезенхимальными стволовыми клетками и обеспечение ими функциональных и метаболических свойств изолированных гепатоцитов наблюдается в первые дни культивирования (HGF ($p=0,06$) и ANGPTL4 ($p<0,03$)). Следовательно, при более длительном культивировании рекомендуется в качестве скаффолда использовать недифференцированные МСК. На развитие повреждения печени влияют переменные факторы окружающей среды и образ жизни (диета, физическая инертность и эмоциональный стресс). Для оценки эффективности применения ко-трансплантации гепатоцитов и аллогенных мезенхимальных стволовых клеток жировой ткани было проведено пилотное клиническое исследование у десяти пациентов с осложнениями цирроза печени в виде печеночной недостаточности. Установлено, что интрапортальная совместная инфузия гепатоцитов и аллогенных мезенхимальных стволовых клеток жировой ткани пациентам с печеночной недостаточностью на фоне цирроза и обширной резекции печени была безопасной в отношении нежелательных явлений и эффективной в отношении синтетической и метаболической функции печени.

Образец цитирования:

Сыманович А. А., Примакова Е. А., Гомон А. А., Дедюля Н. И., Петровская Е. Г., Бузук Е. С., Смольникова В. В., Щерба А. Е., Кривенко С. И. Ко-трансплантаты на основе гепатоцитов и мезенхимальных стволовых клеток: характеристика, клиническое применение и первичная оценка эффективности подхода // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 79–87.

For citation:

Symanovich A. A., Prymakova Y. A., Homan A. A., Dzyadzyulya N. I., Pyatrouskaya K. G., Buzuk E. S., Smolnikova V. V., Shcherba A. E., Krivenko S. I. Ko-transplants based on hepatocytes and mesenchymal stem cells: characteristic, clinical application and primary assessment of the approach efficiency. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 79–87 (in Russ.).

Авторы:

Алла Александровна Сыманович – врач лабораторной диагностики.

Евгения Алексеевна Примакова – врач лабораторной диагностики.

Анастасия Алексеевна Гомон – младший научный сотрудник.

Наталья Ивановна Дедюля – заведующий лабораторией.

Екатерина Геннадьевна Петровская – научный сотрудник.

Евгения Сергеевна Бузук – врач лабораторной диагностики.

Виктория Владимировна Смольникова – старший научный сотрудник научного отдела.

Алексей Евгеньевич Щерба – кандидат медицинских наук, доцент; заведующий отделом.

Светлана Ивановна Кривенко – кандидат медицинских наук, доцент; заместитель главного врача.

Authors:

Ala A. Symanovich, doctor of laboratory diagnostics. aleftyna@tut.by

Yauheniya A. Prymakova, doctor of laboratory diagnostics. gane_sel@mail.ru

Anastasiya A. Homan, junior scientific researcher. gomonanastasiya@gmail.com

Natallya I. Dzyadzyulya, chief of the laboratory. nata_2010@tut.by

Katsiaryna G. Piatrouskaya, research scientist. Ekatherina999@mail.ru

Evgenia S. Buzuk, doctor of laboratory diagnostics. zhenik.r@gmail.com

Victoria V. Smol'nikova, senior researcher of the scientific department. vsmolnikova2603@mail.ru

Aliaksei E. Shcherba, PhD (medical), associate professor; department head. vsmolnikova2603@mail.ru

Svetlana I. Krivenko, PhD. (medical), associate professor; deputy chief doctor. svtl_kr@tut.by

Ключевые слова: гепатоциты; мезенхимальные стволовые клетки; гепатоцитоподобные клетки; совместное культивирование; скаффолды; уровень секреции растворимых протеинов печени; морфологические характеристики; клеточная ко-трансплантация.

KO-TRANSPLANTS BASED ON HEPATOCYTES AND MESENCHYMAL STEM CELLS: CHARACTERISTIC, CLINICAL APPLICATION AND PRIMARY ASSESSMENT OF THE APPROACH EFFICIENCY

A. A. SYMANOVICH^a, Y. A. PRYMAKOVA^a, A. A. HOMAN^a, N. I. DZYADZYULYA^a,
K. G. PYATROUSKAYA^a, E. S. BUZUK^a, V. V. SMOLNIKOVA^a, A. E. SHCHERBA^a, S. I. KRIVENKO^a

^aRepublican Scientific and Practical Center for organ and tissue transplantation, the 9th Minsk city clinical hospital,
Semashko street, 8, 220116, Minsk, Belarus

Corresponding author: A. A. Symanovich (alefyna@tut.by)

The results of a study on the effect of co-cultivation of mesenchymal stem cells isolated from adipose tissue and hepatogenic differentiation of mesenchymal stem cells on the viability and functional activity of hepatocytes in a co-culture are presented. It was established that a high level of secretion of liver proteins by differentiated mesenchymal stem cells and providing them with functional and metabolic properties of isolated hepatocytes was observed in the first days of cultivation (HGF ($p = 0.06$) and ANGPTL4 ($p < 0.03$)). Therefore, with a longer culture, it is recommended to use undifferentiated MSCs as a scaffold. The development of liver damage is affected by variable environmental factors and lifestyle (diet, physical inertia and emotional stress). To assess the effectiveness of co-transplantation of hepatocytes and allogeneic mesenchymal stem cells of adipose tissue, a pilot clinical study was conducted in ten patients with complications of liver cirrhosis in the form of liver failure. It has been established that intraportal co-infusion of hepatocytes and allogeneic mesenchymal stem cells of adipose tissue in patients with hepatic insufficiency against cirrhosis and extensive liver resection was safe against undesirable phenomena and effective against the synthetic and metabolic function of the liver.

Key words: hepatocytes; mesenchymal stem cells; hepatocyte-like cells; co-culture; the level of liver secretory soluble proteins; morphological characteristics; cell co-transplantation.

Введение

Печень является важным органом в организме, где выполняются синтез белка и метаболизм экзогенных и эндогенных субстратов. Известная феноменальная способность печени после повреждения любой этиологии регулировать свой рост и массу, а также поддерживать постоянство структуры и функции связана с уникальными свойствами ее паренхиматозных клеток – гепатоцитов. Считается, что при отсутствии стимуляции роста гепатоциты в течение жизни делятся один или два раза. Однако после повреждения либо удаления фрагмента печени запускается последовательный механизм, основными компонентами которого являются пролиферация, дифференцировка и миграция клеток, а также реструктуризация стромы и ангиогенез. Факторы, продуцируемые как самой печенью, так и внепеченочными тканями, взаимодействуя между собой и со специфическими рецепторами клеточных мембран, регулируют этот компенсаторный механизм [1]. Другим перспективным источником для регенерации печени являются мультипотентные стромальные клетки [2]. Наряду с костным мозгом, мезенхимальные стволовые клетки присутствуют и во многих других тканях организма, например, в жировой ткани. Мезенхимальные стволовые клетки жировой ткани (МСК ЖТ) способны дифференцироваться в нескольких клеточных направлениях. В исследованиях последних лет неоднократно сообщается, что МСК ЖТ могут дифференцироваться в гепатогенном направлении *in vitro* при определенных условиях культивирования. Следовательно, жировая ткань может быть доступным источником мезенхимальных стволовых клеток с терапевтическим потенциалом для клеточной терапии [3].

Известно, что независимо от этиологических факторов, степень повреждения печени может зависеть от генетических полиморфизмов, которые связаны с различными этническими и культурными особенностями. Следовательно, на метаболические гены влияют переменные факторы окружающей среды и образ жизни (диета, физическая инертность и эмоциональный стресс), которые связаны с региональными различиями среди населения [4]. Для лечения заболеваний печени разрабатываются клеточные технологии. Перспективным средством терапии печеночной недостаточности может быть трансплантация гепатоцитов, особенно в случае метаболических болезней печени, для коррекции которых требуется меньшее

количество трансплантируемых клеток. Для эффективной трансплантации необходимо выделить гепатоциты из печени и накопить их путем культивирования в достаточном количестве для пересадки. При выделении гепатоцитов большое количество клеток гибнет, а у выживших – изменяются адгезивные свойства клеточной поверхности, так что их прикрепление на культуральный пластик с целью дальнейшего культивирования и накопления происходит с большими потерями. При длительном культивировании гепатоциты теряют ряд своих функциональных свойств. Хотя такие функции гепатоцитов, как секреция альбумина, синтез цитохрома P450 быстро уменьшаются в стандартных условиях культивирования. Данные фенотипические изменения связаны с изменениями в экспрессии генов, сопровождающимися снижением уровня транскрипции соответствующих генов. Эти процессы могут быть определены как начало дедифференцировки гепатоцитов и происходят вследствие ишемического/реперфузионного стресса во время их выделения, разрушения нормальной архитектуры ткани, а также адаптации клеток к новым условиям *in vitro* [5]. Основная задача при культивировании гепатоцитов заключается в обеспечении не только их выживания и пролиферативной способности, но и в сохранении ими фенотипа и функциональности. Для культивирования гепатоцитов используют в первую очередь коллаген, фибрин, а также различные синтетические полимеры, которые также покрывают этими природными белками [5]. Совместное культивирование мезенхимальных стволовых клеток, выделенных из жировой ткани, и изолированных клеток печени способствует сохранению клеточного трансплантата в течение определенного периода времени в сравнении с монокультурой гепатоцитов. Предположительно, что стимулированные гепатоцитами мезенхимальные стволовые клетки вырабатывают паракриновые факторы. Эти данные свидетельствуют об уменьшении гибели клеток (и в частности, апоптоза гепатоцитов) и улучшении их выживаемости. Дальнейшие клинические исследования необходимы для того, чтобы определить несколько важных факторов о трансплантации печеночных клеток пациентам с печеночной недостаточностью: оптимальное количество гепатоцитов, которые необходимы для поддержания функции печени, учитывая временные рамки для трансплантации гепатоцитов, причину и тяжесть. Отметим, что у пациентов с циррозом применение методов воздействия на процессы регенерации печени целесообразно как для лечения самого заболевания и его осложнений, так и для подготовки к ортотопической трансплантации печени.

В этой связи *основной целью* данного исследования является разработка оптимального алгоритма получения терапевтически эффективных ко-трансплантатов на основе гепатоцитов и аллогенных мезенхимальных стволовых клеток для лечения пациентов с острой и терминальной стадией хронической печеночной недостаточности.

Материалы и методы исследования

Изоляция гепатоцитов из донорской печени осуществлялась путем 3-ступенчатой перфузии органа и обработки ферментативным раствором с последующей механической экстракцией. Все растворы нагревались до 37 °C, что позволяло создать условия, близкие к условиям работы ферментов в организме человека. Во фрагмент печени, по предварительно заканюлированным сосудам, вводился раствор для перфузии 1, состоящий из раствора Хэнкса и EDTA. Далее осуществлялось введение раствора Хэнкса (раствор для перфузии 2) и обработка перфузионным раствором 3, содержащим коллагеназу II или IV типа. Фрагмент печени выдерживался 30 мин в растворе для перфузии 3 при постоянном перемешивании на механическом шейкере при 37 °C, после чего фермент нейтрализовался методом разбавления раствором питательной среды, содержащим 10 % человеческого альбумина. При данной температуре происходило ингибирование ферментативной активности. Обработанная коллагеназой ткань измельчалась на мелкие фрагменты путем механической гомогенизации скальпелем или стерильными ножницами, после чего подвергалась двойной фильтрации. Полученная клеточная суспензия центрифугировалась в течение 4 мин при 587 об./мин. Процедура повторялась дважды (t=4 мин при 587 об./мин при 4°C). Осадок ресуспендировали в 5–10 мл среды для культивирования гепатоцитов. Подсчет клеток и определение жизнеспособности проводился по стандартной методике по исключению трипанового синего и с уксусной кислотой.

Выделение МСК из жировой ткани проводилось по ранее разработанному протоколу с некоторыми модификациями [3]. Липоаспират смешивался с равным объемом стерильного фосфатного буфера и центрифугировался в течение 10 мин при 1500 об./мин при комнатной температуре. Образовавшийся поверх фосфатного буфера слой адипоцитов собирался в стерильные полипропиленовые центрифужные пробирки объемом 50 мл. Полученная суспензия смешивалась с равным объемом раствора коллагеназы I типа в фосфатном буфере и инкубировалась в течение 60 мин при температуре 37 °C и легком помешивании. После этого фермент нейтрализовался добавлением к смеси равного объема питательной среды, содержащей 10 % сыворотки АВ(IV) или 10 % эмбриональной телячьей сыворотки. Полу-

ченная смесь центрифугировалась в течение 10 мин при 4000 об./мин при комнатной температуре. Осадок собирался и ресуспендировался в 50 мл среды. Процедура центрифугирования повторялась ($t=10$ мин при 1500 об./мин при комнатной температуре). Далее осадок ресуспендировался в 10–15 мл среды для культивирования МСК. Подсчет клеток производился по стандартной методике с уксусной кислотой, подкрашенной метиленовым синим. Оценка жизнеспособности клеток проводилась по общепринятой методике по исключению трипанового синего. Клеточная суспензия доводилась средой для культивирования МСК до посевной концентрации и высевалась в культуральные флаконы. Через 24–48 часов инкубации (37°C , 5 % CO_2 , 90 % влажность) не адгезировавшие к поверхности флакона клетки смывались стерильным PBS и заполнялись флаконы специализированной средой для культивирования МСК.

Для гепатогенной дифференцировки мезенхимальные стволовые клетки, находящиеся на втором пассаже, высевались в культуральные флаконы и культивировались до достижения 70–80 % конfluence. После этого в додифференцировочный период в культуральную среду, не содержащую сыворотки, добавляли EGF (эпидермальный фактор роста), bFGF (основной фактор роста фибробластов, «Sigma-Aldrich», Германия) и 1% антибиотика для остановки процесса пролиферации. Далее следовал 2-этапный протокол дифференцировки. На первом этапе гепатогенная дифференцировка стимулировалась дифференцировочной средой без сыворотки, дополненной HGF (фактор роста гепатоцитов), bFGF, никотинамидом и 1 % антибиотика. В таких условиях клетки культивировались в течение 7 дней. На втором этапе бессывороточная дифференцировочная среда содержала OMS (онкостатин М), дексаметазон, ITS-premix (100 $\mu\text{mol/L}$ инсулина, 6,25 $\mu\text{g/mL}$ трансферина, 3,6 $\mu\text{mol/L}$ селеновой кислоты, 1,25 mg/mL BSA и 190 $\mu\text{mol/L}$ ленолевой кислоты) и 1% антибиотика. Культивирование продолжалась 14 дней с заменой среды каждые 2–3 дня [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Морфологический анализ клеточных культур гепатоцитов проводился через 18 ч после выделения, определялось наличие множества крупных клеток полигональной формы, по морфологии которых можно судить о принадлежности их к популяции гепатоцитов. Через 72 ч количество клеток данной популяции снижалось, а к 7-м суткам наблюдалось полная утрата свойств клеток печени, что подтверждено данными иммунофенотипического анализа.

Метаболическая активность выделенных гепатоцитов оценивалась методом количественного колориметрического анализа уровня продукции мочевины в клеточном супернатанте на 1, 3, 7 и десятые сутки после процедуры изоляции клеток печени. Наличие мочевины в культуральной среде свидетельствует, наряду с морфологическими характеристиками, о принадлежности выделенных клеток к гепатоцитам. Постепенное уменьшение концентрации данного продукта жизнедеятельности клеток в образце позволяет судить о снижении метаболической активности гепатоцитов, что соответствует результатам иммунофенотипического и морфологического анализа и согласуется с многочисленными литературными источниками. Большинство образцов имели схожий уровень продукции мочевины с тенденцией к увеличению на десятый день культивирования, что может говорить о постепенной гибели клеток и выделении продуктов их распада.

Фракция мононуклеарных клеток выделялась по ранее разработанному модифицированному протоколу с использованием экстракорпоральной механической обработки жировой ткани. Для всех образцов МСК, выделенных из жировой ткани, в процессе культивирования была проанализирована экспрессия маркеров клеточной поверхности методом проточной цитофлуориметрии для подтверждения принадлежности клеток к мезенхимальным стволовым. Для иммунофенотипирования МСК ЖТ был выбран спектр маркеров, наиболее часто экспрессируемых на стромальных стволовых клетках: CD 90, CD 105, CD 13, CD 44, CD 45, CD 73, CD 34, CD 54, CD 29, CD 9. МСК ЖТ образцов, рассмотренных ниже, характеризовались постоянно высокими уровнями стромально-ассоциированных маркеров (CD 90, CD 105, CD 13, CD 44, CD 73, CD 29, CD 9) и низким уровнем CD 34. Исследуемые клетки были негативны по маркерам CD 45 и HLA-DR.

При микроскопировании клеточных культур, дифференцированных в гепатогенном направлении (опыт и контроль), наиболее значительные морфологические изменения были установлены на 14-й день культивирования (седьмой день культивирования на втором этапе), которые заключались в том, что клетки утратили фибробластоподобную морфологию и приобрели распластанную полигональную форму. Кроме того, на данном этапе отмечалось увеличение генной экспрессии фетального маркера α -фетопротейна, а также максимума достигали отличия в уровне экспрессии генного маркера ALB в опытной группе в сравнении с контролем (экспрессия альбумина усиливалась у дифференцированных МСК).

Иммунофенотипические характеристики клеток незначительно изменялись: наблюдалось снижение экспрессии CD 105, однако уровень других маркеров адгезии сохранялся на прежнем уровне. Полученные в процессе дифференцировки гепатоцитоподобные клетки оценивались как CD 68⁺.

Использование МСК в качестве скаффолда для культивирования является одним из новейших подходов в получении клеточного трансплантата клеток печени. Проведено исследование по влиянию мезенхимальных стволовых клеток на полученный трансплантат гепатоцитов использования МСК в качестве биodeградируемого скаффолда. Отрабатывалось два способа культивирования сложных совместных культур:

- 1) использование дифференцированных в гепатогенном направлении мезенхимальных клеток;
- 2) использование культуры мезенхимальных стволовых клеток, достигшей монослоя.

При морфологическом анализе культур гепатоцитов в 1–3 сутки не регистрировалось значимых отличий в зависимости от используемого скаффолда. Оба типа скаффолдов обеспечивали поддержание морфологии культуры гепатоцитов. При дальнейшем культивировании наблюдалось снижение адгезивных свойств дифференцированных в гепатогенном направлении клеток в сравнении с недифференцированными МСК.

Кроме изучения морфологических характеристик по мере накопления образцов клеток, выделенных из печени, был исследован уровень секреторной активности изолированных гепатоцитов ($n=15$), совместных культур МСК+гепатоциты ($n=15$) и дифференцированных МСК+гепатоциты ($n=15$) для выявления статистически значимых различий. Проводилось определение уровня секреции протеинов выделенными клетками печени на приборе для мультиплексного анализа Luminex 200TM. Измерялась концентрация следующих белков: AFP, ANGPTL3, ANGPTL4, ANGPTL6, FABP, FGF-19, FGF-21, FGF-23 и HGF.

Для анализа полученных данных был применен непараметрический метод Манна–Уитни (STATISTICA 6.0). Были установлены статистически значимые различия по секреторной активности ANGPTL4 ($p=0,03$) и тенденция к увеличению уровня HGF ($p=0,06$) (рис. 1, 2).

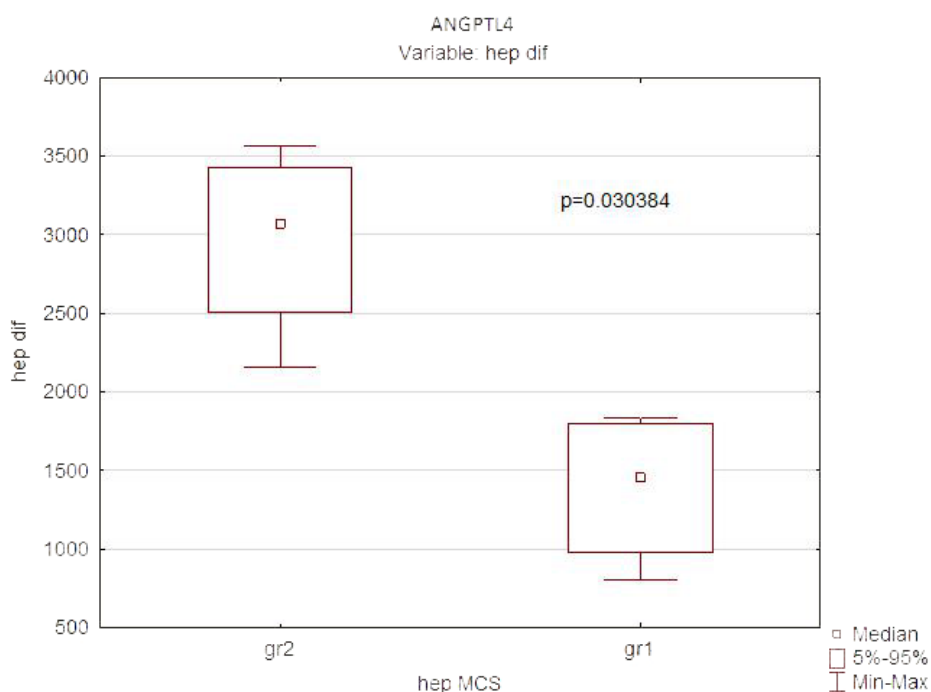


Рис. 1. Уровень секреторной активности ANGPTL4 дифференцированных в гепатогенном направлении МСК+гепатоциты ($n=15$), МСК + гепатоциты ($n=15$) ($p<0,03$)

Fig. 1. The level of the secretory activity of ANGPTL4 of co-cultures hepatocyte-like cells + hepatocytes ($n = 15$) co-cultures of MSCs + hepatocytes ($n = 15$) ($p < 0.03$)

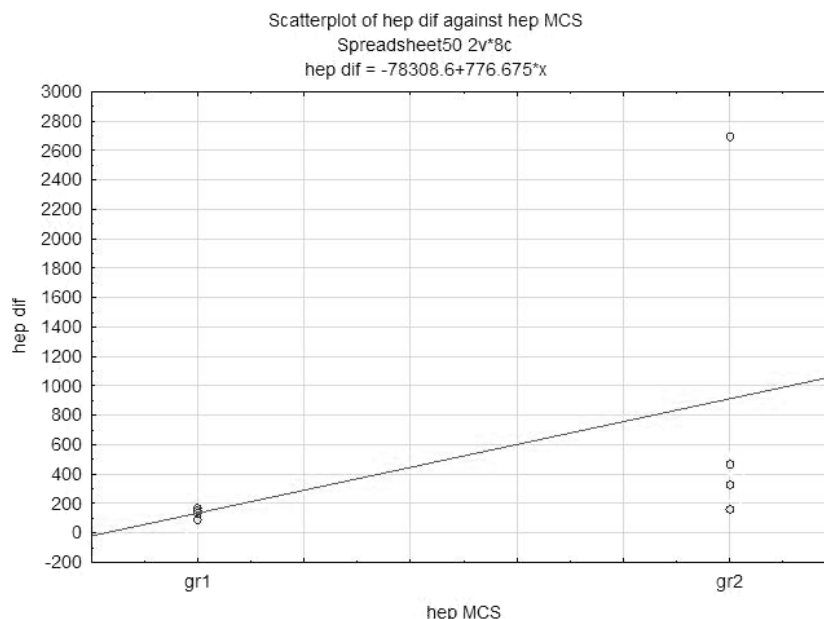


Рис. 2. Уровень секреторной активности HGF дифференцированных в гепатогенном направлении МСК+гепатоциты (n=15), МСК + гепатоциты (n=15) ($p < 0,06$)

Fig. 2. The level of the secretory activity of HGF of co-cultures hepatocyte-like cells + hepatocytes ($n = 15$) co-cultures of MSCs + hepatocytes ($n = 15$) ($p < 0,06$)

По уровню секреции альфа-фетопротейна не было установлено статистически достоверных различий между группами ($p > 0,05$).

Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии дифференцированных мезенхимальных стволовых клеток на уровень секреции протеинов печени и поддержания функциональных и метаболических свойств изолированных гепатоцитов в первые дни культивирования. Однако при более длительном культивировании рекомендуется в качестве скаффолда использовать недифференцированные МСК.

Совместное культивирование мезенхимальных стволовых клеток, выделенных из жировой ткани, и изолированных клеток печени способствует сохранению клеточного трансплантата в течение определенного периода времени в сравнении с монокультурой гепатоцитов. Предположительно, что стимулированные гепатоцитами мезенхимальные стволовые клетки вырабатывают паракриновые факторы. Эти данные свидетельствуют об уменьшении гибели клеток (и в частности, апоптоза гепатоцитов) и улучшении их выживаемости.

Предыдущие исследования показали, что выделенные из костного мозга стволовые клетки оказывают защитное действие на гепатоциты грызунов *in vitro* и *in vivo*. Группой исследователей под руководством Исода (2004) было выявлено, что стволовые клетки, выделенные из костного мозга, поддерживают функцию гепатоцитов путем секреции IL-6, отвечающего за усиление продукции мочевины при сохранении альбумина на прежнем уровне [7]. Другая научная группа во главе с Махаджерани выполняла трансплантацию мышам человеческих гепатоцитов, культивированных совместно со стволовыми клетками костного мозга, и обнаружила степень улучшения приживления, по сравнению с монокультурой клеток печени [8]. МСК, как известно, являются структурной опорой для клеток организма и обладают антиапоптотическим, иммуномодулирующим действием. Кроме того, был исследован эффект культивирования мезенхимальных стволовых клеток костного мозга совместно с гепатоцитами крысы и лимфоцитами человека, а также и найдена зависимость влияния совместного культивирования с лимфоцитами на функциональную активность гепатоцитов и развитие противовоспалительного ответа [9–12]. Данный эффект опосредован комбинацией развития ответа через межклеточные контакты и через растворимые факторы (факторы роста, цитокины внеклеточного матрикса) [13].

Эта вспомогательная роль мезенхимальных стволовых клеток особенно перспективна в контексте клеточной трансплантации при острой печеночной недостаточности. Трансплантация гепатоцитов может послужить в качестве моста для регенерации собственной печени либо поддерживающей терапии у пациентов в предтрансплантационном периоде, обеспечивая достаточное время для поиска подходящего органа. Определено, что МСК могут служить потенциальной альтернативой трансплантации гепатоцитов при острой

печеночной недостаточности. Однако, хотя мезенхимальные стволовые клетки могут ускорить процесс восстановления печени, МСК не всегда способны обеспечить недостающие функции печени. Совместная трансплантация мезенхимальных стволовых клеток и гепатоцитов при острой печеночной недостаточности может обеспечить оптимальное сочетание поддержки печени с противовоспалительным действием.

Ко-трансплантация гепатоцитов и аллогенных мезенхимальных стволовых клеток жировой ткани была технически успешно выполнена пяти пациентам. У четверых пациентов причиной печеночной недостаточности послужил цирроз печени и у одного – обширная резекция печени. Во всех случаях процедура прошла без осложнений, мониторинг давления в воротной вене не показал его роста.

Применение клеточного трансплантата на основе гепатоцитов и мезенхимальных стволовых клеток способствовало значимому улучшению синтетической и экскреторной функции печени. Уровень альбумина был достоверно выше (33(28;35) г/л против 29(25;32) г/л), а МНО (1,6(1,4;1,9) против 2,15(1,8;2,3)) и билирубина (51(35;67) мкмоль/л против 87(60;90) мкмоль/л) – ниже в основной группе. В группе сравнения имело место прогрессирование печеночной энцефалопатии у 2-х из пяти пациентов, а в основной группе подобное прогрессирование было у одного пациента.

Таблица

Сравнительная характеристика лабораторных показателей в основной группе и группе сравнения через 7 дней после инфузии клеток

Table

Comparative characteristics of laboratory parameters in the main group and the comparison group 7 days after the infusion of cells

Лабораторный показатель	Основная группа, n=5	Группа сравнения, n=5	Достоверность различий между группами*	Изменение показателя
Альбумин, г/л	33(28±35)	29(25±32)	p= 0,045	
МНО	1,6(1,4±1,9)	2,15(1,8±2,3)	p=0,04	↓
Билирубин, мкмоль/л	51(35±67)	87(60±90)	p=0,04	↓

Примечание. *Mann –Whitney U-Test

Степень выраженности печеночной недостаточности была оценена с помощью формулы расчета балла MELD: $0,95 \times \text{Log } e (\text{креатинин мг/дл}) + 0,378 \times \text{Log } e (\text{билирубин мг/дл}) + 1,120 \times \text{Log } e (\text{МНО}) + 0,643$ (www.mayoclinic.org/gi-rst/mayomodel5.html).

Наблюдалось статистически достоверное снижение балла MELD через 28 дней после ко-трансплантации гепатоцитов и аллогенных мезенхимальных стволовых клеток жировой ткани (Mann–Whitney U-test; p=0,02) (рис. 3).

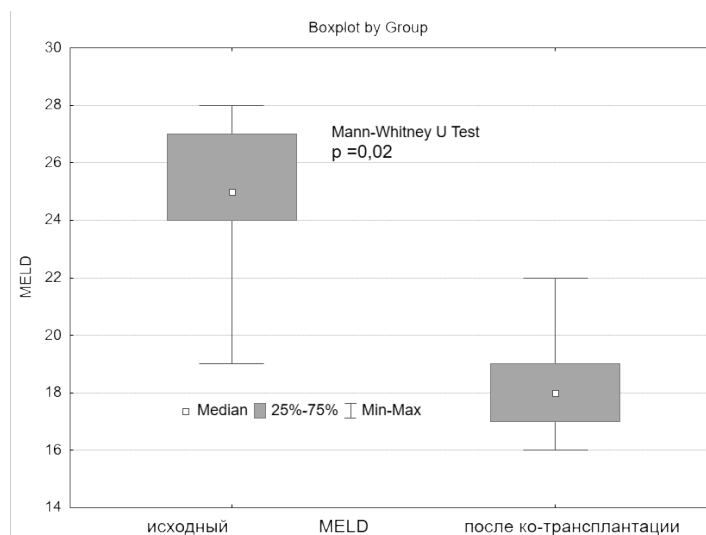


Рис. 3. Влияние совместной трансплантации гепатоцитов и МСК на балл MELD

Fig. 3. Effect of co-transplantation of hepatocytes and MSCs on the MELD score

Таким образом, интрапортальная совместная инфузия гепатоцитов и аллогенных мезенхимальных стволовых клеток жировой ткани пациентам с печеночной недостаточностью на фоне цирроза и обширной резекции печени была безопасной в отношении нежелательных явлений и эффективной в отношении синтетической и метаболической функции печени.

Заключение

Полученные результаты позволяют констатировать следующее:

1. Культивирование выделенных из печени гепатоцитов без использования скаффолдов не обеспечивает увеличения количества клеток и приводит к снижению их жизнеспособности с 98 % (96–100 %) до 15 % (10–28 %) в день 1 и в день 7 соответственно. Синтез секреторных белков печени HGF ($p=0,06$) и ANGPTL4 ($p<0,03$) свидетельствует о возможности использования дифференцированных мезенхимальных стволовых клеток в качестве скаффолда для поддержания функциональных свойств изолированных гепатоцитов в процессе культивирования.
2. Высокий уровень секреции протеинов печени дифференцированными мезенхимальными стволовыми клетками и обеспечение ими функциональных и метаболических свойств изолированных гепатоцитов наблюдается в первые дни культивирования. Однако при более длительном культивировании рекомендуется в качестве скаффолда использовать недифференцированные МСК.
3. Совместная трансплантация мезенхимальных стволовых клеток и гепатоцитов в качестве клеточной терапии при острой печеночной недостаточности обеспечивает оптимальное сочетание поддержки печени с противовоспалительным действием.

Библиографические ссылки

1. Enosawa S. Isolation of GMP Grade Human Hepatocytes from Remnant Liver Tissue of Living Donor Liver Transplantation // *Methods Mol Biol*. 2017. № 29. P. 231–245.
2. Alegre, F., Pelegrin, P., Feldstein, A. E. Inflammasomes in Liver Fibrosis // *Semin Liver Dis*. 2017. № 37. P. 119–127.
3. Krivenko S. I. Sposob polutheniia mezenhimal'nyh stvolovyh kletok iz zhirovoi tkani theloveka [The way to produce mesenchymal stem cells from human adipose tissue]. Patent RB. 2013. № 18051.
4. Ramos-Lopez O., Martinez-Lopez E., Roman S., et al. Genetic, metabolic and environmental factors involved in the development of liver cirrhosis in Mexico // *World J. Gastroenterol*. 2015. № 41. P. 11552–11566.
5. Dhawan A., Puppi J., Hughes R. D., et al. Human hepatocyte transplantation: current experience and future challenges // *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol*. 2010. № 7. P. 288–298.
6. Taléns-Visconti R., Bonora A., Jover R., et al. Hepatogenic differentiation of human mesenchymal stem cells from adipose tissue in comparison with bone marrow mesenchymal stem cells // *World J. Gastroenterol*. 2006. № 36. P. 5834–5845.
7. Isoda K., Kojima M., Takeda M., et al. Maintenance of hepatocyte functions by coculture with bone marrow stromal cells // *J. Biosci. Bioeng*. 2004. № 97. P. 343–346.
8. Mohajerani S. A., Nourbakhsh M., Cadili A., et al. Transplant of primary human hepatocytes cocultured with bone marrow stromal cells to SCID Alb-uPA Mice // *Cell Medicine, part B of Cell Transplantation*. 2010. № 1. P. 81–92.
9. Fitzpatrick E., Wu Y., Dhadda P. Coculture with mesenchymal stem cells results in improved viability and function of human hepatocytes // *Cell Transplantation*. 2015. № 1. P. 73–83.
10. Gomez-Aristizabal A., Ng C., Ng J., et al. Effects of two mesenchymal cell populations on hepatocytes and lymphocytes // *Liver Transpl*. 2012. № 18. P. 1384–1394.
11. Aurich I., Mueller L. P., Aurich H., et al. Functional integration of hepatocytes derived from human mesenchymal stem cells into mouse livers // *Gut*. 2007. № 56. P. 405–415.
12. Banas A., Teratani T., Yamamoto Y., et al. IFATS collection: in vivo therapeutic potential of human adipose tissue mesenchymal stem cells after transplantation into mice with liver injury // *Stem Cells*. 2008. № 26. P. 833–848.
13. Houllhan D. D., Newsome P. N. Critical review of clinical trials of bone marrow stem cells in liver disease // *Gastroenterology*. 2008. № 135. P. 438–450.

References

1. Enosawa S. Isolation of GMP Grade Human Hepatocytes from Remnant Liver Tissue of Living Donor Liver Transplantation. *Methods Mol Biol*. 2017. No. 29. P. 231–245.
2. Alegre, F., Pelegrin, P., Feldstein, A. E. Inflammasomes in Liver Fibrosis. *Semin Liver Dis*. 2017. No. 37. P. 119–127.
3. Krivenko S. I. Sposob polutheniia mezenhimal'nyh stvolovyh kletok iz zhirovoi tkani theloveka [The way to produce mesenchymal stem cells from human adipose tissue]. *Patent RB*. 2013. No. 18051.
4. Ramos-Lopez O., Martinez-Lopez E., Roman S., et al. Genetic, metabolic and environmental factors involved in the development of liver cirrhosis in Mexico. *World J. Gastroenterol*. 2015. No. 41. P. 11552–11566.
5. Dhawan A., Puppi J., Hughes R. D., et al. Human hepatocyte transplantation: current experience and future challenges. *Nat. Rev. Gastroenterol. Hepatol*. 2010. No. 7. P. 288–298.
6. Taléns-Visconti R., Bonora A., Jover R., et al. Hepatogenic differentiation of human mesenchymal stem cells from adipose tissue in comparison with bone marrow mesenchymal stem cells. *World J. Gastroenterol*. 2006. No. 36. P. 5834–5845.

7. Isoda K., Kojima M., Takeda M., et al. Maintenance of hepatocyte functions by coculture with bone marrow stromal cells. *J. Biosci. Bioeng.* 2004. No. 97. P. 343–346.
8. Mohajerani S. A., Nourbakhsh M., Cadili A., et al. Transplant of primary human hepatocytes cocultured with bone marrow stromal cells to SCID Alb-uPA Mice. *Cell Medicine, part B of Cell Transplantation*. 2010. No. 1. P. 81–92.
9. Fitzpatrick E., Wu Y., Dhadda P. Coculture with mesenchymal stem cells results in improved viability and function of human hepatocytes. *Cell Transplantation*. 2015. No. 1. P. 73–83.
10. Gomez-Aristizabal A., Ng C., Ng J., et al. Effects of two mesenchymal cell populations on hepatocytes and lymphocytes. *Liver Transpl.* 2012. No. 18. P. 1384–1394.
11. Aurich I., Mueller L. P., Aurich H., et al. Functional integration of hepatocytes derived from human mesenchymal stem cells into mouse livers. *Gut*. 2007. No. 56. P. 405–415.
12. Banas A., Teratani T., Yamamoto Y., et al. IFATS collection: in vivo therapeutic potential of human adipose tissue mesenchymal stem cells after transplantation into mice with liver injury. *Stem Cells*. 2008. No. 26. P. 833–848.
13. Houllhan D. D., Newsome P. N. Critical review of clinical trials of bone marrow stem cells in liver disease. *Gastroenterology*. 2008. No. 135. P. 438–450.

Статья поступила в редколлегию 07.05.2018
Received by editorial board 07.05.2018

УДК 582.29:630*113.2:615.277.3(476.2)

ЦИТОТОКСИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЭКСТРАКТОВ ИЗ ЧЕТЫРЕХ ВИДОВ ЛИШАЙНИКОВ В ОТНОШЕНИИ КУЛЬТУР ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК

О. М. ХРАМЧЕНКОВА¹⁾, М. В. МАТВЕЕНКОВ²⁾

¹⁾Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, ул. Советская, 104, 246039, Гомель, Беларусь

²⁾Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Беларусь

In vitro оценена способность ацетоновых и этанольных экстрактов из распространенных в Беларуси лишайников *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri*, *Ramalina pollinaria* и *Cladonia arbuscula* подавлять жизнеспособность опухолевых и стабильных клеточных линий. Экстракты из *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* и *Cladonia arbuscula* цитотоксичны в отношении культур опухолевых клеток А-549, HeP-2C и MCF-7, а также неопухолегенной линии эпителиальных клеток человека HaCAT. Экстракт из лишайника *Ramalina pollinaria* нетоксичен в отношении трех изучаемых линий опухолевых клеток, а также клеток кератиноцитов человека линии HaCAT. Динамика снижения жизнеспособности клеточных линий описывается S-образными кривыми. Специфичность цитотоксического действия экстрактов из лишайников *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* и *Cladonia arbuscula* проявилась в отношении линии клеток MCF-7 ($IC_{50} = 3,86 \div 7,06$ мкг/мл; ИС = $1,44 \div 5,05$). В отношении клеточных культур А-549 и HeP-2C экстракты с выраженным токсическим действием ($IC_{50} < 30,0$ мкг/мл) специфичностью не отличались (ИС $\leq 1,0$). Экстракт из лишайника *Ramalina pollinaria* при $IC_{50} = 40,55 \div 49,37$ мкг/мл отличался выраженной специфичностью в отношении культур опухолевых клеток (ИС = $1,46 \div 1,77$).

Ключевые слова: экстракты из лишайников; культуры клеток; опухолевые клетки; жизнеспособность; полнингирующая концентрация (IC_{50}); цитотоксичность; индекс специфичности (ИС).

Благодарность. авторы благодарят заведующую лабораторией комбинированных воздействий ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси», кандидата биологических наук С. Н. Сушко, а также бывшего сотрудника ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси» Д. Р. Петреневу за помощь в организации выполнения исследования и конструктивные замечания при оценке полученных результатов.

CYTOTOXIC ACTIVITY OF EXTRACTS FROM THE FOUR LICHEN SPECIES AGAINST HUMAN CANCER CELLS LINES

V. M. KHRAMCHANKOVA^a, M. V. MATVEYENKAU^b

^aFrancisk Skorina Gomel State University, Sovetskaya street, 104, 246019, Gomel, Belarus

^bInstitute of radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus,
Fedyuninsky street, 4, 246007, Gomel, Belarus

Corresponding author: V. M. Khranchankova (hramchenkova@gsu.by)

Образец цитирования:

Храмченкова О. М., Матвеенков М. В. Цитотоксическая активность экстрактов из четырех видов лишайников в отношении культур опухолевых клеток // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 88–98.

For citation:

Khranchankova V. M., Matveyenkau M. V. Cytotoxic activity of extracts from the four lichen species against human cancer cells lines. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 88–98 (in Russ.).

Авторы:

Ольга Михайловна Храмченкова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры ботаники и физиологии растений.

Матвей Владимирович Матвеенков – младший научный сотрудник лаборатории комбинированных воздействий.

Authors:

Volga M. Khranchankova, PhD (biology), associate professor; associate professor of the department of botany and plant physiology.

hramchenkova@gsu.by

Matsvei V. Matveyenkau, junior researcher of the laboratory of combined exposures.

matvey.matveenkou@mail.ru

In vitro evaluated the ability of acetone and ethanol extract from lichen species *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri*, *Ramalina pollinaria* and *Cladonia arbuscula* to inhibit the viability of human cancer and stable cell lines. Extracts from *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* and *Cladonia arbuscula* were cytotoxic against tumor cell lines A-549, HeP-2C and MCF-7, as well as against non-tumorigenic human epithelial cell line HaCAT. The lichen extract from *Ramalina pollinaria* was nontoxic against human cancer cell lines, as well as against human keratinocyte cells HaCAT. The dynamics of cell viability decrease lines is described by S-shaped curves. Specificity of the cytotoxic effect of extracts from lichens *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* and *Cladonia arbuscula* was manifested with respect to the MCF-7 cell line ($IC_{50} = 3,86 \div 7,06 \mu\text{g/ml}$; $SI = 1,44 \div 5,05$). For cell cultures A-549 and HeP-2C, extracts with a pronounced toxic effect ($IC_{50} < 30,0 \mu\text{g/ml}$) did not differ in specificity ($SI \leq 1,0$). The extract from *Ramalina pollinaria* at $IC_{50} = 40,55 \div 49,37 \mu\text{g/ml}$ was characterized by pronounced specificity for the cultures of tumor cells ($SI = 1,46 \div 1,77$).

Key words: lichen extracts; cell lines; tumor cells; viability; half maximal inhibitory concentrations (IC_{50}); cytotoxicity; specificity index (SI).

Acknowledgments. The authors thank the head of the combined effects laboratory of the Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Ph.D. S.N. Sushko, as well as the former employee of the Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, D.R. Petrenko for assistance in organizing the implementation of the study and constructive comments when assessing the results.

Введение

Скрининг биологической активности вторичных метаболитов лишайников в настоящее время является актуальным. Известно свыше 20 тыс. видов лишайников, обитающих повсеместно, в том числе – в самых суровых условиях, где высшие растения существовать не могут. Описаны свойства более чем тысячи вторичных метаболитов лишайников, относящихся к депсидам, депсидонам, хинонам, ксантонам, терпеноидам, дибензофуранам и другим классам соединений. Установлены противовирусные, антимикробные, иммуномодулирующие, антиоксидантные, противоопухолевые, фотопротекторные и многие другие свойства экстрактов из лишайников, или выделенных из них лишайниковых веществ – атранорина, париетина, усниновой, леканоровой, физодовой и многих других «лишайниковых кислот» [1–7].

При всем многообразии имеющихся данных не решенными остаются многие задачи. Описания видового состава лишайников многих регионов далеки от завершения. Крайне недостаточно сведений о встречаемости и распространенности определенных видов лишайников. Имеющиеся сведения о составе, тем более о количестве вторичных метаболитов в талломах определенных видов лишайников нуждаются в постоянном уточнении. До настоящего времени нет единого мнения по вопросу, от каких факторов зависит количество и состав биологически активных веществ в биомассе данного вида лишайников, произрастающего в определенных условиях и на определенном субстрате. Одинаковы ли состав и содержание вторичных метаболитов в биомассе тех или иных видов лишайников, произрастающих на разных континентах, в различных условиях, на различных субстратах? Необходимы исследования, позволяющие оценить эффективность различных органических растворителей при извлечении тех или иных вторичных метаболитов из биомассы лишайников, или, по крайней мере, точно установить химический состав получаемых экстрактов. Последняя задача является тем более важной, что индивидуальные вещества, извлекаемые из лишайников, довольно легко могут быть синтезированы химическим путем, что ставит под сомнение необходимость их выделения из крайне медленно растущих талломов. В то же время, практика экстрагирования сырья из высших растений не исключает возможности химического синтеза содержащихся в них веществ, так как биологическая активность экстрактов отличается от таковой у определенных химических соединений.

Преодолению упомянутых и многих других проблем практического использования биомассы лишайников способствует накопление экспериментальных данных – скрининг биологической активности различных экстрактов и собственно вторичных метаболитов лишайников. Актуальность такого рода исследований подтверждается тем фактом, что экспериментальные данные, получаемые с использованием одних и тех же, или схожих методик, численно сильно отличаются, что вряд ли может быть объяснено только возможностями применяемого оборудования, характеристиками используемых реактивов, или иными методологическими отличиями, каковые еще предстоит преодолеть.

Данные о противоопухолевых свойствах лишайниковых веществ, сводка о которых приводится в обзорах [5–11], указывают на выраженное токсическое действие экстрактов и отдельных выделенных лишайниковых веществ, в отношении культур опухолевых клеток. Несмотря на единообразие методик оценки токсического действия (МТТ-тест, тест на клоногенный потенциал, анализ клеточного цикла), полученные результаты (например, величина концентрации полуингибирования – IC_{50}) весьма сильно

варьируют. Сказанное относится также к исследованиям, выполненным по выбранным нами или родственным видам лишайников [12–16].

Настоящее исследование посвящено *in vitro* оценке активности ацетоновых и этанольных экстрактов из четырех видов лишайников, широко распространенных в лесах юго-востока Беларуси – *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri*, *Ramalina pollinaria* и *Cladonia arbuscula* в отношении трех культур опухолевых клеток – MCF-7, A-549 и HeP-2C.

Материалы и методы исследования

Образцы лишайников отбирали в лесах Государственного лесохозяйственного учреждения «Гомельский лесхоз».

Гипогимния вздутая – *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. (Syn. *Parmelia physodes* (L.) Ach.) – распространенный полиморфный вид листоватых лишайников семейства Parmeliaceae порядка Lecanorales класса Lecanoromycetes отдела Ascomycota. Встречается преимущественно на стволах и ветвях хвойных и березы, но растет и на всевозможных лиственных породах, а также на самых разнообразных других субстратах – опаде, отпаде, обработанной древесине и каменистом субстрате, иногда на почве. Содержит атранорин, хлоратранорин, физодовую, физодаловую, 3-гидроксифизиодовую, 2'-О-метилфизиодовую и протоцеттаровую кислоты [17–20]. Биомассу лишайника отбирали на стволах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth.).

Эверния сливовая – *Evernia prunastri* (L.) Ach. – распространенный вид кустисто-листоватых лишайников семейства Parmeliaceae порядка Lecanorales класса Lecanoromycetes отдела Ascomycota. Встречается на стволах и ветвях хвойных и лиственных пород, опаде и отпаде, реже на камнях, содержит атранорин, усниновую и эверновую кислоты [17; 19; 21; 22]. Биомассу лишайника отбирали на стволах дуба черешчатого (*Quercus robur* L.).

Рамалина пыльцеватая – *Ramalina pollinaria* (Westr.) Ach. – распространенный вид листовато-кустистых лишайников семейства Ramalinaceae порядка Lecanorales класса Lecanoromycetes отдела Ascomycota. Встречается на коре деревьев лиственных, реже хвойных пород, в хорошо освещенных, открытых местах. Редко на камнях. Содержит усниновую и эверновую кислоты [17; 19; 23]. Биомассу лишайника отбирали на стволах дуба черешчатого (*Quercus robur* L.).

Кладония лесная – *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. (Syn. *Cladonia sylvatica* (L.) Hoffm.) – распространенный вид кустистых лишайников семейства Cladoniaceae порядка Lecanorales класса Lecanoromycetes отдела Ascomycota. Обитает на песчаной почве, преимущественно в борах, на открытых местах, на старых пнях, обработанной древесине, реже по кочкам на сфагновых болотах. Содержит усниновую кислоту, по другим данным – усниновую, фумарпротоцеттаровую, посромовую и урсоловую кислоты [17; 19; 24]. Биомассу лишайника отбирали на почве в сосняке лишайниковом.

Получение экстрактов из лишайников. Высушенную до воздушно-сухого состояния и измельченную биомассу лишайников экстрагировали в аппарате Сокслета. В табл. 1 приведены характеристики изучаемых экстрактов, присвоенная экстрактам нумерация сохраняется при изложении экспериментальных данных.

Таблица 1

Характеристика экстрактов из лишайников

Table 1

Characteristics of extracts from lichens

Номер экстракта	Вид лишайника	Экстрагент	Условия экстрагирования
1	<i>Hypogymnia physodes</i>	этанол	t = 78,3 °C
2	<i>Hypogymnia physodes</i>	ацетон	t = 56,3 °C
3	<i>Hypogymnia physodes</i>	ацетон	Предварительно – холодная мацерация гексаном в течение 7 суток, далее – в аппарате Сокслета при t = 56,3 °C
4	<i>Evernia prunastri</i>	ацетон	t = 56,3 °C
5	<i>Ramalina pollinaria</i>	ацетон	t = 56,3 °C
6	<i>Cladonia arbuscula</i>	ацетон	t = 56,3 °C
7	<i>Cladonia arbuscula</i>	этанол	t = 78,3 °C

Полноту экстракции контролировали стандартным способом [25]. Растворитель удаляли с помощью ротационного испарителя. Сухие экстракты хранили при комнатной температуре.

Подготовка стабильных клеточных линий. Использовали опухолегенные линии эпителиального происхождения MCF-7, A-549 и HeP-2C, а также эпителиальные клетки человека линии HaCAT (кератиноциты). Культуры клеток были получены в НИЛ проблем терморегуляции кафедры физиологии человека и животных Белорусского государственного университета. Замороженные при минус 80 °С образцы клеток переносили в стакан с водой, температура которой составляла 37 °С. После оттаивания пробирку обрабатывали спиртом, содержимое ресуспендировали, переносили в стерильные полипропиленовые пробирки (15 мл), содержащие 10 мл полной инкубационной среды (DMEM/F-12, 11039 GIBCO; 100 Ед/мл пенициллин; 100 мкг/мл стрептомицин; 0,25 мкг/мл амфотерицин-В; 10 % инактивированной эмбриональной телячьей сыворотки, HiCloneInc) [26]. После 5 мин центрифугирования (4 °С, 200 g) жидкую фазу отбрасывали для удаления криоконсерванта, клеточный осадок ресуспендировали в 5 мл полной инкубационной среды и использовали для посева, концентрацию клеток определяли в камере Горяева. Культивирование производилось согласно рекомендациям американской коллекции типовых культур (ATCC) [26].

Инкубация клеток с экстрактами. В ячейки 96-луночного планшета вносили 100 мкл клеточной суспензии (5 000 клеток), инкубировали 24 часа при 37 °С и 5 % CO₂. Навеску экстракта из лишайника массой 40 мг растворяли в 2 мл диметилсульфоксида (ДМСО), центрифугировали (21000 g, 5 мин.), после чего 40 мкл раствора вносили в 2 мл полной инкубационной среды. Серийное разведение экстракта раствором инкубационной среды позволило получить градиент концентраций (мкг/мл): 400; 200; 100; 50; 25; 12,5; 6,25; 3,125 и 1,5625. Полученные растворы экстракта в количестве 100 мкл вносили в лунки планшета, содержащие 100 мкл питательной среды. Конечный градиент концентраций экстрактов из лишайников составил: 200; 100; 50; 25; 12,5; 6,25; 3,125; 1,5625 и 0,78125 (мкг/мл), наиболее высокая концентрация ДМСО (1 %) была в разведении 200 мкг/мл. Контроль выращивали в идентичной питательной среде без добавления экстрактов из лишайников. Время инкубации клеток с экстрактами из лишайников – 48 ч, суммарное время культивирования клеток в планшете – 72 часа. Инкубация проводилась в соответствии с рекомендацией протокола [27].

Определение метаболической активности клеток проводили с использованием МТТ-теста на скорость восстановления 3-[4,5-диметилтиазол-2-ил]-2,5-дифенилтетразолия бромид (МТТ, M5655, Sigma) [28]. После инкубации клеток с испытуемым экстрактом из лишайников питательную среду удаляли, дважды промывали ячейки фосфатно-солевым буфером, добавляли раствор питательной среды, содержащий 0,05 % МТТ, после чего два часа инкубировали клетки при 37 °С и 5 % CO₂. Инкубационную среду удаляли, вносили 200 мкл смеси этанол : ДМСО (1:1), содержимое перемешивали до полного растворения кристаллов формазана. Оптическую плотность раствора формазана измеряли при $\lambda = 570$ нм с использованием планшетного спектрофотометра TecanSafire II (США), для нормализации данных применяли измерения при $\lambda = 700$ нм.

Жизнеспособность клеток вычисляли по формуле:

$$\text{Жизнеспособность} = \left(\frac{OD_{570} \text{ контрольных лунок}}{OD_{570} \text{ опытной лунки}} \right) \times 100 \%,$$

где OD_{570} – оптическая плотность раствора формазана, измеренная при $\lambda = 570$ нм.

Анализ результатов исследования производили с помощью программных продуктов GraphPadPrism-Trial (Version 5.02) и MicrosoftExcel.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки противоопухолевой активности экстрактов из лишайников использовали три клеточные линии эпителиального происхождения: A-549 (карцинома легочного эпителия человека) [29], HeP-2C (линия-производная HeLa, карцинома эпителия шейки матки) [30], MCF-7 (линия рака молочной железы) [31]. В качестве культуры сравнения использовали спонтанно иммортализованную анеуплоидную линию кератиноцитов человека (HaCAT), являющуюся достаточно валидной моделью клеток кожи человека с хорошей воспроизводимостью результатов [32; 33].

Тест предполагал выявление наличия, или отсутствия культур-специфичного действия экстрактов из лишайников. В табл. 2 представлены результаты определения величин полуингибирующих концентраций экстрактов из лишайников на культуры клеток (IC₅₀).

Таблица 2

Цитотоксический эффект экстрактов из лишайников в отношении клеточных линий, оцененный с помощью МТТ-теста после 72 ч экспозиции (IC_{50} , мкг/мл)

Table 2

Cytotoxic effects of lichen extracts on cell lines assessed by MTT assay after 72 h exposure (IC_{50} , µg/ml)

Номер экстракта	A-549	HeP-2C	MCF-7	HaCAT
1	19,1±2,22	36,8±0,90	7,1±0,33	19,6±7,21
2	27,3±1,31	35,2±1,46	4,1±0,99	19,7±4,53
3	13,8±4,17	44,0±4,34	3,9±1,54	19,5±4,20
4	23,9±6,84	32,8±3,93	5,6±1,14	20,2±0,97
5	49,4±2,99	40,6±2,16	49,9±4,15	71,9±3,15
6	24,6±1,59	22,5±2,00	4,2±0,45	11,2±1,10
7	29,8±7,69	29,9±2,65	59,4±12,95	12,1±1,08

В качестве критерия цитотоксичности экстрактов из лишайников в отношении культур клеток использовали данные Национального института онкологии США (National cancer institute, NCI), согласно которым сырой экстракт считается активным при $IC_{50} < 30$ мкг/мл [12; 34]. В отношении культуры A-549 данному критерию удовлетворяют экстракты 3 и 1; HeP-2C – экстракт 6; MCF-7 – экстракты 1, 2, 3, 4 и 6; HaCAT – все экстракты, кроме № 5. Культура HeP-2C оказалась наиболее устойчивой к действию изученных экстрактов; в отношении культур MCF-7 и HaCAT большинство экстрактов были высоко токсичными. Экстракт № 5 из лишайника *Ramalina pollinaria* может быть назван нетоксичным в отношении трех изучаемых линий опухолевых клеток, а также линии эпителиальных клеток человека HaCAT.

Способы получения экстрактов влияют на химический состав последних, что проявилось в их цитотоксическом действии в тех случаях, когда разные экстракты были получены из биомассы одного и того же вида лишайников – экстракты 1, 2 и 3; 6 и 7. Так, предварительная холодная мацерация биомассы *Hypogymnia physodes* гексаном проявилась в виде повышенной цитотоксичности ацетонового экстракта в отношении клеточных культур A-549 и MCF-7, пониженной – в отношении HeP-2C. Использование этанола и ацетона в качестве экстрагентов для биомассы *Hypogymnia physodes* и *Cladonia arbuscula* мало влияло на величину IC_{50} A-549 (*Cladonia arbuscula*), HeP-2C (*Hypogymnia physodes*) и HaCAT (*Hypogymnia physodes* и *Cladonia arbuscula*). Ацетоновые экстракты из *Hypogymnia physodes* и *Cladonia arbuscula* были эффективнее этанольных в отношении клеток MCF-7. Этанольные экстракты из *Hypogymnia physodes* были эффективнее ацетоновых в отношении клеток A-549. Наборы вторичных метаболитов *Hypogymnia physodes* и *Cladonia arbuscula* таковы, что в выбранных нами условиях экстрагирования извлекается лишь определенный набор этих веществ, а также комплекс других соединений, растворяющихся в этаноле, или ацетоне. При растворении экстрактов в ДМСО в раствор переходят лишь определенные фракции, оказывающие цитотоксическое действие. В этом смысле требует отдельного изучения действие экстракта 6 на культуру MCF-7 ($IC_{50} = 4,2 \pm 0,45$). Если считать, что главным вторичным метаболитом *Cladonia arbuscula* является усниновая кислота, то следует признать, что в данном случае из биомассы лишайника извлечено иное, биологически очень активное вещество, так как усниновая кислота в ацетоне практически не растворяется.

Зависимости жизнеспособности клеток от концентрации экстрактов из лишайников для клеточных линий A-549 и HeP-2C удовлетворительно описываются S-образными кривыми с коэффициентами аппроксимации $0,89 \div 0,95$ и $0,88 \div 0,95$, соответственно, – рис. 1 (а, б).

Для клеточной линии A-549 в диапазоне концентраций экстрактов 5 и 7 1–10 мкг/мл можно выделить зону умеренной стимуляции метаболизма клеток, за которой следует зона ингибирования жизнеспособности (рис. 1а). Эффект «стимуляции» метаболизма клеток может быть связан с увеличением проницаемости клеточных мембран, что в используемом нами тесте дает повышенную выработку формазана, по концентрации которого судят о метаболической активности. Под действием экстрактов 1, 3 и 4 IC_{10} достигался при концентрациях менее 1 мкг/мл, а IC_{90} – при концентрациях около 150 мкг/мл. Схожим было действие экстрактов 2 и 6: при близких значениях IC_{50} величины IC_{10} составлял 7,7 мкг/мл и 6,5 мкг/мл соответственно; IC_{90} – 40,6 мкг/мл и 39,4 мкг/мл соответственно.

Экстракт 4 оказывал схожее действие на клеточные линии A-549 и HeP-2C (рис. 1, а, б). Имел место отчетливый двухфазный клеточный ответ, выразившийся в 30–40 % ингибировании метаболической активности при концентрациях экстракта из лишайника около 1 мкг/мл, переходящем в плато на кривой с незначительным изменением жизнеспособности вплоть до концентраций свыше 10 мкг/мл, после чего значения IC_{90} достигались при концентрациях экстракта 148,5 мкг/мл и 71,3 мкг/мл соответственно.

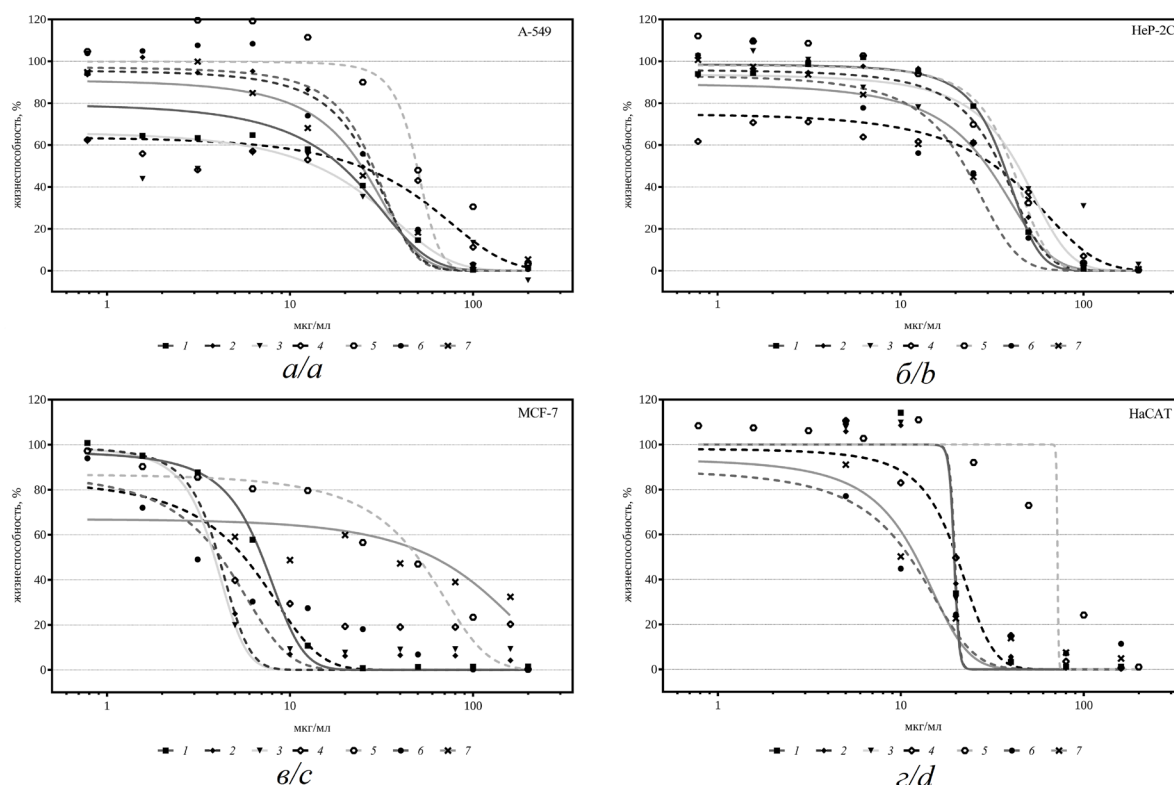


Рис. 1. Влияние концентрации экстрактов из лишайников на жизнеспособность культур клеток

Fig.1. Effect of lichen extracts concentration on the cell cultures viability

Для клеточной линии HeP-2C при действии экстрактов 1, 2, 3, 5, 6 и 7 установлены довольно близкие значения IC_{10} ($4,9 \div 14,3$) и IC_{90} ($32,4 \div 58,8$). После достижения концентраций полунингибирования клеточных культур увеличение содержания экстрактов из лишайников в среде культивирования на 20–60 процентов вызывает полное подавление жизнедеятельности клеток.

Такую особенность воздействия можно попытаться объяснить наличием в данных культурах специфичной мишени, которая реагирует на воздействие в малых дозах одного из компонентов экстракта из лишайника (скорее всего – присутствующего в наибольшем количестве). Фаза полного ингибирования жизнеспособности клеток может быть связана с вовлечением в процесс подавления их жизнедеятельности минорных вторичных метаболитов лишайника, концентрация которых градиентно возрастала.

Для линии MCF-7 имело место выраженное ингибирование метаболической активности клеток в диапазоне концентраций экстрактов из лишайников 1–3 мкг/мл (рис. 1в). Под действием всех изучаемых экстрактов значения IC_{10} достигались при концентрациях до 2,7 мкг/мл. Для культур, культивируемых в присутствии экстрактов 1, 2, 3, 4 и 6 величины IC_{50} и IC_{90} отличались на $16,9 \div 36,6$ %, то есть падение жизнеспособности клеток было стремительным и достигало 90 % при концентрациях экстрактов $8,3 \div 12,5$ мкг/г. Исключением были экстракты 5 и 7, для которых величины IC_{90} превышали 100 мкг/г.

Для линии HaCAT характер цитотоксического действия экстрактов из лишайников отличался. Так, экстракты 1, 2 и 3 оказывали практически одинаковое действие на клеточные культуры ($IC_{10} = 18,4 \div 18,6$ мкг/мл; $IC_{90} = 20,6 \div 20,8$ мкг/мл). Для экстрактов 4, 6 и 7 величины IC_{10} составили 9,2 мкг/мл, 2,3 мкг/мл и менее 1 мкг/мл при $IC_{90} = 20,4 \div 31,6$ мкг/мл. Исключением был экстракт 5, для которого $IC_{10} = 67,4$ мкг/мл, $IC_{90} = 75,6$ мкг/мл.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии выраженного культур-специфического действия экстрактов из лишайников. По степени чувствительности к экстрактам из лишайников тестируемые

культуры клеток можно расположить в ряд: MCF-7 > A-549 > HeP-2C. Примененная в настоящем исследовании методика дает возможность получить лишь общий показатель метаболической активности популяции клеток, не позволяющий судить о механизмах действия экстрактов из лишайников, и связанной с ними культур-специфичности. Поэтому упомянем о некоторых особенностях каждой культуры клеток, которые могут быть связанными с механизмами реализации клеточного ответа на действие экстрактов из лишайников. Так, у самой чувствительной из клеточных культур – MCF-7 – обнаружено наличие рецепторов для фактора некроза опухоли (ФНО-альфа), и при воздействии на данные рецепторы наблюдается внешне опосредованный апоптоз клеток данной линии [35]. Данная линия является эстроген-зависимой и существует ряд работ, показывающих, что воздействие на клетки антиэстрогенными веществами (в том числе – флавоноидами), может также подавлять жизнеспособность и рост опухоли [36; 37]. Следующая по чувствительности культура (A-549) способна экспрессировать немутантные белки-онкосупрессоры (p53, pRb) [38; 39], что может свидетельствовать о нормальном течении апоптоза в данных клетках при повреждении или дисфункции генетического аппарата [40]. Данные по самой устойчивой линии HeP-2C весьма немногочисленны. Данная клеточная линия является производной от культуры HeLa [41]. Это позволяет предположить, что она несет некоторые характеристики материнской линии. Работы [42–44] свидетельствуют, что растительные экстракты способны подавлять жизнеспособность клеток HeLa. Основным механизмом, по мнению авторов, является остановка клеточного цикла в G2/M фазе, а также индукция апоптоза, главным образом за счет полифенольных соединений.

Полученные данные подтверждают наличие выраженного токсического действия экстрактов из распространенных в Беларуси видов лишайников на культуры опухолевых клеток. Определенные нами значения IC_{50} согласуются с данными других исследователей, полученных на схожих культурах клеток для экстрактов из тех же и родственных видов лишайников [12–16]. Вместе с тем в работе [14] для ацетонового экстракта из *Hypogymnia physodes*, полученного особым способом, определенная величина IC_{50} в отношении культуры MCF-7 составляла $110,4 \pm 21,3$ мкг/мл. Это может доказывать отличия составов вторичных метаболитов представителей лишайнофлоры различных географических широт, но может также служить подтверждением соображений, изложенных выше.

Представляется целесообразным оценить цитотоксическую активность экстрактов из лишайников в отношении неопухолерогенной линии эпидермальных клеток человека для определения специфичности действия экстрактов.

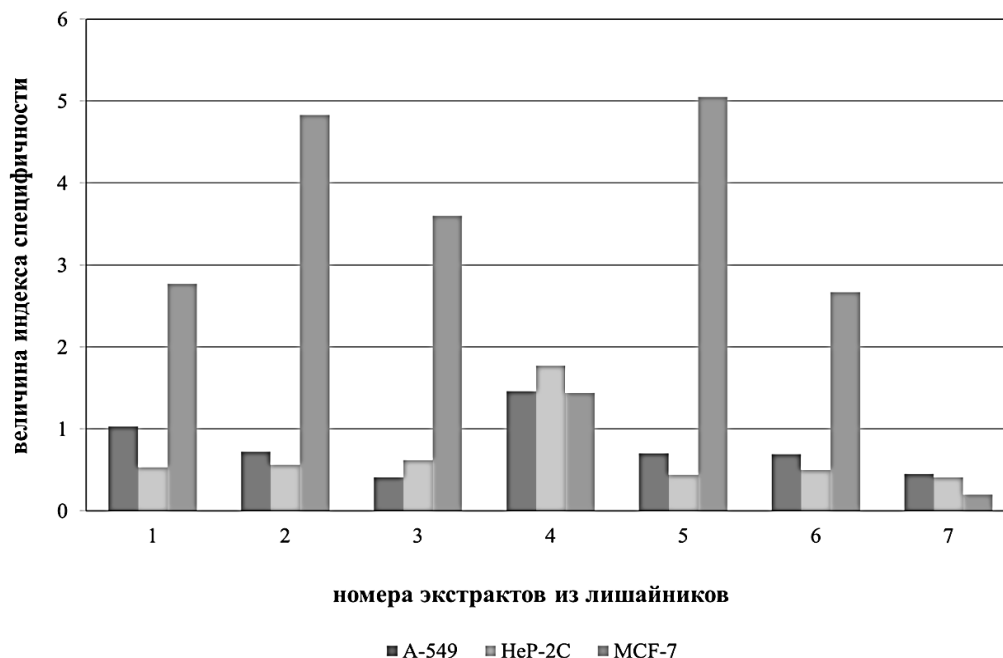


Рис. 2. Специфичность действия экстрактов из лишайников на опухолевые линии клеток

Fig. 2. Specificity of the effect of extracts from lichens on tumor cell lines

Индекс специфичности цитотоксического действия экстрактов из лишайников (ИС) вычисляли как отношение величин полуингибирующих концентраций (рис. 2) [13]:

$$ИС = \frac{IC_{50}(HaCAT)}{IC_{50}(X)},$$

где $IC_{50}(HaCAT)$ – величина полуингибирующей концентрации экстрактов из лишайников в отношении неопухолегенной линии клеток;

$IC_{50}(X)$ – величина полуингибирующей концентрации экстрактов из лишайников в отношении опухолегенной линии клеток.

Таким образом, специфичность цитотоксического действия экстрактов из лишайников *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* и *Cladonia arbuscula* проявилась в отношении линии клеток рака молочной железы (MCF-7). При высокой токсичности (IC_{50} 3,9÷7,1 мкг/мл) экстрактов величины индекса специфичности составили 1,4÷5,1. В отношении клеточных культур А-549 и HeP-2С экстракты с выраженным токсическим действием ($IC_{50} < 30,0$ мкг/мл) специфичностью не отличались ($ИС \leq 1,0$).

Экстракт из лишайника *Ramalina pollinaria*, не будучи высоко токсичным (IC_{50} 40,6÷49,4 мкг/мл), отличался выраженной специфичностью в отношении культур опухолевых клеток (ИС 1,5÷1,8).

Полученные результаты свидетельствуют о наличии цитотоксической активности экстрактов из лишайников *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri*, *Ramalina pollinaria* и *Cladonia arbuscula* в отношении опухолевых и стабильных клеточных линий.

Заключение

Установлено, что полученные различными способами ацетоновые и этанольные экстракты из распространенных в лесах Беларуси лишайников *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* и *Cladonia arbuscula* характеризуются *in vitro* высокой цитотоксичностью в отношении опухолевых и стабильных клеточных линий. Наиболее эффективными в отношении клеток культуры А-549 были экстракты из *Hypogymnia physodes*; в отношении HeP-2С – экстракты из *Cladonia arbuscula*, в отношении MCF-7 и HaCAT – экстракты из *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* и *Cladonia arbuscula*. Экстракт из лишайника *Ramalina pollinaria* был нетоксичен в отношении культур опухолевых клеток А-549, HeP-2С и MCF-7, а также неопухолегенной линии эпителиальных клеток человека HaCAT. Специфичность цитотоксического действия экстрактов из лишайников *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* и *Cladonia arbuscula* проявилась в отношении клеток линии MCF-7. Экстракт из лишайника *Ramalina pollinaria* при $IC_{50} = 40,6 \div 49,4$ мкг/мл отличался выраженной специфичностью действия в отношении культур опухолевых клеток (ИС 1,5 ÷ 1,8). Экстракты из лишайников, по-видимому, являются перспективными субстанциями для получения противоопухолевых препаратов на основе природного сырья.

Библиографические ссылки

1. Upreti D. K., Divakar P. K., Shukla V., et al., Recent Advances in Lichenology: in 2 vol. Vol. 2. New Delhi, 2015.
2. Ranković, B. Lichen secondary metabolites: bioactive properties and pharmaceutical potential. Heidelberg; New York; London, 2015.
3. Huneck S., Yoshimura. I. Identification of lichen substances. Berlin; Heidelberg, 1996.
4. Nash III T. H. Lichen biology. Cambridge, 1999.
5. Shukla V., Upreti D. K., Bajpai R. Lichens to Biomonitor the Environment. Springer; India, 2014.
6. Shukla V., Joshi G. P., Rawat M. S. Lichens as a potential natural source of bioactive compounds: a review // Phytochemistry Reviews. 2010. Vol. 9, № 2. P. 303–314.
7. Molnar K. Farkas E. Current results on biological activities of lichen secondary metabolites: a review // Z. Naturforsch. 2010. Vol. 65. P. 157–173.
8. Bhattacharyya S., Deep P. R., Singh S., et al. Lichen Secondary Metabolites and Its Biological Activity // American J. of Pharm-Tech Research. 2016. Vol. 6, № 6. P. 29–44.
9. Boustie, J. Grube M. Lichens – a promising source of bioactive secondary metabolites // Plant Genetic Resources. 2005. Vol. 3, № 2. P. 273–287.
10. Shrestha G., Clair L. L. S. Lichens: a promising source of antibiotic and anticancer drugs // Phytochemistry reviews. 2013. Vol. 12, № 1. P. 229–244.
11. Gomez-Serranillos M. P., Fernández-Moriano C. González-Burgos E., et al. Parmeliaceae family: phytochemistry, pharmacological potential and phylogenetic features // RSC Adv. 2014. Vol. 4. P. 59017–59047.
12. Mitrović T., Stamenković S., Cvetković V., et al. Antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of five lichen species // International J. of Molecular Sciences. 2011. Vol. 12, № 8. P. 5428–5448.
13. Bezivin C., Tomasi S., Lohezic-Le Devehat F. et al. Cytotoxic activity of some lichen extracts on murine and human cancer cell lines // Phytomedicine. 2003. Vol. 10, № 6–7. P. 499–503.

14. Studzińska-Sroka E., Piotrowska H., Kucińska M., et al. Cytotoxic activity of physodic acid and acetone extract from *Hypogymnia physodes* against breast cancer cell lines // Pharmaceutical biology. 2016. Vol. 54, № 11. P. 2480–2485.
15. Ari F., Celikler S., Oran S., et al. Genotoxic, cytotoxic, and apoptotic effects of *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. on breast cancer cells // Environmental toxicology. 2014. Vol. 29, № 7. P. 804–813.
16. Triggiani D., Ceccarelli D., Tiezzi A., et al. Antiproliferative activity of lichen extracts on murine myeloma cells // Biologia. 2009. Vol. 64, № 1. P. 59–62.
17. Smith C.W., Aptroot A., Coppins B. J., et al. The Lichens of Great Britain and Ireland. 2nd ed. London, 2009.
18. Копачевская Е. Г., Макаревич М. Ф., Окснер А. Н. и др. Определитель лишайников СССР. Вып. 1. Пергузариевые, Леканоровые, Пармелиевые. Л., 1971.
19. Вайнштейн Е. А., Равинская А. П., Шаниро И. А. Справочное пособие по хемотаксономии лишайников: метод. пособие. Л., 1990.
20. Molnar K., Farkas E. Depsides and depsidones in populations of the lichen *Hypogymnia physodes* and its genetic diversity // Ann. Bot. Fennici. 2011. Vol. 48. P. 473–482.
21. Голубкова Н. С., Домбровская А. В., Журбенко М. П. и др. Определитель лишайников России. Вып. 6. Алекториевые, Пармелиевые, Стереокаулоновые. СПб., 1996.
22. Kosanić M., Manojlović N., Janković S., et al. *Evernia prunastri* and *Pseudoevernia furfuracea* lichens and their major metabolites as antioxidant, antimicrobial and anticancer agents // Food Chem. Toxicol. 2013. Vol. 53. P. 112–118.
23. Андреев М. П., Гимельбрант Д. Е., Голубкова Н. С. и др. Определитель лишайников России. Вып. 10. Agyriaceae, Anamyloporaceae, Anaphoraceae, Arthrorhaphidaceae, Brigiaceae, Chrysotrichaceae, Clavariaceae, Ectolechiaceae, Gomphillaceae, Gypsoplacaceae, Lecanoraceae, Lecideaceae, Mycoblastaceae, Phlyctidaceae, Physciaceae, Pilocarpaceae, Psoraceae, Ramalinaceae, Stereocaulaceae, Vezdaeaceae, Tricholomataceae. СПб., 2008.
24. Голубкова Н. С., Савич, В. П., Трасс Х. Х. Определитель лишайников СССР. Вып. 5. Кладониевые – Акароспоровые. Л., 1978.
25. Воскресенский П. И. Техника лабораторных работ. М., 1973.
26. American Type Culture Collection [Электронный ресурс]. 2018. URL: <https://www.atcc.org> (дата обращения: 09.01.2018).
27. Langdon Simon P. Cancer Cell Culture: Methods and Protocols (Methods in Molecular Medicine). London, 2010.
28. Berridge M. V., Herst P. M., Tan A. S. Tetrazolium dyes as tools in cell biology: new insights into their cellular reduction // Biotechnology annual review. 2005. Vol. 11. P. 127–152.
29. Giard D. J., Aaronson S. A., Todaro G. J., et al. In Vitro Cultivation of Human Tumors: Establishment of Cell Lines Derived From a Series of Solid Tumors 2 // J. of the National Cancer Institute. 1973. Vol. 51, № 5. P. 1417–1423.
30. Moore A. E., Sabachewsky L., Toolan H. W. Culture characteristics of four permanent lines of human cancer cells // Cancer Research. 1955. Vol. 15, № 9. P. 598–602.
31. Soule H. D., Vazquez A., Long A., et al. A human cell line from a pleural effusion derived from a breast carcinoma // J. Nat. Cancer Inst. 1973. Vol. 51. P. 1409–1413.
32. Colegate Steven M., Molyneux Russell J. Bioactive Natural Products: Detection, Isolation, and Structural Determination. London, 2009.
33. Schoop V. M., Fusenig N. E., Mirancea N. Epidermal organization and differentiation of HaCaT keratinocytes in organotypic culture with human dermal fibroblasts // J. of investigative dermatology. 1999. Vol. 112, № 3. P. 343–353.
34. Itharat A., Houghton P.J., Eno-Amooquaye E., et al. In vitro cytotoxic activity of Thai medicinal plants used traditionally to treat cancer // J. Ethnopharmacol. 2004. Vol. 90. P. 33–38.
35. Sugarman B. J., Aggarwal B. B., Hass P. E., et al. Recombinant human tumor necrosis factor-alpha: effects on proliferation of normal and transformed cells in vitro // Science. 1985. Vol. 230. P. 943–945.
36. Gottardis M. M., Jiang, S. Y., Jeng, M. H., et al. Inhibition of tamoxifen-stimulated growth of an MCF-7 tumor variant in athymic mice by novel steroidal antiestrogens // Cancer Research. 1989. Vol. 49, № 15. P. 4090–4093.
37. So F. V., Guthrie N., Chambers A. F., et al. Inhibition of proliferation of estrogen receptor-positive MCF-7 human breast cancer cells by flavonoids in the presence and absence of excess estrogen // Cancer letters. 1997. Vol. 112, № 2. P. 127–133.
38. Alexander B., Niculescu III, Chen X., Smeets M., et al. Effects of p21Cip1/Waf1 at both the G1/S and the G2/M cell cycle transitions: pRb is a critical determinant in blocking DNA replication and in preventing endoreduplication // Molecular and cellular biology. 1998. Vol. 18, № 1. P. 629–643.
39. Rom W. N., Hay J. G., Lee T. C., et al. Molecular and genetic aspects of lung cancer // Lung Cancer. 2003. Vol. 2. P. 3–26.
40. Elmore S. Apoptosis: a review of programmed cell death // Toxicologic pathology. – 2007. Vol. 35, № 4. P. 495–516.
41. ECACC General Cell Collection: Hep-2C (HeLa derivative) [Электронный ресурс]. 2018. URL: https://www.phe-culturecollections.org.uk/products/celllines/generalcell/detail.jsp?refId=85020207&collection=ecacc_gc. (дата обращения: 09.01.2018).
42. Kim H., Mosaddik A., Gyawali R., et al. Induction of apoptosis by ethanolic extract of mango peel and comparative analysis of the chemical constituents of mango peel and flesh // Food chemistry. 2012. Vol. 133, № 2. P. 416–422.
43. Patel S., Gheewala N., Suthar A., et al. In-vitro cytotoxicity activity of *Solanum nigrum* extract against Hela cell line and Vero cell line // International J. of pharmacy and pharmaceutical sciences. 2009. Vol. 1. № 1. P. 38–46.
44. Zhang Q., Zhang F., Thakur K., et al. Molecular mechanism of anti-cancerous potential of Morin extracted from mulberry in Hela cells // Food and Chemical Toxicology. 2017. Vol. 112. P. 466–475.

References

1. Upreti D. K., Divakar P. K., Shukla V., et al., Recent Advances in Lichenology: in 2 vol. Vol. 2. New Delhi, 2015.
2. Ranković, B. Lichen secondary metabolites: bioactive properties and pharmaceutical potential. Heidelberg; New York; London, 2015.
3. Huneck S., Yoshimura. I. Identification of lichen substances. Berlin; Heidelberg, 1996.
4. Nash III T.H. Lichen biology. Cambridge, 1999.
5. Shukla V., Upreti D. K., Bajpai R. Lichens to Biomonitor the Environment. Springer; India, 2014.

6. Shukla V., Joshi G. P., Rawat M. S. Lichens as a potential natural source of bioactive compounds: a review. *Phytochemistry Reviews*. 2010. Vol. 9, No. 2. P. 303–314.
7. Molnar K., Farkas E. Current results on biological activities of lichen secondary metabolites: a review. *Z. Naturforsch.* 2010. Vol. 65. P. 157–173.
8. Bhattacharyya S., Deep P. R., Singh S., et al. Lichen Secondary Metabolites and Its Biological Activity. *American J. of Pharm-Tech Research*. 2016. Vol. 6, No. 6. P. 29–44.
9. Boustie, J. Grube M. Lichens – a promising source of bioactive secondary metabolites. *Plant Genetic Resources*. 2005. Vol. 3, No. 2. P. 273–287.
10. Shrestha G., Clair L. L. S. Lichens: a promising source of antibiotic and anticancer drugs. *Phytochemistry reviews*. 2013. Vol. 12, No. 1. P. 229–244.
11. Gomez-Serranillos M. P., Fernández-Moriano C., González-Burgos E., et al. Parmeliaceae family: phytochemistry, pharmacological potential and phylogenetic features. *RSC Adv.* 2014. Vol. 4. P. 59017–59047.
12. Mitrović T., Stamenković S., Cvetković V., et al. Antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of five lichen species. *International Journal of Molecular Sciences*. 2011. Vol. 12, No. 8. P. 5428–5448.
13. Bezivin C., Tomasi S., Lohezic-Le Devehat F., et al. Cytotoxic activity of some lichen extracts on murine and human cancer cell lines. *Phytomedicine*. 2003. Vol. 10, No. 6–7. P. 499–503.
14. Studzińska-Sroka E., Piotrowska H., Kucińska M., et al. Cytotoxic activity of physodic acid and acetone extract from *Hypogymnia physodes* against breast cancer cell lines. *Pharmaceutical biology*. 2016. Vol. 54, No. 11. P. 2480–2485.
15. Ari F., Celikler S., Oran S., et al. Genotoxic, cytotoxic, and apoptotic effects of *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. on breast cancer cells. *Environmental toxicology*. 2014. Vol. 29, No. 7. P. 804–813.
16. Triggiani D., Ceccarelli D., Tiezzi A., et al. Antiproliferative activity of lichen extracts on murine myeloma cells. *Biologia*. 2009. Vol. 64, No. 1. P. 59–62.
17. Smith C.W., Aptroot A., Coppins B. J., et al. The Lichens of Great Britain and Ireland. 2nd ed. London, 2009.
18. Kopachevskaya E. G., Makarevich M. F., Oksner A. N., et al. [Determinant of lichens of the USSR. Issue. 1. Pertusariaceae, Lecanoraceae, Parmeliaceae]. Leningrad, 1971 (in Russ.).
19. Vajnshtejn E. A., Ravinskaya A. P., Shapiro I. A. [A reference guide on the chemotaxonomy of lichens (methodical manual)]. Leningrad, 1990 (in Russ.).
20. Molnar, K. Depsides and depsidones in populations of the lichen *Hypogymnia physodes* and its genetic diversity. *Ann. Bot. Fennici*. 2011. Vol. 48. P. 473–482.
21. Golubkova N. S., Dombrovskaya A. V., Zhurbenko M. P. et al. [Determinant of lichens of the USSR. Issue. 6. Alectoriaceae, Parmeliaceae, tereocaulaceae]. St.-Petersburg. 1996 (in Russ.).
22. Kosanić M., Manojlović N., Janković S., et al. *Evernia prunastri* and *Pseudoevernia furfuracea* lichens and their major metabolites as antioxidant, antimicrobial and anticancer agents. *Food Chem. Toxicol.* 2013. Vol. 53. P. 112–118.
23. Andreev M. P., Gimelbrant D. E., Golubkova N. S., et al. [Determinant of lichens of Russia. Issue. 10. Agyriaceae, Anamylopsoraceae, Aphanopsidaceae, Arthrorhaphidaceae, Brigantiaeaceae, Chrysotrichaceae, Clavariaceae, Ectolechiaceae, Gomphillaceae, Gypsoplacaceae, Lecanoraceae, Lecideaceae, Mycoblastaceae, Phlyctidaceae, Physciaceae, Pilocarpaceae, Psoraceae, Ramalinaceae, Stereocaulaceae, Vezdaeaceae, Tricholomataceae]. St.-Petersburg, 2008 (in Russ.).
24. Golubkova N. S., Savich, V. P., Trass X. X. [Determinant of lichens of the USSR. Issue. 5. Cladoniaceae – Acarosporaceae]. Leningrad, 1978 (in Russ.).
25. Voskresenskij P. I. [Technique of laboratory works]. Moscow, 1973 (in Russ.).
26. American Type Culture Collection [Electronic resource]. 2018. URL: <https://www.atcc.org> (data of access: 09.01.2018).
27. Langdon Simon P. Cancer Cell Culture: Methods and Protocols (Methods in Molecular Medicine). London, 2010.
28. Berridge M. V., Herst P. M., Tan A. S. Tetrazolium dyes as tools in cell biology: new insights into their cellular reduction. *Biotechnology annual review*. 2005. Vol. 11. P. 127–152.
29. Giard D. J., Aaronson S. A., Todaro G. J., et al. In Vitro Cultivation of Human Tumors: Establishment of Cell Lines Derived From a Series of Solid Tumors 2. *J. of the National Cancer Institute*. 1973. Vol. 51, No. 5. P. 1417–1423.
30. Moore, A. E., Sabachewsky L., Toolan H. W. Culture characteristics of four permanent lines of human cancer cells. *Cancer Research*. 1955. Vol. 15, No. 9. P. 598–602.
31. Soule H. D., Vazquez A., Long A., Brennan M. A human cell line from a pleural effusion derived from a breast carcinoma. *J. Nat. Cancer Inst.* 1973. Vol. 51. P. 1409–1413.
32. Colegate Steven M., Molyneux Russell J. Bioactive Natural Products: Detection, Isolation, and Structural Determination. London, 2009.
33. Schoop V. M., Fusenig N. E., Mirancea N. Epidermal organization and differentiation of HaCaT keratinocytes in organotypic culture with human dermal fibroblasts. *J. of investigative dermatology*. 1999. Vol. 112, No. 3. P. 343–353.
34. Itharat A., Houghton P. J., Eno-Amooquaye E., et al. In vitro cytotoxic activity of Thai medicinal plants used traditionally to treat cancer. *J. Ethnopharmacol.* 2004. Vol. 90. P. 33–38.
35. Sugarman, B. J., Aggarwal B. B., Hass P. E., et al. Recombinant human tumor necrosis factor-alpha: effects on proliferation of normal and transformed cells in vitro. *Science*. 1985. Vol. 230. P. 943–945.
36. Gottardis, M. M., Jiang, S. Y., Jeng, M. H., et al. Inhibition of tamoxifen-stimulated growth of an MCF-7 tumor variant in athymic mice by novel steroidal antiestrogens. *Cancer Research*. 1989. Vol. 49, No. 15. P. 4090–4093.
37. So F. V., Guthrie N., Chambers A. F., et al. Inhibition of proliferation of estrogen receptor-positive MCF-7 human breast cancer cells by flavonoids in the presence and absence of excess estrogen. *Cancer letters*. 1997. Vol. 112, No. 2. P. 127–133.
38. Alexander B., Niculescu III, Chen X., Smeets M., et al. Effects of p21Cip1/Waf1 at both the G1/S and the G2/M cell cycle transitions: pRb is a critical determinant in blocking DNA replication and in preventing endoreduplication. *Molecular and cellular biology*. 1998. Vol. 18, No. 1. P. 629–643.
39. Rom W. N., Hay J. G., Lee T. C., et al. Molecular and genetic aspects of lung cancer. *Lung Cancer*. 2003. Vol. 2. P. 3–26.
40. Elmore S. Apoptosis: a review of programmed cell death. *Toxicologic pathology*. 2007. Vol. 35, No. 4. P. 495–516.
41. ECACC General Cell Collection: Hep-2C (HeLa derivative) [Electronic resource]. 2018. URL: https://www.phe-culturecollections.org.uk/products/celllines/generalcell/detail.jsp?refId=85020207&collection=ecacc_gc. (data of access: 09.01.2018).

42. Kim H., Mosaddik A., Gyawali R., et al. Induction of apoptosis by ethanolic extract of mango peel and comparative analysis of the chemical constituents of mango peel and flesh. *Food chemistry*. 2012. Vol. 133, No. 2. P. 416–422.
43. Patel S., Gheewala N., Suthar A., et al. In-vitro cytotoxicity activity of *Solanum nigrum* extract against Hela cell line and Vero cell line. *International J. of pharmacy and pharmaceutical sciences*. 2009. Vol. 1. No. 1. P. 38–46.
44. Zhang Q., Zhang F., Thakur K., et al. Molecular mechanism of anti-cancerous potential of Morin extracted from mulberry in Hela cells. *Food and Chemical Toxicology*. 2017. Vol. 112. P. 466–475.

Статья поступила в редколлегию 10.05.2018
Received by editorial board 10.05.2018

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 699.86; 628.89;504.054;504.75.05;551.584.61

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ БОРА В ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

А. И. ДУБАТОВКА¹⁾

¹⁾*Институт жилища – НИПТИС им. С. С. Атаева, ул. Ф. Скорины, 15, 220114, г. Минск, Беларусь*

Целлюлозная изоляция (далее – ЦИ) отечественных производителей содержит в большом количестве добавки соединений бора. Проведен обзор литературы по вопросам безопасности применения ЦИ в ходе его жизненного цикла. На основании иностранных исследований дана оценка возможности превышения ПДК соединений бора при работе с ЦИ и эксплуатации. Учитывая отечественные реалии, рекомендуется произвести исследование экологической безопасности жизненного цикла ЦИ.

Ключевые слова: целлюлозная изоляция; эковата; соединения бора; экологическая безопасность; органические волокнистые материалы; изоляционные материалы; оценка жизненного цикла.

ENVIRONMENTAL SAFETY OF BORON COMPOUNDS IN CELLULOSE INSULATION

A. I. DUBATOUKA^a

^a*Institute of Housing – NIPTIS named after S. S. Ataeva, F. Skoriny street, 15, 220114, Minsk, Belarus*

Образец цитирования:

Дубатовка А. И. Экологическая безопасность соединений бора в целлюлозной изоляции // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 99–109.

For citation:

Dubatouka A. I. Environmental safety of boron compounds in cellulose insulation. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 99–109 (in Russ.).

Авторы:

Дубатовка Антон Игоревич – магистр технических наук; аспирант, инженер-строитель.

Authors:

Anton I. Dubatouka, PhD student, master of engineering sciences, structural engineer.
a.dubatouka@gmail.com

Cellulose insulation (CI) of domestic manufacturers contains additives of boron compounds in large quantities. A review of the literature on the safety of the use of the CI in the course of its life cycle was conducted. On the basis of data from foreign studies, was made an assessment of the possibility of exceeding the maximum allowable concentration of boron compounds when working with the CI and its operation. Taking into account domestic realities it is recommended to conduct a study on the environmental safety of the life cycle of CI.

Key words: cellulose insulation; boron compounds; environmental safety; organic fibrous materials; insulating materials; life cycle assessment.

Введение

В связи с действием технического регламента ТР 2009/013/ВУ¹ при проектировании и строительстве следует производить экологическую оценку применяемых материалов, которая должна учитывать общее воздействие на окружающую среду на протяжении жизненного цикла стройматериала, включая его влияние на микроклимат в помещении. Поэтому вопрос экологической безопасности целлюлозной изоляции (далее – ЦИ) актуален и поднимается в ряде интернет-источниках^{2,3,4}. Основную озабоченность вызывает большое количество химических веществ в ЦИ (500...1000 кг соединений бора в одно-семейном доме) и неопределенность вопроса будущей утилизации домов с ЦИ [1].

Существуют опасения, что в случае неорганизованного сноса зданий, борсодержащие добавки в ЦИ могут попасть в почву и грунтовые воды, что приведет в дальнейшем к появлению эндемических заболеваний по бору, к которым медицинская диагностика не будет готова по причине нетривиальности анамнеза и технической сложности выявления бора в организме человека⁵.

Материалы и методы исследования

ЦИ (эковата) – это органический рыхлый коротковолокнистый изоляционный материал серого цвета, представляющий собой смесь из целлюлозных волокон (около 80–92 % по массе) и добавок – фунгицидов и антипиренов, которые используются для предотвращения появления плесени и улучшения огнезащитных свойств.

Целлюлозные волокна получают механическим измельчением газетной бумаги и макулатуры до однородной массы малой плотности. Химический состав и физическая форма ЦИ отличается от чистой целлюлозы (обзор технических свойств целлюлозной изоляции представлен в отдельной публикации).

Частицы печатной краски в макулатуре, используемой для изготовления ЦИ, являются потенциальным источником тяжелых металлов, которые могут загрязнять окружающую среду и представлять опасность для живых организмов.

В табл. 1 (графа 5–6) справочно приведены референтные значения для основных тяжелых металлов. Референтная доза/концентрация по Р 2.1.10.1920-04⁶ – суточное воздействие химического вещества в течение всей жизни, которое устанавливается с учетом всех имеющихся современных научных данных и, вероятно, не приводит к возникновению неприемлемого риска для здоровья чувствительных групп населения.

Согласно П-ООС 17.02-05-2016⁷, концентрации тяжелых металлов в сточных водах от переработки макулатуры являются, как правило, достаточно низкими (см. табл. 1, графа 4). Исходя из этого можно сделать вывод, что и в газетной бумаге содержание тяжелых металлов будет невелико.

Содержание тяжелых металлов в газетной бумаге по данным [2] приведено табл. 1, графа 2. По результатам исследования сделан вывод, что переработанная газетная бумага обладает низкой токсичностью и она рекомендована к использованию в животноводстве в качестве подстилки для животных.

¹ ТР 2009/013/ВУ*. Технический регламент Республики Беларусь. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность.

² Письменский В. Д. Эковата без прикрас. URL: <http://forum.vashdom.ru/attachments/ekovata-i-ekologia-pdf.20291/> (дата обращения: 26.01.2018).

³ Ракушев А. В. Федеральный проект ЭкоСРед в Иванове. URL: <http://ivanovo.spravedlivo.ru/005152603.html>. (дата обращения: 06.02.2018).

⁴ G-PMC Registrars Declines To Certify Cellulose Insulation Contractors and Manufacturers. URL: <http://www.g-pmc.com/g-pmc-registrars-declines-to-certify-cellulose-insulation-contractors-and-manufacturers/> (date of access: 08.02.2018).

⁵ «Экологичность» эковаты / Строительный форум ВашДом.RU. URL: <http://forum.vashdom.ru/threads/ehkologichnost-ehkovaty.48420/> (дата обращения: 26.01.2018).

⁶ Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду.

⁷ П-ООС 17.02-05-2016. Охрана окружающей среды и природопользование. Наилучшие доступные технические методы для целлюлозно-бумажной промышленности.

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в сырье для целлюлозной изоляции

Table 1

The content of toxic heavy metals in raw materials for cellulose insulation

Тяжелые металлы, мг/кг	Газетная бумага [2]	ПДК по экомаркировке natureplus ²	Концентрации в шламе от удаления печатных красок из макулатуры ²	RfC, мг/м ³	RfD, мг/кг
1	2	3	4	5	6
Cd Кадмий	0,12	0,5	0,02–1,54	0,00002	0,0005
Cr Хром	4,35	10	4,8...96,6	0,0001	0,005
Hg Ртуть	–	0,2	0,1...0,89	0,0003	0,0003
Pb Свинец	0,89	10	9,5...79,4	0,0005	0,0035

Примечание. RfC, мг/м³ – референтная концентрация для хронического ингаляционного воздействия; RfD, мг/кг – референтная доза при хроническом пероральном поступлении.

Таким образом, вопрос наличия тяжелых металлов в ЦИ не должен вызывать особого беспокойства, что не отменяет необходимость контроля по ним сырья или готовой продукции.

Доля химических добавок в составе ЦИ в разных странах и у разных производителей различается [3; 4].

Если ранее в США в составе ЦИ присутствовало 20–25 % борсодержащих добавок [5], то на сегодняшний день их добавляют 8–15 % (до 5–10 % борной кислоты и до 10 % буры или солей аммония)³.

В Европейском союзе (далее – ЕС) в настоящее время используются только два основных типа смесей ЦИ: преобладают составы на основе бора (борная кислота и бура) примерно 95 % рынка, и менее 5 % используют соли аммония [6]. Содержание соединений бора в ЦИ в последние 10 лет было сокращено примерно до 8 % и продолжает снижаться.

На отечественном рынке типовое количество борсодержащих добавок в ЦИ составляет 19 % по массе: борная кислота – 12 %, бура – 7 %.

Сводная таблица с физико-химическими свойствами соединений бора приведена в [7], история их применения в деревообработке и исследования биоцидных свойств в [8].

В табл. 2 сведены показатели опасности для веществ, входящих в состав ЦИ, определенные отечественными нормативными документами⁴. Отметим, что борная кислота и бура это кристаллические вещества, не обладающие запахом и вкусом, что приводит к невозможности определения превышения ПДК неинструментальными органолептическими методами.

Таблица 2

Санитарно-токсикологические показатели составляющих целлюлозной изоляции и других веществ

Table 2

Sanitary-toxicological indicators of constituent cellulose insulation and other substances

Вещество	№ CAS	Хим. формула	Бор %	ПДК мр.рз, мг/м ³	ПДК сс.рз, мг/м ³	ПДК мр, мг/м ³	ПДК сс, мг/м ³	ПДК в, мг/л	ОБУВ мг/м ³	ARfC мг/м ³	RfC мг/м ³	RfD мг/кг	ЛД ₅₀ г/кг	Класс опасности
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Бор	7440-42-8	B	100	5	2	–	–	< 2,4	0,01	–	0,02	0,2	–	2
Борная кислота	10043-35-3	H ₃ BO ₃	17,48	10	–	–	0,02	–	–	–	0,02	0,01	0,2–0,3	3
Бура пятиводная	12179-04-3	Na ₂ B ₄ O ₇ · 5H ₂ O	14,85	2	–	–	–	–	0,02	–	0,09	0,09	–	3
Бура десятиводная	1303-96-4	Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O	11,34											
Целлюлоза	9004-34-6	–	–	10	–	–	–	–	0,1	–	0,05	–	–	4
Магний оксид	1309-48-4	MgO	–	4	–	0,4	0,05	–	–	–	0,05	–	–	4

Окончание табл. 2

Ending table 2

Вещество	№ CAS	Хим. формула	Бор %	ПДК мр.рз, мг/м ³	ПДК сс.рз, мг/м ³	ПДК мр, мг/м ³	ПДК сс, мг/м ³	ПДК в, мг/л	ОБУВ мг/м ³	ARfC мг/м ³	RfC мг/м ³	RfD мг/кг	ЛД ₅₀ г/кг	Класс опасности
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Стирол	100-42-5	C ₈ H ₈	–	30	10	0,04	0,002	0,02	–	20	1	0,2	0,5–5	3
Фенол	108-95-2	C ₆ H ₆ O	–	1	0,3	0,01	0,003	–	–	6	0,01	0,3	0,05–0,5	2
Формальдегид	50-00-0	CH ₂ O	–	1		0,035	0,003	–	–	0,048	0	0,2	0,5–5	2

Примечание. ARfC, мг/м³ – референтная концентрация для острых ингаляционных воздействий;
RfC, мг/м³ – референтная концентрация для хронического ингаляционного воздействия;
RfD, мг/кг – референтная доза при хроническом пероральном поступлении;
ЛД₅₀ – полуметальная доза¹.

В ограждающих конструкциях одноэтажного каркасного дома площадью 100 м², утепленного вкруговую ЦИ толщиной 200 мм, плотностью в стенах 65 кг/м³, а в полу и потолке 35 кг/м³, содержится 2765 кг ЦИ, из которых 19 % (525 кг) борсодержащих добавок, являющихся умеренно-токсичными ядами.

Следует отметить, что, согласно Р 2.1.10.1920-04 п.4.6.7, соблюдение действующих гигиенических нормативов не является основанием для исключения потенциально вредного химического вещества из анализа и оценки риска воздействия на здоровье человека. Ряд гигиенических нормативов в атмосферном воздухе, предназначенных для коротких периодов усреднения (среднесуточные ПДКсс), нуждаются в корректировке из-за высоких значений потенциального кумулятивного риска на уровне ПДК и в обосновании правомерности использования их для длительных периодов усреднения (среднегодовые ПДКсг).

Результаты исследований и их обсуждение

Оценка риска для здоровья. Для оценки риска для здоровья, связанного с наличием в ЦИ борсодержащих добавок, приведем ниже некоторые количественные показатели.

В 1995 г. Европейским центром экотоксикологии и токсикологии химических веществ (ЕСЕТОС) был установлен верхний допустимый уровень потребления (далее – UL) бора, равный 34 мг/сут без риска для репродуктивности и 19,2 мг/сут без риска для развития организма (для человека массой 60 кг). Согласно этим данным и учитывая, что потребление бора из пищи и жидкостей составляет до 7 мг/сут, человек может дополнительно получить из других источников до 12 мг бора в день, не превышая суточный лимит его потребления [7].

В 2001 г. в США Институт медицины (ИОМ) также оценил UL бора: для взрослых – 20 мг/сут; для беременных женщин в возрасте 19–50 лет – 20 мг/сут, а в возрасте 14–18 лет – 17 мг/сут; для младенцев – как не поддающийся определению [9; 10].

В 2004 г. Европейское агентство по безопасности продуктов питания (EFSA) установило UL бора равным 10 мг/сут для взрослого человека (в том числе для беременных и кормящих женщин) или 0,16 мг/кг массы тела/сут [11]. Ежедневное потребление бора в ЕС из пищи и жидкостей оценено для взрослых в 3,67–9,67 мг/сут, для детей 2,03–8,03 мг/сут (без учета употребления витаминных комплексов и БАДов, содержащих дополнительно 1–30 мг/сут)² [12].

Содержание бора в питьевой воде во всем мире обычно составляет 0,1...0,3 мг/л и зависит от концентрации природного бора в почве. В 2009 г., согласно 4-ому изданию Руководства по обеспечению качества питьевой воды ВОЗ [13], верхняя граница концентрации бора в воде рекомендована на уровне до 2,4 мг/л. За основу расчета данного значения были взяты результаты эпидемиологических исследований, согласно которым негативное воздействие бора на здоровье животных начинало наблюдаться при дозах 10,3 мг/кг массы тела/сут, что с фактором неопределенности 60 дало UL бора для человека равным 0,17 мг/кг массы тела/сут, округленно 0,2 мг/кг массы тела/сут.

¹ Маркова И. В., Афанасьев И. В. Клиническая токсикология детей и подростков. М., 1999. Т. 1–2.

² Häschke D., Stahlmann R. Wunderwaffe Bor? // Deutsche Apotheker Zeitung. 2016. № 50. С. 54.

Таким образом, на сегодняшний день верхний допустимый уровень потребления бора (референтная (безопасная) доза) для человека согласно ВОЗ [13] определен равным 0,2 мг/кг массы тела/сут или 12 мг/сут для взрослого массой 60 кг.

Безопасность при монтаже. Согласно ГОСТ 18704-78¹ п. 2.5, работающие с борной кислотой должны применять для защиты органов дыхания средства индивидуальной защиты, лица и глаз – защитные очки, а также специальную одежду и обувь и средства защиты рук.

Действующие отечественные предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны (далее – ПДК мр. рз), входящих в состав ЦИ, указаны в табл. 2. Имеются упоминания об исследовании ПДК мр. рз при работе с ЦИ в Германии (1993 г.)², в Финляндии (1994 г.)³.

В США ЦИ используется с 1950-х гг., однако адекватная оценка ПДК мр. рз при работе с ЦИ не проводилась до 1994 г. [14]. По данным [15], ПДК мр. рз пыли ЦИ в США принята от 10 до 15 мг/м³, ПДК вдыхаемой пыли ЦИ принята 5 мг/м³. За рабочую смену допускается превышение ПДК мр. рз не более 3 раз с суммарным временем воздействия до 30 мин, превышение свыше 5 раз не допускается ни при каких условиях.

В 2002 г. в Дании изучалась профессиональная опасность от вдыхания пыли различных волокнистых и сыпучих изоляционных материалов [16–18]. Отмечено, что изоляция из льна показала высокий уровень эндотоксинов. Концентрация бора в образцах ЦИ составляла 5,1 % по массе, а для вдыхаемых частиц ЦИ – 1,1 % (*соотношение компонентов смеси ЦИ неизвестно, по косвенным данным – 6 % борсодержащих добавок* – прим. автора). Поиск и анализ более ранних исследований привел к выводу о недостаточности данных для вынесения заключения о возможном вреде здоровью при вдыхании целлюлозных волокон, поэтому рекомендуются новые долгосрочные исследования. Подчеркнута необходимость использования респираторов для индивидуальной защиты органов дыхания монтажников.

В 2006 г. в США выполнена оценка легочной токсичности ЦИ с добавками солей аммония на монтажников [5]. Концентрация бора в образцах пыли ЦИ составляла от 0,5 до 2,5 % по массе, в среднем 9,9–10,9 мг/г, сульфатов – от 2,5 % до 10 %, в среднем 37,3–50,5 мг/г, остальные элементы присутствовали в незначительном количестве. Концентрация волокон ЦИ во вдыхаемом воздухе составила в среднем при задувке в стены и потолки – 20,2 и 26,2 мг/м³ для сухого и влажного способа укладки соответственно, на чердаке – 74,8 и 18,7 мг/м³. Несмотря на то, что зафиксированное количество волокон ЦИ в воздухе при монтаже превышало допустимые значения для асбеста и минеральных волокон, предположено, что волокна целлюлозы являются безопасными, в отличие от волокон асбеста или минераловатной изоляции. Сделан вывод: исходя из небольшого количества бора, присутствующего во вдыхаемых объемах воздуха, маловероятно, что ингаляция волокон ЦИ монтажниками приведет к значительному системному воздействию на их здоровье.

Если принять ПДК мр. рз пыли ЦИ равной 10 мг/м³, то в упомянутом выше исследовании превышение ПДК мр. рз составило в среднем от 1,9 до 7,5 раз. Поэтому, а также с учетом того, что практически любая пыль (древесная, цементная и пр.) относится к 1 группе канцерогенности (по оценке Международного агентства по изучению рака⁴), использование эффективных респираторов при монтаже ЦИ обязательно (впрочем, как и с минераловатной и другой изоляцией).

Выборка из типового паспорта безопасности американской ЦИ⁵:

Вдыхание – наиболее важный путь воздействия ЦИ на здоровье в профессиональных и других условиях. ЦИ не является опасной при вдыхании. Если ожидается, что количество пыли в воздухе превысит ПДК, должны использоваться сертифицированные респираторы. Следует всегда избегать длительного воздействия пыли, превышающего нормативные пределы.

ЦИ вызывает раздражение глаз, однако в случае попадания промывать водой до 30 мин. Дermalное воздействие обычно не вызывает беспокойства, потому что продукт плохо абсорбируется через неповрежденную кожу.

Следует тщательно мыть руки после контакта. Защита глаз и применение стандартных рабочих перчаток (хлопок, холст или кожа) могут быть оправданы, если окружающая среда чрезмерно пыльная.

ЦИ не предназначена для употребления внутрь. Проглатывание небольших количеств (менее одной чайной ложки) не причинит вреда здоровым взрослым; глотание больших количеств может вызвать желудочно-кишечные симптомы, следует выпить два стакана воды и обратиться за медицинской помощью.

¹ ГОСТ 18704-78. Кислота борная. Технические условия.

² Fuehres M. Fasermessungen bei der Verwendung von Zellulose- Fasern. – Düsseldorf, 1993.

³ Dust from fibrous thermal insulation materials as a safety risk (in Finnish: Kuitumaisten lämmöneristeiden pöly työturvallisuusriskinä) / J. Saarenpää [et al.]. URL: <https://www.tsr.fi/valmiit-hankkeet/hanke?h=92257#tiedote> (date of access: 19.03.2018).

⁴ Канцерогены и ПДК. URL: <https://www.project-house.by/cancer> (date of access: 11.02.2018).

⁵ InCide Technologies. Cellulose Insulation with B10. Safety data sheet. URL: http://www.incidetech.com/wp-content/uploads/2017/04/CelluloseInsulationB10_SDS2017.pdf (date of access: 01.02.2018).

Эпидемиологические исследования человека не показывают увеличения заболеваемости легочными болезнями в профессиональных популяциях с хроническим воздействием пыли соединений бора, а также никаких эффектов влияния на рождаемость в профессиональных популяциях с хроническим воздействием пыли соединений бора или обычного населения с высоким уровнем воздействия соединений бора в окружающей среде.

На основании данных [5], оценим концентрацию соединений бора в воздухе рабочей зоны при монтаже ЦИ с 19 % борсодержащих добавок – типовым составом смеси ЦИ на отечественном рынке. Принимаем расчет по худшему варианту и имея ввиду, что добавки прочно сцепились с взвешенными в воздухе волокнами целлюлозы (в реальности добавки плохо соединяются с волокнами целлюлозы, чем и обусловлено их большое количество). Концентрация добавок в пыли составит, например, для влажной укладки на вертикальную поверхность $26,2 \times 0,19 = 5,0 \text{ мг/м}^3$, для сухой укладки на горизонтальной поверхности $74,8 \times 0,19 = 14,2 \text{ мг/м}^3$. Результаты расчетов представлены в табл. 3 (превышения нормативов).

Таблица 3

Содержание соединений бора в ЦИ и их концентрация в воздухе рабочей зоны

Table 3

The content of boron compounds in cellulose insulation and their concentration in the air of the working area

Бор, всего в виде добавок в ЦИ				Борная кислота				Бура десятиводная			
%	мг/м ³			%	мг/м ³			%	мг/м ³		
	ВВУ*	ГСУ**	ПДК мр.рз		ВВУ	ГСУ	ПДК мр.рз		ВВУ	ГСУ	ПДК мр.рз
19	0,8	2,3	5	12	3,1	9,0	10	7,0	1,8	5,2	2
15	0,6	1,9		9,5	2,5	7,1		5,5	1,4	4,1	
10	0,4	1,2		6,3	1,7	4,7		3,7	1,0	2,8	
6	0,3	0,7		3	0,8	2,2		3	0,8	2,2	
4	0,2	0,5		4	1,0	3,0		–	–	–	

Примечание. * ВВУ – вертикальная влажная укладка; ** ГСУ – горизонтальная сухая укладка.

Превышение ПДК мр. рз происходит только по буре при горизонтальной укладке (но это без учета комбинированного воздействия веществ). Превышения в данном расчете не будет при уменьшении содержания буры до 2,6 % ЦИ, однако этого ее количества может быть уже недостаточно для обеспечения желаемых пожаробезопасных свойств ЦИ.

Для снижения пыльности в процессе горизонтальной укладки ЦИ (при работах по утеплению чердачных перекрытий сверху) можно рекомендовать применение влажного способа монтажа. Вопрос снижения пыльности ЦИ изучался в [18].

По оценке отчета [RPA, 2008], подготовленного в 2008 г. для Европейской Комиссии, воздействие борсодержащих добавок ЦИ на человека возможно при укладке ЦИ голыми руками и/или при вдыхании и/или проглатывании пыли в воздухе, однако связанное с этим воздействие на здоровье будет незначительным.

Таким образом, ЦИ может представлять некоторый риск для здоровья профессиональных монтажников, не соблюдающих технику безопасности. При работе с ЦИ следует использовать респираторную защиту с фильтром P2, защитную пыленепроницаемую одежду, перчатки и очки. Во время работы избегать попадания ЦИ на поврежденную кожу и в глаза. Строго соблюдать правила личной гигиены, не курить, не принимать пищу. Во время перерывов и по окончании работ спецодежду обязательно снимать, тщательно мыть руки теплой водой с мылом.

Безопасность при эксплуатации. Первый известный отчет по вопросу безопасности эксплуатации ограждающих конструкций с ЦИ для жильцов подготовлен в Дании (1995 г.) На слабой доказательной базе сделан вывод об «отсутствии риска для здоровья при использовании ЦИ с добавками борной кислоты и/или буры» [19].

Согласно датскому отчету от 1999 г. об опыте применения альтернативных изоляционных материалов в Финляндии и Швеции [20], опрос сотрудников научно-исследовательских институтов строительства в этих странах (VTI и SP) показал, что им не известны финские или шведские исследования безопасности ЦИ при ее эксплуатации.

В 1999 г. Институтом гигиены труда Дании для оценки степени воздействия борсодержащих добавок в составе ЦИ на жильцов проводились обследования внутреннего воздуха помещений на содержание

бора в 4 домах с периодом эксплуатации до 6 лет [21]. Конструкция наружных стен домов в основном представляла собой деревянный каркас толщиной 200 мм, заполненный ЦИ с 6 % борсодержащих добавок (3 % борной кислоты и 3 % буры; в одном доме добавки составляли 16 %), с внутренней стороны стены – два слоя гипсокартонных листов без парозащиты.

Присутствие бора во внутреннем воздухе помещений обнаружено не было. Все концентрации бора не отличались от 2 контрольных домов без ЦИ и были ниже предела обнаружения, составлявшего для фазы частиц 0,007 мг/м³, а для газовой фазы – 0,04 мг/м³.

Бор был обнаружен на полу в 2 домах – концентрация в пыли, собранной из самых пыльных закоулков, составила 0,025 и 0,039 мг/г или 0,0023 и 0,0026 мг/м². Если бы вся пыль с пола была поднята в воздух и перемешана по объему всей комнаты, это привело бы к кратковременной концентрации борсодержащих частиц в воздухе ниже 0,001 мг/м³. Если бы вся пыль на полу в гостиной с самым высоким измеренным содержанием бора была съедена, то потребленная доза бора была бы ниже допустимого уровня.

В целом был сделан вывод о том, что концентрация бора в жилище с ЦИ не (или лишь в очень малой степени) отличается от фоновой концентрации и намного ниже уровня беспокойства даже для маленьких детей, потребляющих большое количество пыли. При вдыхании 20 м³ воздуха в день и при 100 % поглощении ежедневное потребление бора оценивалось максимум в 20 × 0,007 + 20 × 0,001 = 0,16 мг бора в день в доме без пароизоляции. Меры производителей по разработке менее пыльных продуктов и замещению соединений бора приведут к дальнейшему снижению этих концентраций.

Возможно, что на основании этих исследований соединения бора упоминались 15 лет назад производителями ЦИ как экологически чистые и безвредные для человека добавки, и не брались во внимание как потенциальные загрязнители окружающей среды^{1,2}.

В последние годы в США появляются сведения, что в малоэтажных домах с принудительно-точной вентиляцией пыль ЦИ за расчет разницы давления воздуха может проникать из ограждающих конструкций во внутренние помещения через различные неплотности, щели, розетки и ухудшать микроклимат^{3,4}.

Для предотвращения миграции частиц ЦИ во внутренний воздух помещений следует применять конструктивные мероприятия, повышающие герметичность конструкции: парозащита (хотя бы крафт-бумага), двойная обшивка, заделка стыков листов обшивки и примыканий, герметичное исполнение коробок для электрических розеток и др. По оценке [22], концентрация соединений бора в воздухе помещений с ЦИ с установленной парозащитой будет в 19 раз меньше, чем без парозащиты.

На основании данных [21], взяв за основу нижний инструментальный предел обнаружения частиц бора, оценим максимальное теоретическое количество соединений бора в воздухе дома, утепленного ЦИ с 19 % борсодержащих добавок, с учетом их современных референтных (безопасных) концентраций (RfC) и доз (RfD, для взрослого человека массой 60 кг). Результаты расчетов представлены в табл. 4 (превышения нормативов выделены).

Таблица 4

Содержание соединений бора в ЦИ и их концентрация в воздухе помещений

Table 4

The content of boron compounds in cellulose insulation and their concentration in indoor air

Бор, всего в виде добавок в ЦИ					Борная кислота					Бура десятиводная				
%	мг/м ³		мг/сут/кг		%	мг/м ³		мг/сут/кг		%	мг/м ³		мг/сут/кг	
	теорет.	RfC	теорет.	RfD		теорет.	RfC	теорет.	RfD		теорет.	RfC	теорет.	RfD
19	0,022	0,02	0,008	0,2	12	0,08	0,02	0,031	0,01	7	0,07	0,09	0,027	0,09
6	0,007		0,003		3	0,02		0,008		3	0,03		0,012	

¹ Schöpf U. Facts about Boron Used for Fire and Mould Prevention (in German: Fakten zu den Bor enthaltenen Zusätzen zu Climacell für den Brand-und Schimmelschutz) *Cellul. W. Angelbachtal*. 2002.

² Schöpf U. Бура и борная кислота в эковате. URL: http://www.ecovata31.ru/images/nauka/2_bura_i_bornay_kislota.doc (дата обращения: 01.01.2018).

³ Hawk Environmental. Cellulose Insulation and Indoor Air Quality Issues. URL: <https://hawkenvironmental.com/cellulose-insulation-dust-causes-indoor-air-quality-issues/> (date of access: 12.02.2018).

⁴ Certuse J. P. E. Field Observations of Building Damage & Cellulose Insulation. URL: <http://iseengineering.com/Final%20Images/cellulose.pdf> (date of access: 12.02.2018).

Расчетами подтверждаются выводы [21] о безопасности ЦИ с 6 % добавок. Для 3 % борной кислоты получена концентрация $0,007 / 6 \% \times 3 \% / 17,48 \% = 0,020 \text{ мг/м}^3$, что совпадает с ее RfC, а значит, на сегодняшний день количество борной кислоты равно 3 % по массе ЦИ может находиться на грани допустимого (без учета комбинированного воздействия веществ).

Однако для 19 % добавок (12 % борной кислоты и 7 % буры) в ЦИ возможно превышение RfC и RfD по борной кислоте для взрослого в 4 и в 3,1 раза соответственно, а для ребенка возрастом до 6 лет (скорость ингаляции $4,5 \text{ м}^3/\text{сут}$, масса 14 кг) – превышение RfD возможно до 2,9 раз ($4,5 \times (0,007 + 0,001) / 6 \% \times 12 \% / 17,48 \% / 14 = 0,029 \text{ мг/сут/кг}$ массы тела).

На основании вышеизложенного рекомендуется рассмотреть необходимость проведения исследовательских работ по определению фактического содержания частиц бора во внутреннем воздухе домов, утепленных ЦИ, отечественных производителей.

Безопасность при утилизации. Согласно ГОСТ 8429-77¹ п. 6.5, сточные воды с содержанием буры, образующиеся в результате смывов, влажной уборки, перед направлением в промышленную канализацию следует обезвреживать.

Оценка токсичности соединений бора в составе ЦИ проведена в отчете [22], посвященном оценке возможного влияния на здоровье человека и окружающую среду со стороны антипиренов и биоцидов, содержащихся в изоляционных материалах, на протяжении их жизненного цикла. Данный доклад на сегодня можно считать основной работой, посвященной экологичности ЦИ (при этом к нему имеется ряд вопросов²). Расчетное содержание добавок в ЦИ принималось равным 6 % (3 % борной кислоты и 3 % буры). Предположено, что потери ЦИ составят на стадии строительства 0,5 % в виде пыли, осевшей на стройплощадке, и еще 5 % будут рассыпаны и захоронены на стройплощадке, а на стадии сноса – дополнительно 1 % и 10 % соответственно. Отмечено, что захороненные соединения бора могут достигать подземных вод на стройплощадках или свалках и могут представлять экологическую опасность. Среди однозначных выводов доклада можно выделить, что борсодержащие добавки в ЦИ до 6 % по массе:

- не представляют опасности для окружающей среды на стадии эксплуатации и для демонтированных на стадии сноса, происходящего на открытом воздушном пространстве;
- могут представлять опасность для монтажников на стадии строительства и для окружающей среды на стадиях строительства и сноса.

Способы утилизации ЦИ исследовались в [23]. Демонтировать ЦИ из существующих строительных конструкций удобно пневматическим засасыванием, обратно в установочную машину [24].

В Германии с июня 2005 г. по причине наличия борсодержащих добавок не допускается захоронение ЦИ без предварительной термической / энергетической обработки. Теплотворная способность ЦИ составляет 24,7 МДж/кг, а ЦИ изготовленной в виде плит – 17 МДж/кг³.

Поскольку старый ЦИ, смонтированный в существующих зданиях, может содержать большое количество соединений бора (до 25 %), то этот вид отходов, содержащих более высокую концентрацию, чем 1 % бора, следует рассматривать как опасные отходы [25].

В США для захоронения небольших количеств ЦИ не требуется никакого специального обращения. Он может быть утилизирован на муниципальных полигонах. Количество ЦИ массой более 1 т с борсодержащими добавками не рекомендуется отправлять на свалки. Такой продукт следует, по возможности, повторно использовать для соответствующего применения. ЦИ содержит водорастворимые соли, которые в больших количествах могут нанести вред растениям, чувствительных к бору. Следует избегать загрязнения водоемов, утечки воды и стоков⁴.

Оценка влияния ЦИ на окружающую среду в процессе жизненного цикла приведена в [24].

На основании вышеизложенного рекомендуется рассмотреть необходимость проведения исследований экологической безопасности жизненного цикла ЦИ с учетом сегодняшних отечественных реалий (количество борсодержащих добавок в ЦИ до 3 раз больше, чем в ЕС – до 19 %).

Регулирование химических добавок в ЦИ. В исследовании [26] искали альтернативные вещества для замены соединений бора в ЦИ. Было сделано заключение о том, что невозможно найти подходящую альтернативу без значительного увеличения стоимости производства.

¹ ГОСТ 8429-77. Буря. Технические условия.

² NOTAT fra Det Faglige Udvalg under Energistyrelsens udviklingsprogram for miljø og arbejdsmiljøvenlig isolering. URL: <http://www.alternativisolering.dk/resumeer/flammehaemmere.htm> (date of access: 17.02.2018).

³ Zellulose-Dämmstoffe - WECOBIS - Ökologisches Baustoffinformationssystem. URL: <http://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/daemmstoffe/aus-nachwachsenden-rohstoffen/zellulosefaser-daemmstoffe.html> (date of access: 20.02.2018).

⁴ InCide Technologies. Cellulose Insulation with B10. Safety data sheet. http://www.incidetech.com/wp-content/uploads/2017/04/CelluloseInsulationB10_SDS2017.pdf

С декабря 2010 г. в ЕС, согласно Приложения 4 Регламента 1272/2008, борная кислота, бура и другие соединения бора относятся к категории опасности *Repr. 1B; H360FD* (может отрицательно повлиять на способность к деторождению, может причинить вред неродившемуся ребенку)¹. Установлена предельная концентрация соединений бора в любых продуктах, в том числе и в ЦИ – с учетом молекулярной массы бора она должна составлять не более 1 % бора или 5,5 % борной кислоты по массе [27] (допустимое количество буры в пересчете на бор составит порядка 8,5 %).

Следует отметить существование отдельных мнений о том, что такая классификация соединений бора является слишком жесткой [28; 29].

В 2011 г. во Франции не продлили разрешение на использование соединений бора в качестве добавок в ЦИ, и производители ЦИ вынужденно заменили их солями аммония. Однако данное решение было поспешным. Соли аммония в составе ЦИ подвергаются в присутствии влаги воздуха полному гидролизу и выделяют аммиак [30], который может нанести реальный вред здоровью. В 2012 г. пошли многочисленные жалобы от жителей на запах аммиака в домах с ЦИ и с июня 2013 г. во Франции запрещен ЦИ с добавками солей аммония [CAS 7783-20-2; 7722-76-1; 7783-28-0], а с 14 июля 2018 г. в ЕС планируется запрет ЦИ, который выделяет аммиак в концентрации более 3 ppm (2,12 мг/м³) [6].

По состоянию на 2015 г., в ЕС типовым составом добавок для ЦИ на основе бора является смесь 4 % борной кислоты и 8 % гидроксида / тригидрата алюминия [CAS 8064-00-4] или сульфата магния [CAS 7487-88-9]. В будущем следует ожидать снижения суммарного содержания добавок в ЦИ до 10 % по массе [6]. С учетом принятых ограничений допустимого содержания соединений бора в ЦИ, согласно Декларации экологического продукта от Европейской ассоциации целлюлозной изоляции [24], качество воздуха в помещении при эксплуатации ЦИ имеет рейтинг А+ или А. Испытание на выброс летучих органических соединений в рамках обязательной экологической маркировки проводилось в соответствии с ISO 16000-3, ISO 16000-6, ISO 16000-9 и ISO 16000-11.

В работе [3] упоминается вопрос уместности употребления понятия «экологически безопасный» к европейскому ЦИ с репротоксичными добавками в объеме до 5 % по массе. Эковата отечественных производителей содержит до 19 % соединений бора.

Заключение

ЦИ является хорошим недорогим и перспективным экологичным изоляционным материалом с минимальным воздействием на окружающую среду, при условии снижения количества борсодержащих добавок в его составе на отечественном рынке.

С учетом повышения приоритетов вопросов химической безопасности в Республике Беларусь², возможность ограничения вслед за ЕС допустимого содержания соединений бора в товарах нуждается в дополнительной комплексной оценке со стороны Министерства здравоохранения, Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды.

Библиографические ссылки

1. Nielsen, B. L., Pedersen M. *Alternativ isolering i Tyskland*. 1999.
2. Ward P. L., Wohlt J. E., Zajac P. K., et al. Chemical and physical properties of processed newspaper compared to wheat straw and wood shavings as animal bedding // *J. Dairy Sci.* 2000. Vol. 83, № 2. P. 359–367.
3. Larsen P. B. Cellulose / paper wool insulation – aspects in relation to regulatory requirements and risk assessment. 2012.
4. Kwon Y. C., Yarbrough D. W. Cellulose Insulation for Use as Building Insulation in Korea. 2017. Vol. 70, № Amsce. P. 75–79.
5. Morgan D. L. NTP Toxicity Study Report on the atmospheric characterization, particle size, chemical composition, and workplace exposure assessment of cellulose insulation (CELLULOSEINS). 2006.
6. ECHA. Background document to RAC and SEAC opinions on inorganic ammonium salts / ECHA. 2015.
7. ECETOC. Reproductive and General Toxicology of some Inorganic Borates and Risk Assessment for Human Beings. Technical Report No. 63 / ECETOC. 1995.
8. Freeman M. H., McIntyre C.R., Jackson D. A critical and comprehensive review of boron in wood preservation // *Proc. Am. Wood Prot. Assoc.* 2009. Vol. 105. P. 279–294.
9. IOM. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. – National Academies Press (US), 2001.
10. EPA. Toxicological Review of Boron and Compounds. 2004.

¹ В 1987 г. Министерство здравоохранения СССР постановило: «...Запретить использование борной кислоты в качестве антисептического средства у детей грудного возраста, а также у женщин в период беременности и лактации в связи с ее низкой активностью и высокой токсичностью». *Прозоровский В.* Коварная борная кислота. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/3604/>

² Регулирование химических веществ в центре внимания мирового сообщества. URL: <http://ecoidea.by/ru/article/780> (дата обращения: 17.02.2018).

11. EFSA. Opinion of the Scientific Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies on a request from the Commission related to the Tolerable Upper Intake Level of Boron (Sodium Borate and Boric Acid). 2004.
12. BfR. Zusatz von Borsäure oder Borax in Nahrungsergänzungsmitteln- Gesundheitliche Bewertung Nr. 005/2006 des Bundesinstitut für Risikobewertung. 2005.
13. WHO. Boron in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. 2009.
14. McConnell E. E. Summary of data for chemical selection // Cellulose insulation. 1994.
15. NIOSH. Exposure Assessment of Cellulose Insulation Applicators. Health Hazard Evaluation Report, HETA 2000-0322-2827. 2001.
16. Breum N. O., Schneider T., Jorgensen, et al. Cellulosic Building Insulation versus Mineral Wool, Fiberglass or Perlite: Installer's Exposure by Inhalation of Fibers, Dust, Endotoxin and Fire-retardant Additives // Ann. Occup. Hyg. 2003. Vol. 47, № 8. P. 653–669.
17. Breum N. O., Schneider T., Flyvholm M.-A., et al. Luftforureninger ved anvendelse af alternative isoleringsmaterialer. 2002.
18. Schneider T., Jorgensen O. Undersøgelse af mobilt støv i afstøvet Papiruld. 1999.
19. Haugaard J. Vurdering af risiko ved anvendelse af Borsyre/Borax til isolering. 1995.
20. Hansen M. H., Eriksen S. S. Brug af alternativ isolering i Finland og Sverige. 2000.
21. Schneider T. Forekomst af bor i indeklimaet. Et pilotstudie. 1999.
22. COWI. Udredning om flammehæmmere og biocider i isoleringsmaterialer. Dansk Toksikologi Center. 2000.
23. Dahi Z. Recyclingfähige Dämmstoffe aus Altpapier für Syrien. Universität Kassel, 2012.
24. ECIA. Environmental Product Declaration. Loose fill cellulose insulation [Электронный ресурс]. URL: http://ecia.eu.com/files/news/20180118 EPD_Core_ECIA-version 2.4.pdf (дата доступа: 12.03.2018).
25. Larsen P. B., Nielsen B. S., Fotel F. L., et al. Survey of Boric acid and sodium borates (borax). 2015.
26. Dollerup H., Skov C. Forsøgsplatform og imprægnering. Substitution af bor-afprøvninger. 2005.
27. ECHA. Annex XV dossier: Proposal for identification of a substance as substance of very high concern (SVHC). Substance Name: Boric acid. 2010.
28. Duydu Y., Başaran N., Ustündağ A., et al. Is Boric Acid Toxic to Reproduction in Humans? Assessment of the Animal Reproductive Toxicity Data and Epidemiological Study Results // Curr. Drug Deliv. 2016. Vol. 13, № 3. C. 324–329.
29. BBSR. Ökologische Baustoffwahl. Aspekte zur komplexen Planungsaufgabe «Schadstoffarmes Bauen». Bonn, 2016.
30. Кетов А. А., Кетов П. А., Красновских М. П. Исследование экологической опасности теплоизоляционного материала эковата // Строительные материалы. 2016, № 5. С. 78–80.

Referenes

1. Nielsen, B. L., Pedersen M. Alternativ isolering i Tyskland. 1999.
2. Ward P. L., Wohlt J. E., Zajac P. K., et al. Chemical and physical properties of processed newspaper compared to wheat straw and wood shavings as animal bedding. *J. Dairy Sci.* 2000. Vol. 83, № 2. P. 359–367.
3. Larsen P. B. Cellulose / paper wool insulation – aspects in relation to regulatory requirements and risk assessment. 2012.
4. Kwon Y. C., Yarbrough D. W. Cellulose Insulation for Use as Building Insulation in Korea. 2017. Vol. 70, № Amsce. P. 75–79.
5. Morgan D. L. NTP Toxicity Study Report on the atmospheric characterization, particle size, chemical composition, and workplace exposure assessment of cellulose insulation (CELLULOSEINS). 2006.
6. ECHA. Background document to RAC and SEAC opinions on inorganic ammonium salts / ECHA. 2015.
7. ECETOC. Reproductive and General Toxicology of some Inorganic Borates and Risk Assessment for Human Beings. Technical Report No. 63 / ECETOC. 1995.
8. Freeman M. H., McIntyre C.R., Jackson D. A critical and comprehensive review of boron in wood preservation. *Proc. Am. Wood Prot. Assoc.* 2009. Vol. 105. P. 279–294.
9. IOM. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. – National Academies Press (US), 2001.
10. EPA. Toxicological Review of Boron and Compounds. 2004.
11. EFSA. Opinion of the Scientific Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies on a request from the Commission related to the Tolerable Upper Intake Level of Boron (Sodium Borate and Boric Acid). 2004.
12. BfR. Zusatz von Borsäure oder Borax in Nahrungsergänzungsmitteln- Gesundheitliche Bewertung Nr. 005/2006 des Bundesinstitut für Risikobewertung. 2005.
13. WHO. Boron in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. 2009.
14. McConnell E. E. Summary of data for chemical selection. Cellulose insulation. 1994.
15. NIOSH. Exposure Assessment of Cellulose Insulation Applicators. Health Hazard Evaluation Report, HETA 2000-0322-2827. 2001.
16. Breum N. O., Schneider T., Jorgensen, et al. Cellulosic Building Insulation versus Mineral Wool, Fiberglass or Perlite: Installer's Exposure by Inhalation of Fibers, Dust, Endotoxin and Fire-retardant Additives. *Ann. Occup. Hyg.* 2003. Vol. 47, № 8. P. 653–669.
17. Breum N. O., Schneider T., Flyvholm M.-A., et al. Luftforureninger ved anvendelse af alternative isoleringsmaterialer. 2002.
18. Schneider T., Jorgensen O. Undersøgelse af mobilt støv i afstøvet Papiruld. 1999.
19. Haugaard J. Vurdering af risiko ved anvendelse af Borsyre/Borax til isolering. 1995.
20. Hansen M. H., Eriksen S. S. Brug af alternativ isolering i Finland og Sverige. 2000.
21. Schneider T. Forekomst af bor i indeklimaet. Et pilotstudie. 1999.
22. COWI. Udredning om flammehæmmere og biocider i isoleringsmaterialer. Dansk Toksikologi Center. 2000.
23. Dahi Z. Recyclingfähige Dämmstoffe aus Altpapier für Syrien. Universität Kassel, 2012.
24. ECIA. Environmental Product Declaration. Loose fill cellulose insulation [Электронный ресурс]. URL: http://ecia.eu.com/files/news/20180118 EPD_Core_ECIA-version 2.4.pdf (date of access: 12.03.2018).

25. Larsen P. B., Nielsen B. S., Fotel F. L., et al. Survey of Boric acid and sodium borates (borax). 2015.
26. Dollerup H., Skov C. Forsøgsplatform og imprægnering. Substitution af bor-afprøvninger. 2005.
27. ECHA. Annex XV dossier: Proposal for identification of a substance as substance of very high concern (SVHC). Substance Name: Boric acid. 2010.
28. Duydu Y., Başaran N, Ustündağ A, et al. Is Boric Acid Toxic to Reproduction in Humans? Assessment of the Animal Reproductive Toxicity Data and Epidemiological Study Results. *Curr. Drug Deliv.* 2016. Vol. 13, № 3. С. 324–329.
29. BBSR. Ökologische Baustoffwahl. Aspekte zur komplexen Planungsaufgabe «Schadstoffarmes Bauen». Bonn, 2016.
30. Ketov A. A., Krasnovskikh M. P. [Research in Ecological Danger of Heat Insulating Material «Ecowool»]. *Construction Materials*. 2016. No. 5. P. 78–80. (In Russ.).

Статья поступила в редколлегию 07.05.2018
Received by editorial board 07.05.2018

УДК 634.723:504

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫРАЩИВАНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО ПЛОДОВ СМОРОДИНЫ ЧЕРНОЙ (*R. NIGNIRUM* L.)

В. Г. КУЯН¹⁾, О. Б. ОВЕЗМИРАДОВА¹⁾, И. М. ЕВТУШОК²⁾

¹⁾Житомирский национальный агроэкологический университет, бульвар Старый, 7, 10008, Житомир, Украина

²⁾Житомирский агротехнический колледж, ул. Покровская, 96, 10031, Житомир, Украина

Изложен краткий анализ культуры смородины черной (*R. nigrum* L.) в различных почвенно-климатических условиях за период ее промышленного выращивания. Обращено внимание на процессы интенсификации производства ягод, расширение и улучшение сортового состава, уплотнение насаждений, усиление обеспеченности элементами минерального питания за счет повышения норм органических и, особенно, минеральных удобрений, усиления химзащиты растений, усовершенствования способов формирования и обрезки кустов, что обеспечивает повышение урожайности до 10–15 т/га и больше. Установлено, что в при автомагистральных зонах (до 200 м) содержание в ягодах Pb превышает ПДК на 5–25 %, Cd – в 2–4 раза; в зонах безусловного отселения ЧАЭС показатели удельной активности ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr не превышают допустимого уровня – ягоды относятся к категории экологически безопасных.

Ключевые слова: смородина черная; сорта; технологии; интенсификация; тяжелые металлы; урожайность; приавтоматриальные зоны; радионуклиды; экологическое качество.

THE INTENSIFICATION OF THE CULTIVATION TECHNOLOGIES AND THE ECOLOGICAL QUALITY OF BLACK CURRANTS (*R. NIGNIRUM* L.) FRUIT

V. G. KUYAN^a, O. B. OVEZMYRADOVA^a, I. M. YEVTUSHOK^b

^aZhytomyr National Agroecological University, Stary boulevard, 7, 10008, Zhytomyr, Ukraine

^bZhytomyr Agricultural Technical College, Pokrovska street, 10031, Zhytomyr, Ukraine

Corresponding author: V. G. Kuyan (bloglistnet@gmail.com)

The paper gives a brief analysis of black currants (*R. nigrum* L.) culture in variable climatic and soil conditions within the period of its industrial cultivation. In particular, the paper draws attention to the intensification processes of fruit growing, the expansion and the considerable improvement of a sort composition, the plantation consideration, the intensification of supplying the elements of mineral feeding by rising the rates of organic and especially mineral fertilizers,

Образец цитирования:

Куян В. Г., Овезмирадова О. Б., Евтушок И. М. Интенсификация технологий выращивания и экологическое качество плодов смородины черной (*R. nigrum* L.) // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 110–117.

For citation:

Kuyan V. G., Ovezmyradova O. B., Yevtushok I. M. The Intensification of the Cultivation Technologies and the Ecological Quality of Black Currants (*R. nigrum* L.) Fruit. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 110–117. (in Russ.).

Авторы:

Владимир Григорьевич Куян – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; профессор кафедры растениеводства.
Ольга Бяшимовна Овезмирадова – кандидат сельскохозяйственных наук; старший преподаватель.
Иван Моисеевич Евтушок – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; преподаватель высшей категории.

Authors:

Vladimir G. Kuyan, doctor of sciences (agriculture), professor; professor of the department of plant growing.
bloglistnet@gmail.com
Olga B. Ovezmyradova, PhD (agriculture); senior lecturer.
bloglistnet@gmail.com
Ivan M. Yevtushok, PhD (agriculture), associate professor; lecturer of the highest category.
bloglistnet@gmail.com

the cardinal improvement of the plants chemical protection, the improvement of the bushes shaping and trimming which will provide the 10–15 t/ha and more yields increase. The content of Pb in fruit has 5–25 % excess in terms of MPC, Cd content is 2–4 times as big in the by-highway areas. The specific activity indexes of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the absolute evacuation zones do not exceed an accepted level. Fruit are ranked as ecologically safe.

Key words: black currant; varieties; technologies; intensification; heavy metals; crop yield; zones located in proximity to the highways; radionuclides; ecological quality.

Введение

Смородина черная (*R. nigrum* L.) сравнительно молодая культура. Первые ее сорта появились в середине XIX в., многие десятки из которых были описаны в начале XX ст., однако промышленный сортимент был ограниченным. Урожайность в странах Европы даже в 60-х годах XX ст., как правило, не превышала 2–3 т/га [4; 10; 36]. Интенсификация технологий выращивания ягод, применяемая в 80–90-х гг. XX в., способствовала значительному повышению продуктивности насаждений в 2–3 раза. При этом особое внимание обращалось на технологические и вкусовые качества плодов, а производство экологически безопасной продукции надлежащего изучения не получило [1; 13; 22; 26; 29; 41; 51].

Традиционная (экстенсивная) технология возделывания смородины черной

До середины XX в. выращивание смородины черной в промышленных масштабах во многих странах было весьма ограниченным [4; 10; 36; 47]. Площадь насаждений во всех республиках бывшего СССР не превышала 10 тыс. га. Продуктивность их была низкой, в частности, в 1966 г. по всем садоводческим совхозам России урожайность ягод составляла 14,1 ц/га [4]. В условиях достаточной водообеспеченности украинских Карпат средняя площадь насаждений смородины составляла 5–10 га, в некоторых хозяйствах – до 30 га. Урожайность была низкой и достигала 12–15 ц/га, тогда как на опытной сельскохозяйственной станции – 80 ц/га и больше [18]. Согласно исследованиям, проводившимся в зоне Полесья, уже на 3-й год после посадки собирали по 7,8–9 т/га [19; 21]; в условиях Беларуси, урожайность достигала 45–55 ц/га [5]. В опытах и промышленных насаждениях выращивались сорта западноевропейского происхождения: Боскопский великан, Голиаф, Кент, Лакстона, Лия плодородная, Неаполитанская, Сентябрьская, Восьмая Девисона и др. Средняя урожайность таких сортов с одного куста в период полного плодоношения составляла 3,76 кг, у некоторых сортов (Лия плодородная) в отдельные годы достигала 7,22–8,40 кг [36]. В 60-х гг. XX ст. как опытные, так и производственные насаждения рекомендовалось закладывать рядковым способом с площадью питания кустов 2×1,5 м [5]; 2,5–3×1,5 м [29]; 2,5×1,25 м [36]; 2×2 м; 2×1,5 м; 2,5–3×1,75–2 м; 2,5×1,25–1,5 м [10]; 2,5×1,5–2 м – на равнинах, 2–2,5×1,25–1,5 м – на склонах и 1,5–2×1,25–1 м – на приусадебных участках [18]; 2,1×1,2 м; 2,4×1,2 м; 2,7×1,2 м, 2,9–3×1,2 м – в зависимости от сорта и техники [47]; на 1 га размещалось 1666–3788 кустов.

Значительное внимание уделялось изучению и внедрению в производство региональных систем удобрения (предпосадочного сплошного и локального удобрения, послепосадочного внесения органических и минеральных удобрений). Ведущую роль в таких исследованиях приобретала разработка внесения видов, норм, доз, способов и сроков минеральных удобрений в различных почвенно-климатических условиях [4; 5; 19; 20; 21; 40; 47], а также применение пестицидов и гербицидов для защиты насаждений от вредителей, болезней, сорняков [4; 21; 47]. В различных почвенно-климатических условиях на протяжении всего периода выращивания опытных и товарных насаждений минеральные удобрения вносили в пределах 1405–3570 кг действующего вещества на 1 га ($\text{N}_{420-1680} \text{P}_{520-1810} \text{K}_{465-1905}$), за период эксплуатации – $\text{N}_{420-1250} \text{P}_{420-1050} \text{K}_{465-1405}$ [11; 13; 15; 39].

Содержание почвы в промышленных насаждениях отличалось определенной региональной зависимостью: практиковался черный пар – осенняя вспашка междурядий на глубину 15–18 см и многократная (5 раз и больше) культивация на глубину 12 см в период вегетации, ручная обработка почвы в рядах или применение Симазина [4; 10]; сочетание осенней периодической вспашки междурядий на глубину 12–15 см с дискованием (12–14 см), многократная культивация (7–8 см) в период вегетации и ручная обработка почвы в рядах или применение Симазина [21]; черный пар – обработка междурядий культиваторами, фрезами и ручное мотыжение в рядах; черный пар в сочетании с мульчированием почвы в рядах соломой, компостом, толщиной 15 см или сплошное мульчирование соломой – 20–30 т/га; использование гербицидов: Симазин, Далапон, 2М–4ХМ, ИФК, 2,4,5 ТМ [47].

Орошение рекомендовалось во всех регионах «нечерноземной полосы» оросительной нормой 1200–3000 м³/га – 4–6 поливов дождеванием или по-бороздам нормой 300–500 м³/га [4]; при этом считалось необходимым учитывать экономическую эффективность применения орошения [47].

В разных странах и зонах плодоводства имели ряд отличий формирование кустов и обрезка их в плодоносящих насаждениях. Куст формировали в течении 5 лет, выращивая ежегодно 3–4 сильных прикорневых побега, чтобы в сформированном кусте было 16–24 хорошо размещенных сильных разновозрастных ветвей [4; 10; 18], или период формирования куста из 15–20 одно-, трех-, четырехлетних ветвей не превышал 3–4 года [21]; если же к концу первой вегетации образовалось меньше 4–5 ветвей или их длина составляла менее 45 см, проводилась обрезка на уровне почвы [47]. Использовались различные способы обрезки плодоносящих кустов: хозяйственная – ежегодно вырезались все сломанные, подмерзшие, поврежденные вредителями и болезнями, лежащие на земле ветви, а также 3–4 ветви старше 5–6 лет. Обрезка проводилась в зависимости от побегоосновательной способности сортов, а также ветвей, прекративших свой поступательный рост, прирост которых был менее 15 см, излишних однолетних ветвей [4]. Для сформированных кустов практиковалась вырезка всех 5–6-летних ветвей [18]. Осенью вырезали четырехлетние ветви, а также поврежденные и лежащие на земле [21] или же удалялись старые, низколежащие ветви, слабые однолетние ветви [47].

Интенсификация технологий выращивания ягод

В процессах интенсификации, активно начавшейся в 70-х гг. XX в., значительное внимание уделялось селекции и внедрению в производство отечественных сортов интенсивного типа, приспособленным к местным почвенно-климатическим условиям. Повышение уровня производства ягод должно базироваться на основных факторах интенсификации – создании новых сортов и разработке низкозатратных технологий [41]. До 2000 г. ведущую роль в этом направлении занимала Беларусь, где было выведено 20 сортов, районированных и в Украине (Белорусская сладкая, Минай Шмырев, Катюша и др.). Селекция сортов направлялась на повышение их урожайности до 14 т/га и больше, самоплодностью не меньше 60 %, с формой куста и плодоношением, удобным для механизированного возделывания и уборки урожая [6]. За последние 15 лет в Украине производству рекомендовалось свыше 20 сортов отечественной селекции (Аметист, Вернисаж, Гонтва, Козацкая, Ориана, Муза, Украина, София и др.) для различных почвенно-климатических зон [23; 24]. Значительно пополнился сортовой состав, улучшилось качество сортов, повысилась их продуктивность и увеличилась (до 43–45 тыс. га) площадь насаждений во всех странах Европы, особенно в Польше (до 25–26 тыс. га), в Украине (5,8–6,1 тыс. га). В производстве пользуются популярностью польские сорта – Тисел, Тибен, Рубин; шотландские – Бен Сарек, Бен Хоуп, Бен Адлер, Бен Коннан, Бен Тиран, Бен Ламонд; английский – Молинг Йет; словацкие – Отелло, Ева, Татран, Детван и др. [26; 31]. В условиях Украины урожайность ряда сортов (Паулинка, Вира, Чернобыльская, Комфорт) составляла 16–19 т/га и больше [16; 28]; выделены перспективные сорта (Белорусская сладкая, Минай Шмырев, Багира, Лунная, Партизанка, Зеленая дымка) для машинной уборки урожая [29; 48], отобраны сорта (Вира, Комфорт, Катюша, Шедевр) устойчивые против мучнистой росы и антракноза [17].

Изучение способов размещения кустов и различной плотности насаждений: 2778; 5556; 11112; 11205 растений на 1 га [3], 6,6; 10,4; 13,3; 22,8 тыс. кустов на 1 га [29] и даже 40 тыс. кустов на 1 га [31], а также многие другие исследования в разных регионах и странах, обеспечили установление оптимальной площади питания кустов и размещение их в производственных насаждениях рядковым способом с междурядьями 2–3 м и расстоянием в ряду – 0,3–0,7 м, высаживая на 1 га 5,0 – 16,0 тыс. одно-, двухлетних саженцев [11; 13–15, 38; 39; 42; 43]. Значительное внимание уделяется качеству саженцев, особенно производству и использованию безвирусного посадочного материала, поскольку от этого зависит вступление насаждения в период плодоношения и степень его химзащиты [14; 27; 30; 39; 45; 51].

В различных почвенно-климатических условиях разрабатывалась и внедрялась одна из важнейших основ интенсификации – система удобрения, обеспечивающая уплотненные насаждения элементами минерального питания [13; 14; 23; 42; 43]. Особое значение имеет предпосадочное удобрение. Норма внесения органических удобрений в условиях Полесья, Карпатах и Лесостепи Украины составляла 100–120 т/га [11; 29], в других странах и регионах достигала 150–180 т/га [3; 15; 38]. Одновременно рекомендовалось вносить $P_{90-120}K_{90-120}$ [11], при этом нормы РК дифференцировать в зависимости от содержания P_2O_5 и K_2O в почве, но не больше $P_{400}K_{500}$ [39], или рекомендовалось вносить $P_{300}K_{300}$ [3], $P_{250-600}K_{150-400}$ в зависимости от содержания фосфора и калия в почве [1; 5]. Норма послепосадочного внесения за 10–14 лет выращивания в Украине составляла $N_{900-1200}K_{900-1200}$ [39], в интенсивной технологии с 8-летним периодом выращивания – $N_{360}K_{360}$ [11]; в разных странах оптимизировались соотношения N:K = 1:1, N:P:K = 2:1:1 [50–51]. Уже в 80-х гг. XX в. фермеры стран Западной Европы предпочитали внесение органических удобрений и сокращение нормы NPK [7]. Также весьма активно проводилась химзащита насаждений от вредителей, болезней и сорняков: в некоторых странах (Новая

Зеландия) пестицидами обрабатывали до 20 раз за вегетацию [50], в Украине – до 7 раз [11]; в условия Полесья эффективным оказалось применение биопрепаратов [8].

Орошение – один из эффективных приемов интенсификации, изучалось в разных странах и регионах [15; 23; 38]. В опытах УНИИОС эффективным оказалось капельное орошение, при котором за вегетацию поливали 10–15 раз, расходуя около 1000 м³ воды на 1 га [43]; в условиях Полесья 3–4 полива за вегетацию, поливной нормой 90–120 м³/га, обеспечивали повышение урожайности сорта Белорусская сладкая до 125,2 ц/га, Минай Шмырев – до 110,2 ц/га или на 33,4 и 40,7 % в насаждениях с размещением кустов 3×0,7 м, при этом до 01–05. Влажность почвы рекомендовалось поддерживать на уровне 70 % НВ, а до конца вегетации – 50 % НВ [9]. В уплотненных насаждениях (2,5×0,3–0,5 м) влажность почвы целесообразно поддерживать на уровне 70–80 % НВ, поливая в засушливые годы 2–3 раза нормой 350–400 м³/га [11; 29].

Уплотнение насаждений смородины (в основном за счет уменьшения в 2–4 раза расстояний между растениями в рядах) способствовало значительным изменениям формирования кустов, хотя его главный принцип сохранился – послепосадочной обрезкой стеблей на высоте 8–10 см обеспечить образование в кусте наибольшего (6–8 и больше) количества основных прикорневых побегов длиной до 60–80 см [11; 13; 14; 23]. Структура и конструкция куста зависит от биоэкономических факторов. Так, в сформированном кусте, в зависимости от сортовых особенностей, рекомендуется иметь от 8 до 16, а в уплотненных насаждениях – до 10–12 разновозрастных и равномерно размещенных веток [43]; на 3–4-й год после посадки в сформированном кусте должно быть 12–15 сильных прикорневых ветвей разного возраста [15]. Обрезка плодоносящих насаждений после окончания формирования кустов имеет ряд существенных особенностей, даже в одинаковых организационно-экономических и почвенно-климатических условиях [11; 23; 39]. В уплотненных насаждениях Украины, после съема четвертого урожая, рекомендовалось скашивание кустов на высоте 18–20 см, через год плантация еще 2 года плодоносит, а затем эксплуатацию прекращают [11]. Обрезка плодоносящих кустов заключается в замене низкопродуктивных старых (4–7-летних) веток на более молодые, а также в прореживании кустов и эксплуатации их на протяжении 10–14 лет в зависимости от плодородия почвы [39]. В ходе исследований установлена зависимость обрезки от побегообразовательной способности сортов, однако для промышленных индустриальных насаждений такая селективная обрезка не пригодная – механизировать ее невозможно [23]. Известны и другие способы обрезки в разных странах и регионах: независимо от возраста многолетние ветви вырезают, если прирост их побегов продолжения менее 15 см [15]; надземную часть скашивают на высоте 2–3 см от поверхности почвы [42]; ежегодно скашивают часть (1/3–1/2) плантации [46]; удаляют ветви старше 3–4 лет [12; 43]. В определенной мере изучены особенности механизированной обрезки плодоносящих насаждений [11; 23; 46; 49]. Период эксплуатации интенсивного типа насаждений рекомендуется сократить до 6–8 лет [11; 38; 49; 51].

Экологическое качество ягод и его обеспечение

В технологических, селекционных и других исследованиях важное значение имеет товарное и вкусовое качество выращиваемой продукции: размер кисти, масса, форма, окраска ягод, вкус и аромат их мякоти, содержание в плодах сахаров, органических кислот, пектинов, фенольных соединений, витамина С [1; 13; 15; 23; 43]. Интенсификация возделывания плодов за счет значительной химизации (увеличение норм внесения минеральных удобрений, активное применение различных пестицидов), усиление загрязнения окружающей среды промышленными предприятиями и автотранспортом, а также радионуклидами, в результате аварии на ЧАЭС, способствовали в 80-х гг. XX в. усилению требований общественности, в частности Западной Европы, к экологическому качеству производимых плодов, особенно к содержанию в них нитратов, тяжелых металлов, остатков пестицидов, радиоактивных веществ [2; 7; 22; 35; 37]. Однако в технологиях выращивания плодовых культур, в том числе и смородины черной, этой экологической проблеме и до сего времени не уделяется должного внимания, поскольку считалось, например, в Польше, что только исключение использования пестицидов должно сопровождаться повышением реализационных цен на ягоды минимум в 2 раза [31].

Проведение агроэкологической оценки минеральных удобрений и пестицидов, изучение уровней загрязнения окружающей среды в разных регионах, зонах и местностях [2; 22; 35; 37; 44] свидетельствует о необходимости осуществления систематического (или периодического) контроля за экологическим качеством ягод и совершенствованием мероприятий по его обеспечению. Такой контроль особенно необходим в наиболее антропогенно загрязненных местностях: радиационно загрязненных территориях, пригородных и приавтомагистральных зонах. Исследования, выполненные нами в радиационно загрязненных местностях (зоны обязательного отселения), свидетельствуют о том, что содержание ¹³⁷Cs в почве под насаждением смородины через 25 лет после аварии варьирует в пределах 41,01–312,04 кБк/м²,

^{90}Sr – 13,53–36,63 кБк/м² [22; 25]; на глубину 21–40 см мигрирует 10,6–15,0 % ^{137}Cs и 76,8–85,8 % ^{90}Sr . Уровень удельной активности ^{137}Cs в ягодах составлял 4,25–8,02 Бк/кг, ^{90}Sr – 2,84–3,97 Бк/кг, то есть они относятся к категории экологически безопасных, поскольку показатели удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr не превышают допустимый уровень [25].

В почве насаждений смородины приавтомагистральной зоны (50, 100, 200 м от полотна автомагистрали) содержание свинца превышало ПДК в 3,24 – 7,52 раза, меди – в 1,21–3,14 и цинка – в 1,06–2,04 раза; в ягодах превышение фонового уровня содержания Pb составляло 18–27 %, Cu – 18–67 %, Zn – 23–43 %, а Cd – 200–500 %; содержание Cu и Zn не превышало ПДК, а загрязнение ягод Cd достигало 1,67–4,0 ПДК, Pb – 1,05–1,25 ПДК; при этом уровень содержания тяжелых металлов в ягодах повышается по мере их созревания [32–34].

Проведенные исследования свидетельствуют, что надлежащее экологическое качество ягод может быть обеспечено применением рациональной органической системы удобрения или органо-минеральной, в которой ежегодные нормы NPK устанавливаются на основании соответствующих экотоксикологических показателей, замене химического метода борьбы с вредителями и болезнями смородины биологическим, не допуская разрушения адаптационного потенциала элементов экосистемы и загрязнения окружающей среды [23; 37].

Заключение

Технологии выращивания ягод смородины черной в Украине и многих других странах до 60-х гг. XX в. характеризовались использованием ограниченного количества западноевропейских сортов, относительно разреженным (1666–3788 шт/га) размещением кустов на плантации, нарастающим применением минеральных удобрений и пестицидов, преобладающим доминированием ручного труда (формирование и обрезка кустов, уборка и товарная обработка урожая), низкой (1,5–2,5 т/га) урожайностью промышленных насаждений.

Интенсификация технологий производства ягод смородины, начавшаяся в 70-х гг. XX в., сопровождалась внедрением в Украине высокопродуктивных сортов белорусской селекции (с начала XXI в. – украинской), активной химизацией, уплотненным (5–15 тыс. шт/га) размещением кустов в насаждении, значительным усилением механизации производственных процессов, в том числе внедрением машинной уборки ягод, повышением урожайности и сокращением сроков эксплуатации товарной плантации до 6–8 лет.

В процессах интенсификации выращивания смородины экологическому качеству ягод не уделялось должного внимания, экологически-безопасные технологии возделывания разработаны недостаточно.

Установлена возможность выращивания ягод смородины в зонах безусловного отселения из зоны Чернобыльской АЭС, непригодность для этой культуры приавтомагистральных полос шириной (до 200 м) из-за загрязнения плодов тяжелыми металлами (Cd, Pb).

Библиографические ссылки

1. Атлас перспективных сортов плодовых и ягодных культур Украины / под. ред. В. П. Копаня. Киев, 1999.
2. Болдырев М. И. Защита окружающей среды в связи с применением пестицидов // Садоводство и виноградарство. 1988. № 12. С. 12–14.
3. Бохонова М. И. Проблемы и перспективы промышленного возделывания смородины в Ленинградской области // Садоводство и виноградарство. 1990. № 1. С. 29–31.
4. Бурмистров А. Д. Ягодные культуры. Ленинград, 1972.
5. Волуэв А. Г., Шкурко Т. И. Удобрение черной смородины на пойменной почве Белоруссии // Почвенные условия, удобрение и урожайность плодовых и ягодных культур: материалы Всесоюз. науч.-произв. конф. 18–20.03.1968 г. Киев, 1970. С. 346–350.
6. Волуэв А. Г. Селекция черной смородины // Садоводство. 1983. № 3. С. 21–23.
7. Девятков А. С. Плодоводство Италии // Садоводство и виноградарство. 1991. № 9. С. 36–38.
8. Дереча О. А., Бакалова А. В. Застосування біологічних препаратів на смородині чорній проти комплексу попелиць // Вісник ЖНАЕУ. 2012. № 2 (31), т. 1. С. 75–82.
9. Дяченко І. Д. Зрошення смородини і порічок у південних районах Полісся // Сад. 1995. № 2.
10. Жучков Н. Г. Смородина черная. М., 1954.
11. Марковский В. С., Щербак А. В., Лоцицкий В. П. Интенсивная технология возделывания черной смородины. Киев, 1989.
12. Карпавичус И. Р., Квиклис А. М., Кижис К. И. и др. Подготовка плантаций смородины к комбайновой уборке // Садоводство и виноградарство. 1988. № 7. С. 3–4.
13. Ковтун І. М., Копань К. М., Марковский В. С. та інші. Ягідні культури. Київ, 1986.
14. Крамер З. Ягодные культуры в саду. М., 1980.
15. Куренной Н. М., Колтунов В. Ф., Черепяхин В. И. Плодоводство. М., 1985.

16. Кучер М. Ф. Продуктивність та біологічна здатність до формування врожаю нових сортів смородини в умовах Лісостепу України: зб. наук. праць Уманської дер. аграр. акад. Умань, 2001. С. 113–118.
17. Кучер М. Ф. Американська борошниста роса. Стійкість нових сортів смородини проти збудника хвороби // Захист рослин. 2002. № 1. С. 15.
18. Кушнір Є. М. Чорна смородина в Карпатах. Ужгород, 1965.
19. Куян В. Г. Удобрение черной смородины при посадке // Садоводство. 1963. № 2. С. 27–28.
20. Куян В. Г. О диагностике питания плодовых и ягодных растений // Химия в сельском хозяйстве. 1964. № 8. С. 7–10.
21. Куян В. Г. Агротехніка ягідних культур. Ужгород, 1969.
22. Куян В. Г. Деякі аспекти екології сільськогосподарського виробництва в Україні // Вісник ДААУ. 1999. № 1–2. С. 5–10.
23. Куян В. Г. Спеціальне плодівництво. Київ, 2004.
24. Куян В. Г. Технологічний календарний проект вирощування плодів смородини чорної // Технології та технологічні проекти вирощування основних сільськогосподарських культур. Житомир. 2007.
25. Куян В. Г., Овезмирадова О. Б. Якість ягід із зон радіологічного забруднення // Карантин і захист рослин. 2013. № 1 (198). С. 9–11.
26. Личенкова І. О. Нове у виробництві чорної смородини // Новини садівництва. 2013. № 2. С. 31–33.
27. Майдебур В. И., Книга К. М., Глушак Л. Е. и др. Размножение безвирусного посадочного материала смородины // Садоводство. 1986. № 1. С. 12–14.
28. Марковський В. С., Андрощук О. Ф., Дмитраш Н. І. Ріст і плодоношення смородини на темно-сірому опідзоленому ґрунті північного Лісостепу України // Садівництво. 1999. Вип. 49. С. 124–130.
29. Марковский В. С. Продуктивность черной смородины в уплотненных посадках // Садоводство и виноградарство. 1990. № 1. С. 34–37.
30. Марковский В. С. «Чаркор» покращує вкорінення живців смородини // Новини садівництва. 1998. № 1–2. С. 3–4.
31. Мельник О. В. Перспективні сорти та технологія вирощування смородини у світі // Новини садівництва. 1994. № 3. С. 11–14.
32. Овезмирадова О. Б. Накопичення та розподіл важких металів у ягідних рослинах // Проблеми адаптації та перспективи розвитку ягідництва: тези доп. і вист. на Всеукр. наук. конф. молодих вчених і спеціалістів, 8–10.12.2008 р. Київ. 2008. С. 123–124.
33. Овезмирадова О. Б. Динаміка накопичення важких металів смородиною чорною протягом вегетаційного періоду // Агротехнології для сталого виробництва конкурентноспроможної продукції: матеріали наук.-практ. конф. молодих вчен. і спеціал. (снт. Чабани, 28–30.11.2012 р.). Київ, 2012. С. 48–50.
34. Овезмирадова О. Б. Забруднення насаджень ягідних культур важкими металами в автомагістральних зонах // Вісн. держ. агрокол. ун-ту. 2008. № 1 (22). С. 290–295.
35. Орлова Н. Г. Повышены требования к качеству фруктов // Садоводство и виноградарство. 1990. № 5. С. 6–9.
36. Павлова Н. М. Черная смородина. Ленинград, 1955.
37. Патица В. П., Макаренко Н. А., Моклячук Л. І. Агроєкологічна оцінка мінеральних добрив та пестицидів. Київ, 2005.
38. Поздняков А. Д., Косякин А. С. Проблемы и перспективы промышленного возделывания смородины в нечерноземной зоне РСФСР // Садоводство и виноградарство. 1990. № 1. С. 24–26.
39. Марковский В. С., Андриенко М. В., Дяченко И. Д. Рекомендации по возделыванию кустарниковых ягодников в Украинской ССР. Киев, 1988.
40. Рыжков А. П. Дозы, сроки и способы внесения удобрений в насаждениях черной смородины в условиях Западной Сибири // Почвенные условия, удобрение и урожайность плодовых и ягодных культур: материалы Всесоюз. науч.-произв. конф. 18–20.03.1968 г. Киев, 1970. С. 350–353.
41. Самусь В. А. Научное обеспечение развития плодового хозяйства в Беларуси // Садівництво. 2000. Вип. 50. С. 36–42.
42. Северин В. Ф. Технология выращивания черной смородины в Сибири // Садоводство и виноградарство. 1991. № 7. С. 26–29.
43. Сенина В. И., Клочко П. В. Смородина и крыжовник // Промышленное садоводство. Киев, 1987.
44. Снижение содержания радиоактивных веществ в продукции растениеводства: рекомендации Госагропрома СССР. М., 1989.
45. Чухляев И. И., Осанов Б. П., Єфименко Д. И. та інші. Предпосадочное мульчирование почвы на ягодниках // Садоводство. 1983. № 3. С. 18–19.
46. Шагина Т. В. Омолаживающая обрезка черной смородины // Садоводство. 1981. № 6. С. 20–21.
47. Ягодные кустарники: пер. с англ. М., 1971.
48. Якименко О. Ф., Новопокровский В. С. Подбор сортов черной смородины для машинной уборки урожая // Садоводство и виноградарство. 1990. № 1. С. 37–39.
49. Якименко О. Ф. Срок эксплуатации насаждений черной смородины // Садоводство и виноградарство. 1990. № 5. С. 24–26.
50. Geech R. Curant Grower exciung // Farmen. 1980. № 7. Р. 10–12.
51. Makosz E. Wazna przyczyna niskich plonow jagodowych w Polsce // Jacodnik. 2012. № 2. Р. 52–53.
52. Uebel E. Ergebnisse langjahriger Kalidungunsversuche zu Johannisbeere und Apfel im sudbohemischen Obstbauggebiet der CSSR. 1. Ergebnisse der Bodenertrags und Blattuntersuchung bei Johannisbeere / E. Uebel // Arch. Gartenbau. 1982. № 30(7), Р. 339–359.

References

1. Kopan V. P. (ed). Atlas perspektivnykh sortov plodovykh i yagodnykh kultur Ukrainy [Atlas of Perspective Fruits and Berry Crops Species of Ukraine]. Kyiv. 1999 (in Russ.).
2. Boldyrev M. I. Zashchita okruzhayushchey sredy v svyazi s primeneniem pestitsidov [Protection of Environment under the Conditions of Pesticides Application]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1988. No. 12. P. 12–14 (in Russ.).

3. Bokhonova M. I. Problemy i perspektivy promyshlennogo vozdeystviya smorodiny v Leningradskoy oblasti [The Problems and Perspectives of Industrial Cultivation of Currants in Leningrad Oblast]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1990. No. 1. P. 29–31 (in Russ.).
4. Burmistrov A. D. Yagodnye kultury [Baccate Crops]. Leningrad. 1972. (in Russ.).
5. Voluznev A. G., Shkurko T. I. Udobrenie chyernoy smorodiny na poymennoy pochve Belorussii [Black Currants Fertilization on Flood Soil of Belarus]. *Pochvennye usloviya, udobrenie i urozhaynost plodovykh i yagodnykh kultur* (Kyiv, March 18–20, 1968). Kyiv. 1970. P. 346–350 (in Russ.).
6. Voluznev A. G. Seleksiya chyernoy smorodiny [Black Currants Selection]. *Sadovodstvo*. 1983. No. 3. P. 21–23 (in Russ.).
7. Devyatov A. S. Plodovodstvo Italii [Fruit-Growing in Italy]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1991. No. 9. P. 36–38 (in Russ.).
8. Derecha O. A., Bakalova A. V. Zastosuvannya biolohichnykh preparativ na smorodini chornii proty kompleksu popelyts [Application of Biological Preparations against Plant Louse on Black Currants]. *Visnyk ZhNAEU*. 2012. Vol. 1, No. 31. P. 75–82 (in Ukrainian).
9. Diachenko I. D. Zroshennia smorodiny i porichok u pivdennykh raionakh Polissia [Black and Red Currants Spraying in Southern Regions of Polissia]. *Sad*. 1995. No. 2 (in Ukrainian).
10. Zhuchkov N. G. Smorodina chyernaya [Black Currants]. Moscow, 1954 (in Russ.).
11. Markovskiy V. S., Shcherbak A. V., Loshchitskiy V. P. i dr. Intensivnaya tekhnologiya vozdeystviya chyernoy smorodiny [Intensive Technology of Black Currants Cultivation]. Kyiv, 1989 (in Russ.).
12. Karpavichus I. R., Kviklis A. M., Kizhis K. I. i dr. Podgotovka plantatsiy smorodiny k kombaynovoy uborce [Preparing Currants Plantations for Combine Harvesting]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1988. No. 7. P. 3–4 (in Russ.).
13. Kovtun I. M., Kopan K. M., Markovskiy V. S. ta in. Yahidni kultury [Baccate Crops]. Kyiv, 1986 (in Ukrainian).
14. Kramer Z. Yagodnye kultury v sadu [Baccate Crops in Garden]. Moscow, 1980 (in Russ.).
15. Kurennoy N. M., Koltunov V. F., Cherepakhin V. I. *Plodovodstvo [Fruit-Growing]*. Moscow, 1985 (in Russ.).
16. Kucher M. F. Produktivnist ta biolohichna zdatsnist do formuvannya vrozhaui novykh sortiv smorodiny v umovakh Lisostepu Ukrainy [Productivity and Biological Capability for Forming Harvest of New Currants Species under the Conditions of Ukraine]. *Zb. nauk. prats Umanskoï der. ahrrar. akad.* Uman, 2001. No. 2. P. 113–118 (in Ukrainian).
17. Kucher M. F. Amerykanska boroshnysta rosa. Stiikist novykh sortiv smorodiny proty zbudnyka khvoroby [American Flour Dew. Resistance of New Currants Species to the Disease Agent]. *Zakhyst Roslyn*. 2002. No. 1. P. 15 (in Ukrainian).
18. Kushnir Ye. M. Chorna smorodyna v Karpatakh [Black Currants in the Carpathians]. Uzhhorod, 1965 (in Ukrainian).
19. Kuyan V. G. Udobrenie chyernoy smorodiny pri posadke [Fertilizing Black Currants while Planting]. *Sadovodstvo*. 1963. No. 2. P. 27–28 (in Russ.).
20. Kuyan V. G. O diagnostike pitaniya plodovykh i yagodnykh rasteniy [About the Diagnostics of Fruit and Baccate Plants Nourishment]. *Khimiya v selskom khozyaystve*. 1964. No. 8. P. 7–10 (in Russ.).
21. Kuyan V. G. Ahrotekhnika yahidnykh kultur [Agritechnology of Baccate Crops]. Uzhhorod, 1999 (in Ukrainian).
22. Kuyan V. G. Deiaki aspekty ekolohii silskohospodarskoho vyrobnytstva v Ukraini [Some Aspects of Ecology in Agricultural Production in Ukraine]. *Visnyk DAAU*. 1999. No. 1–2. P. 5–10 (in Ukrainian).
23. Kuyan V. G. Spetsialne plodivnytstvo [Special Fruit-Growing]. Kyiv, 2004 (in Ukrainian).
24. Kuyan V. G. Tekhnolohichni kalendarniy proekt vyroshchuvannya plodiv smorodiny chornoï [Technological Calendar Scheduling of Black Currants Cultivation]. Tekhnolohii ta tekhnolohichni proekty vyroshchuvannya osnovnykh silskohospodarskykh kultur [Technologies and Technological Scheduling of Basic Agricultural Crops Cultivation]. Zhytomyr, 2007 (in Ukrainian).
25. Kuyan V. G., Ovezmyradova O. B. Yakist yahid iz zon radiolohichnoho zabrudnennia [The Quality of Berries from Radiologically Contaminated Zones]. *Karantyn i zachyst Roslyn*. 2013. No. 1 (198). P. 9–11 (in Ukrainian).
26. Lychenkova I. O. Nove u vyrobnytstvi chornoï smorodiny [New Ideas in Black Currants Production]. *Novyny sadivnytstva*. 2013. No. 2. P. 31–33 (in Ukrainian).
27. Maydebura V. I., Kniga K. M., Glushak L. Ye i dr. Razmnozhenie bezvirusnogo posadochnogo materiala smorodiny [Multiplication of Virus Tested Stem Cuttings of Currants]. *Sadovodstvo*. 1986. No. 1. P. 12–14 (in Ukrainian).
28. Markovskiy V. S., Androshchuk O. F., Dmytrash N. I. Rist i plodonoshennia smorodiny na temno-siromu opidzolenomu hruntii pivnichnoho Lisostepu Ukrainy [The Growth and Fruiting of Currants on Dark Grey Podzolic Soil of Northern Forest Steppe Zone of Ukraine]. *Sadivnytstvo*. 1999. Vol. 49. P. 124–130 (in Ukrainian).
29. Markovskiy V. S. Produktivnost chyernoy smorodiny v uplotnennykh posadkakh [Black Currants Productivity in Densified Bedding]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1990. No. 1. P. 34–37 (in Russ.).
30. Markovskiy V. S. «Charkor» pokrashchuie vkorinnennia zhyvtsiv smorodiny [«Charkov» Improves Rooting of Currants Cuttings]. *Novyny sadivnytstva*. 1998. No. 1–2. P. 3–4 (in Ukrainian).
31. Melnyk O. V. Perspektivni sorty ta tekhnolohii vyroshchuvannya smorodiny u sviti [Perspective Species and Cultivation Technologies of Currants in the World]. *Novyny sadivnytstva*. 1994. No. 3. P. 11–14 (in Ukrainian).
32. Ovezmyradova O. B. Nakopychennia ta rozpodil vazhkykh metaliv u yahidnykh roslinakh [Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Baccate Plants]. Proceedings of the Problemy adaptatsii ta perspektivy rozvytku yahidnytstva (Ukrainian, Kyiv, December 8–10, 2008) Kyiv, 2008. P. 123–124 (in Ukrainian).
33. Ovezmyradova O. B. Dynamika nakopychennia vazhkykh metaliv smorodynoiu chornoïu protiahom vehetatsiinoho periodu [Dynamics of Heavy Metals Accumulation by Black Currants during Vegetative Period] Proceedings of the Ahrotekhnolohii dlia staloho vyrobnytstva konkurentnospromozhnoi produktsii (Ukrainian, smt Chabany, November 28–30, 2012). Kyiv, 2012. P. 48–50 (in Ukrainian).
34. Ovezmyradova O. B. Zabrudnennia nasadzen yahidnykh kultur vazhkymy metalamy v avtomahistralnykh zonakh [Contamination of Baccate Plantations by Heavy Metals in Highways Zones]. *Visn. derzh. ahroekol. un.-tu*. 2008. No. 1 (22). P. 290–295 (in Ukrainian).
35. Orlova N. G. Povysheny trebovaniya k kachestvu fruktov [Increased Requirements to Fruits Quality]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1990. No. 5. P. 6–9 (in Russ.).
36. Pavlova N. M. Chyernaya smorodina [Black Currants]. Leningrad, 1955 (in Russ.).
37. Patyka V. P., Makarenko N. A., Mokliachuk L. I., et al. Ahroekolohichna otsinka mineralnykh dobriv ta pestytsydiv [Agroecological Estimation of Mineral Fertilizers and Pesticides]. Kyiv, 2005 (in Ukrainian).

38. Pozdnyakov, A. D., Kosyakin A. S. Problemy i perspektivy promyshlennogo vozdel'yvaniya smorodiny v nechernozemnoy zone RSFSR [Problems and Perspectives of Currants Industrial Cultivation on Non Black Soils of Russian Federation]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1990. No. 1. P. 24–26 (in Russ.).
39. Markovskiy V. S., Andrienko M. V., Dyachenko I. D., et al. Rekomendatsii po vozdel'yvaniyu kustarnikovykh yagodnikov v Ukrainskoy SSR [Recommendations on Baccate Bushes Cultivation in Ukraine]. Kyiv, 1988 (in Ukrainian).
40. Ryzhkov A. P. Dozy, sroki i sposoby vneseniya udobreniy v nasazhdeniyakh chyernoy smorodiny v usloviyakh Zapadnoy Sibiri [Terms and Methods of Fertilizers Application on Black Currants Plantations under the Conditions of Western Siberia]. Proceedings of the Pochvennye usloviya, udobrenie i urozhaynost plodovikh i yagodnykh kultur: materialy Vsesoyuz (Kyiv, March 18–20, 1968). Kyiv, 1970. P. 350–353 (in Russ.).
41. Samus V. A. Nauchnoe obespechenie razvitiya plodovodstva v Belarusi [Scientific Supply of Fruit-Growing Development in Belarus]. *Sadivnitstvo*. 2000. Vol. 50. P. 36–42 (in Russ.).
42. Severin V. F. Tekhnologiya vyrashchivaniya chyernoy smorodiny v Sibiri [Technology of Black Currants Growing in Siberia]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1991. No. 7. P. 26–29 (in Russ.).
43. Senina V. I., Klochko P. V. Smorodina i kryzhovnik [Currants and Gooseberry] / Promyshlennoe sadovodstvo [Industrial Gardening]. Kyiv, 1987 (in Ukrainian).
44. Snizhenie soderzhaniya radioaktivnykh veshchestv v produktsii rasteniyevodstva [The Decrease of Radionuclides Content in Plant Production]: rekomendatsii Gosagroproma SSSR. Moscow, 1989. (in Russ.).
45. Chukhlyaev I. I., Osanov B. P., Yefimenko D. I. ta in. Predposadochnoe mulchirovanie pochvy na yagodnikakh [Preplanting Mulching of Soil on Berrying Ground]. *Sadovodstvo*. 1983. No. 3. P. 18–19 (in Ukrainian).
46. Shagina T. V. Omolazhivayushchaya obrezka chyernoy smorodiny [Renovation Pruning of Black Currants]. *Sadovodstvo*. 1981. No. 6. P. 20–21 (in Russ.).
47. Yagodnye kustarniki [Baccate Bushes]: per. s angl. Moscow, 1971 (in Russ.).
48. Yakimenko O. F., Novopokrovskiy V. S. Podbor sortov chyernoy smorodiny dlya mashinnoy uborki urozhaya [Selection of Black Currant Species for Combine Harvesting]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1990. No. 1. P. 37–39 (in Russ.).
49. Yakimenko O. F. Srok ekspluatatsii nasazhdeniy chyernoy smorodiny [Terms of Working Lifespan of Currants Plantations]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 1990. No. 5. P. 24–26 (in Russ.).
50. Geech R. Curant Grower exciung. *Farmen*. 1980. No. 7. P. 10–12.
51. Makosz E. Wazna przyzyna niskich plonow jagodowych w Polsce. *Jacodnik*. 2012. No. 2. P. 52–53.
52. Uebel E. Ergebnisse langjahriger Kalidungunsversuche zu Johannisbeere und Apfel im sudbohemischen Obstbauggebiet der CSSR. 1. Ergebnisse der Bodenertrags und Blattuntersuchung bei Johannisbeere. *Arch. Gartenbau*. 1982. No. 30(7). P. 339–359.

Статья поступила в редколлегию 07.05.2018
Received by editorial board 07.05.2018

УДК 634.737:581.5:581.522.4(476)

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ УГЛЕВОДОВ В ПЛОДАХ ГОЛУБИКИ НА РЕКУЛЬТИВИРУЕМОМ УЧАСТКЕ ТОРФЯНОЙ ВЫРАБОТКИ НА СЕВЕРЕ БЕЛАРУСИ

Ж. А. РУПАСОВА¹⁾, А. П. ЯКОВЛЕВ¹⁾, Н. Б. КРИНИЦКАЯ¹⁾, А. А. ЯРОШУК¹⁾, И. В. САВОСЬКО¹⁾,
Л. В. ГОНЧАРОВА¹⁾, З. М. АЛЕЩЕНКОВА²⁾, Э. И. КОЛОМИЕЦ²⁾

¹⁾Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 2в, 220012, Минск, Беларусь

²⁾Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, ул. Купревича, 2, 220141, Минск, Беларусь

Приведены результаты сравнительного исследования в опытной культуре на рекультивируемом участке торфяной выработки углеводного состава плодов *V. angustifolium* и межвидовых гибридов *Northcountry* и *Northblue* на фоне внесения полного минерального ($N_{16}P_{16}K_{16}$) и ряда микробных удобрений – жидкого препарата МаКлор в концентрациях 10 и 50 %, жидкого и сухого препарата АгроМик, а также жидкого препарата Бактопин при дифференцированном и совместном применении.

Установлено, что внесение микробных и минеральных удобрений в основном способствовало обогащению плодов голубики на 4–20 %, по сравнению с контролем, растворимыми сахарами и увеличению их сахарокислотного индекса на 44–142 %, а также. Независимо от генотипа растений голубики, наиболее выраженное позитивное влияние на содержание в плодах растворимых сахаров и их вкусовые свойства оказало внесение жидкого препарата АгроМик и полного минерального удобрения.

Образец цитирования:

Рупасова Ж. А., Яковлев А. П., Н. Б. Криницкая, Ярошук А. А., Савосько И. В., Гончарова Л. В., Алещенкова З. М., Коломиец Э. И. Влияние удобрений на накопление углеводов в плодах голубики на рекультивируемом участке торфяной выработки на севере Беларуси // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 118–123.

For citation:

Rupasova Z. A., Yakovlev A. P., Krinitskaya N. B., Yaroshuk A. A., Savosko I. V., Goncharova L. V., Aleschenkova Z. M., Kolomiets E. I. Impact of fertilizings on accumulation of carbohydrates in blueberry fruits on recultivated cutover peatlands in the north of Belarus. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 118–123 (in Russ.).

Авторы:

Жанна Александровна Рупасова – доктор биологических наук, член-корреспондент НАН Беларуси; заведующий лабораторией химии растений.

Александр Павлович Яковлев – кандидат биологических наук, доцент; заведующий лабораторией экологической физиологии растений.

Наталья Болеславовна Криницкая – научный сотрудник лаборатории химии растений.

Андрей Андреевич Ярошук – младший научный сотрудник, аспирант лаборатории химии растений.

Ирина Валерьевна Савосько – младший научный сотрудник лаборатории химии растений.

Людмила Владимировна Гончарова – кандидат биологических наук, доцент, ученый-секретарь.

Зинаида Михайловна Алещенкова – доктор биологических наук; заведующий лабораторией взаимоотношений микроорганизмов почвы и высших растений института микробиологии.

Эмилия Ивановна Коломиец – доктор биологических наук, член-корреспондент НАН Беларуси; директор института микробиологии, заведующий лабораторией средств биологического контроля.

Authors:

Zhanna A. Rupasova, doctor of sciences (biology), corresponding member of NAS of Belarus, professor; head of epy laboratory of chemistry of plants.

J.Rupasova@cbg.org.by

Alexander P. Yakovlev, PhD (biology), associate professor; head of the laboratory of ecological physiology of plants.

A.Yakovlev@cbg.org.by

Natalia B. Krinitskaya, researcher of the laboratory of plant chemistry.

T.Vasileuskaya@cbg.org.by

Andrey A. Yaroshuk, junior researcher, graduate student of the laboratory of chemistry of plants.

alrikdorey@mail.ru

Irina V. Savosko, junior researcher of the laboratory of chemistry of plants.

irinay@tut.by

Liudmila V. Goncharova, PhD (biology), associate professor; scientific secretary.

marivashkevich@yandex.ru

Zinaida M. Aleschenkova, doctor of sciences (biology); head of the laboratory of interrelations between microorganisms of soil and higher plants.

aleschenkova@mbio.bas-net.by

Emilia I. Kolomiets, doctor of sciences (biology), corresponding member of NAS of Belarus; director of the institute of microbiology, head of the laboratory of biological control means.

kolomiets@mbio.bas-net.by

Под действием испытываемых агроприемов выявлены противоположные по знаку изменения в содержании пектиновых веществ в плодах *V. angustifolium* и межвидовых гибридов относительно контроля в пределах 4–37 % (отрицательные в первом случае и положительные – во втором), при наибольшей выразительности выявленных эффектов на фоне применения препарата АгроМик, совместного внесения препаратов Бактопин и АгроМик, а также N₁₆P₁₆K₁₆.

Ключевые слова: фиторекультивация; голубика; сорта; плоды; растворимые сахара; пектины; сахарокислотный индекс.

INFLUENCE OF MINERAL AND MICROBIAL FERTILIZERS ON FRUITING PARAMETERS AND THE CONTENT OF ORGANIC ACIDS IN THE FRUITS OF BLUEBERRY ON OPENCAST PEATLAND IN CONDITIONS OF THE NORTH OF BELARUS

Z. A. RUPASOVA^a, A. P. YAKOVLEV^a, N. B. KRINITSKAYA^a, A. A. YAROSHUK^a, I. V. SAVOSKO^a,
L. V. GONCHAROVA^a, Z. M. ALESCHENKOVA^b, E. I. KOLOMIETS^b

^aThe Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus,
Surganova street, 2c, 220012, Minsk, Belarus

^bThe Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus,
Kuprevicha street, 2, 220141, Minsk, Belarus

Corresponding author: A. P. Yakovlev (A.Yakovlev@cbg.org.by)

The paper deals with the results of a comparative study of morphometric, bioproduction and biochemical characteristics of *Vaccinium angustifolium* fruits and the intraspecific hybrids of Northcountry and Northblue (grown in the experimental culture at the recultivated opencast peatland in the north of the Republic) against the background of full mineral (N16P16K16) and microbial (liquid preparation «MaKlor» in concentrations of 10 and 50 %; liquid and dry forms of «Agromik» preparation; liquid preparation «Bactopin») fertilizers application under differentiated and joint application.

Found that the enhancement of the mineral nutrition of examined blueberry taxa did not have a significant effect on the size of the fruits, but contributed to an increase in their yield by 17–26 %, compared with the control. The most significant differences revealed against the background of N16P16K16 with 50 % fertilizer «MaKlor» (*V. angustifolium* and Northcountry variety), as well as «Agromik» preparation (Northblue variety). The least increase in yield took place against the background of the application of «Bactopin».

The use of both microbial and mineral fertilizers contributed to the enrichment of blueberry fruits with dry substances (by 5–21 % compared to the control), with a pronounced depletion of free organic and ascorbic acids by 4–50 % and 7–29 %, respectively, with the most significant manifestation of the response in a narrow-leaved species.

Key words: opencast peatland; recultivation; mineral fertilizers; microbial preparations; effectiveness; blueberries fruits; biochemical composition.

Введение

Важнейшим элементом технологии фиторекультивации выбывших из промышленной эксплуатации торфяных месторождений верхового типа на основе создания локальных агроценозов интродуцированных ягодных растений сем. Ericaceae, в том числе голубики высокорослой, является оптимизация режима минерального питания данной культуры [1]. Однако, как показал практический опыт, повышение плодородия этих бесплодных земель с помощью средств химизации недостаточно эффективно, поскольку связано со значительными затратами на приобретение и внесение дорогостоящих минеральных удобрений, приводящих к загрязнению окружающей среды вредными веществами. Наиболее перспективным, на наш взгляд, представляется использование в этих целях новейших микробно-растительных ассоциаций, способствующих активизации микробиологических и биохимических процессов в остаточном слое торфяной залежи. При этом будет обеспечено получение экологически чистой высококачественной ягодной продукции, соответствующей требованиям органического земледелия.

В настоящее время в Институте микробиологии НАН Беларуси в рамках ГНТП «Промышленные биотехнологии» уже создан ряд высокоэффективных микробных удобрений на основе ассоциативных азотфиксирующих и фосфатмобилизирующих бактерий, положительно влияющих на развитие сельскохозяйственных культур [2; 3]. Вместе с тем до настоящего времени не было проведено комплексных

испытаний микробных препаратов на ягодных растениях сем. Ericaceae в специфических условиях на участках выработанных торфяных месторождений, характеризующихся чрезвычайно низким уровнем плодородия и сильноокислой реакцией почвенного раствора. В этой связи в 2016–2017 гг. с использованием опытной культуры на рекультивируемом участке торфяной выработки в Докшицком р-не Витебской обл. было проведено сравнительное исследование влияния полного минерального и трех видов микробных удобрений – МаКлор, АгроМик и Бактопин на накопление углеводов в плодах интродуцированных таксонов голубики.

Материалы и методы исследований

В качестве объектов исследований использовали растения узколистной голубики *V. angustifolium* и сортов *Northcountry* и *Northblue*, являющихся межвидовыми гибридами (*V. angustifolium* × *V. corymbosum*). Полевые опыты были заложены на участке сильноокислого ($\text{pH}_{\text{KCl}} - 2,8$), малоплодородного (содержание P_2O_5 и K_2O не более 12–15 и 11–21 мг/кг соответственно), полностью лишённого растительности остаточного слоя донного торфа средней степени разложения, представленного сфагново-древесно-пушицевой ассоциацией. Схема опыта включала 6 вариантов в трехкратной повторности и предусматривала двукратное за сезон (в мае и июне) луночное внесение испытываемых удобрений: 1 – контроль, без внесения удобрений; 2 – внесение 10 %-ного раствора жидкого удобрения МаКлор (0,5 л / растение) в сочетании с сухим микоризным удобрением АгроМик из расчета 100 г на 10 л рабочего раствора, или 5,5 г на 1 растение; 3 – внесение 50 %-ного раствора жидкого удобрения МаКлор (0,5 л / растение); 4 – внесение жидкого препарата АгроМик (0,5 л / растение); 5 – внесение жидкого препарата Бактопин (0,5 л / растение) в сочетании с сухим микоризным удобрением АгроМик (100 г на 10 л рабочего раствора, или 5,5 г на 1 растение); 6 – внесение в почву NPK 16:16:16 кг/га д. в., или 5 г на 1 растение. В каждом варианте опыта было высажено по 18 растений голубики.

В период плодоношения опытных растений в высушенных при температуре 60 °С пробах плодов повариантно определяли общее содержание растворимых сахаров ускоренным полумикрометодом по Дюбойсу [4] и пектиновых веществ кальциево-пектатным методом [5]. Аналитические определения выполнены в 3-кратной биологической повторности. Данные статистически обработаны с использованием программы *Excel*.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе оценки влияния удобрений на содержание в плодах модельных таксонов голубики сухих веществ и органических кислот, которая также проводилась в рамках данного исследования [6], нами показано, что внесение микробных, и минеральных удобрений в основном способствовало обогащению плодов голубики на 5–21 % сухими веществами, по сравнению с контролем, при выраженном в разной степени, в зависимости от генотипа растений и вида удобрения, обеднении их свободными органическими и аскорбиновой кислотами на 4–50 и 7–29 % соответственно, а также при наиболее значительном проявлении ответной реакции у *V. angustifolium*.

Установленное на фоне внесения удобрений обеднение плодов голубики свободными органическими кислотами косвенно свидетельствовало об улучшении их вкусовых свойств. Однако существенную роль в определении сахарокислотного индекса плодов играют также растворимые сахара, содержание которых в их сухой массе варьировалось в рамках эксперимента в сходных у *V. angustifolium* и сорта *Northblue* диапазонах – от 45,3 до 54,3 % (табл. 1).

Подобный интервал варьирования данного признака у сорта *Northcountry* охватывал область более низких значений – от 40,3 до 47,3 %. При этом наиболее высоким сахарокислотным индексом с диапазоном изменения в пределах 6,0–14,5, а, значит, и самым сладким вкусом, характеризовались плоды *V. angustifolium*, тогда как у сортов *Northblue* и *Northcountry* данный показатель был ниже и соответствовал области значений 5,7–12,6.

Таблица 1

Содержание растворимых сахаров и пектиновых веществ в сухой массе плодов голубики
в вариантах полевого опыта, %

Table 1

Content of soluble sugar and pectin substances in dry mass of fruits of a blueberry in variants of a field experiment, %

Вариант опыта	Растворимые сахара		Сахарокислотный индекс		Пектиновые вещества	
	X ± st	t _{Cr}	X ± st	t _{Cr}	X ± st	t _{Cr}
V. angustifolium						
1	45,3±0,3		6,0±0,1		8,83±0,09	
2	47,3±0,3	4,2*	10,5±0,2	23,8*	9,57±0,12	4,9*
3	48,0±0,1	8,0*	11,3±0,1	48,8*	8,87±0,09	0,3
4	50,0±1,0	4,4*	13,2±0,3	21,5*	8,20±0,10	-4,8*
5	45,3±0,7	0	11,2±0,1	33,4*	8,47±0,09	-2,9*
6	54,3±0,7	12,1*	14,5±0,3	30,5*	8,50±0,06	-3,2*
Copt Northcountry						
1	43,0±0,1		5,7±0,1		7,07±0,07	
2	46,7±0,7	5,5*	10,4±0,2	19,3*	7,13±0,09	0,6
3	40,3±0,7	-4,0*	9,5±0,2	18,2*	7,60±0,06	6,0*
4	45,3±0,7	3,5*	12,0±0,1	70,5*	8,43±0,07	14,5*
5	45,3±0,7	3,5*	11,2±0,1	37,4*	8,17±0,07	11,7*
6	47,3±0,7	6,5*	12,6±0,3	27,2*	7,70±0,06	7,2*
Copt Northblue						
1	53,0±0,1		7,3±0,1		7,70±0,12	
2	48,0±0,6	-8,7*	10,5±0,1	22,3*	8,23±0,09	3,7*
3	46,7±0,7	-9,5*	7,0±0,1	-3,5*	8,07±0,08	2,9*
4	52,3±0,7	-1,0	10,8±0,2	18,9*	8,37±0,09	4,6*
5	49,0±1,0	-4,0*	6,6±0,1	-6,1*	9,13±0,09	9,9*
6	54,3±0,3	4,0*	11,5±0,1	28,3*	10,53±0,09	19,5*

Примечание. *Статистически значимые по t-критерию Стьюдента различия с контролем при p<0,05.

Под действием испытывавшихся агроприемов была выявлена существенная активизация биосинтеза растворимых сахаров в плодах сорта *Northcountry*, но особенно следует выделить *V. angustifolium* (табл. 2). В большинстве вариантов опыта с использованием удобрений имело место достоверное увеличение в них, по сравнению с контролем, содержания растворимых сахаров на 5–10 %: в первом случае – на 4–20 %, во втором – при наибольшей выразительности данных различий на фоне внесения N₁₆P₁₆K₁₆. При этом у *V. angustifolium* не было выявлено значимого эффекта от совместного применения жидкого препарата Бактопин и микоризного удобрения АгроМик, а в плодах сорта *Northcountry* установлено снижение на 6 % содержания растворимых сахаров при внесении удобрения МаКлор в 50 %-ной концентрации. Несмотря на это у обозначенных таксонов голубики во всех без исключения удобрявшихся вариантах опыта, за счет установленного в данном эксперименте преимущественного ослабления биосинтеза титруемых кислот [6] при усилении накопления растворимых сахаров, вкусовые свойства плодов в 1,7–2,4 раза превосходили таковые в контроле, особенно в 4- и 6-м вариантах опыта (табл. 2). Относительно сорта *Northblue*, то, в отличие от сорта *Northcountry* и *V. angustifolium*, для него в вариантах опыта с внесением удобрений было показано не усиление, а преимущественное ослабление накопления растворимых сахаров на 8–12 %. Лишь на фоне внесения N₁₆P₁₆K₁₆ отмечено крайне незначительное (в пределах 2–3 %), но все же достоверное увеличение, по сравнению с контролем, содержания последних при отсутствии значимого эффекта при использовании жидкого препарата АгроМик. При этом из-за более высоких темпов обеднения плодов данного сорта свободными органическими кислотами [6], нежели растворимыми сахарами, значения их сахарокислотного индекса во 2-м (особенно в 4- и 6-м вариантах) опыта оказались на 44–58 % выше, чем в контроле. Это позволяет сделать вывод о том, что, независимо от генотипа растений голубики, наиболее выраженное позитивное влияние на содержание в плодах растворимых сахаров и их вкусовые свойства оказало внесение жидкого препарата АгроМик и полного минерального удобрения.

Таблица 2

Относительные различия с контролем вариантов полевого опыта с внесением удобрений
в содержании углеводов в плодах голубики, %

Table 2

Relative differences in the carbohydrates of blueberry fruits in field experiments with fertilization, % of control

Показатель	Варианты опыта				
	2	3	4	5	6
	V. angustifolium				
Растворимые сахара	+4,4	+6,0	+10,4	–	+19,9
Сахарокислотный индекс	+75,0	+88,3	+120,0	+86,7	+141,7
Пектиновые вещества	+8,4	–	-7,1	-4,1	-3,7
	Copt Northcountry				
Растворимые сахара	+8,6	-6,3	+5,3	+5,3	+10,0
Сахарокислотный индекс	+82,5	+66,7	+110,5	+96,5	+121,1
Пектиновые вещества	–	+7,5	+19,2	+15,6	+8,9
	Copt Northblue				
Растворимые сахара	-9,4	-11,9	–	-7,5	+2,5
Сахарокислотный индекс	+43,8	-4,1	+47,9	-9,6	+57,5
Пектиновые вещества	+6,9	+4,8	+8,7	+18,6	+36,8

Примечание. Прочерк означает отсутствие статистически значимых по t-критерию Стьюдента различий с контролем при $p < 0,05$.

Важнейшим компонентом углеводного пула плодов голубики являются также пектиновые вещества – полисахариды коллоидного типа, образующие в присутствии органических кислот и сахаров желеобразные продукты. В связи с этим они широко используются в пищевой промышленности для приготовления кондитерских изделий. Пектины, обладая высоким адсорбирующим действием, способны связывать токсичные соединения и тяжелые металлы в нерастворимые комплексные соединения, выводимые из организма естественным путем. Данные соединения улучшают пищеварение, ингибируют гнилостные процессы в кишечнике и способствуют выработке витаминов группы В. Благодаря разностороннему действию на человеческий организм, препараты пектина широко используются в лечебно-профилактическом питании.

По нашим оценкам, модельные таксоны голубики характеризовались сходными параметрами накопления в плодах данных соединений, варьировавшимися в рамках эксперимента в диапазонах от 8,20 до 9,57 % сухой массы у *V. angustifolium*, от 7,07 до 8,43 % у сорта *Northcountry* и от 7,70 до 10,53 % у сорта *Northblue* (табл. 1). Однако в ответной реакции пектинового комплекса плодов на внесение удобрений были выявлены весьма существенные межвидовые различия. Так, если у *V. angustifolium* в большинстве случаев было показано незначительное (в пределах 4–7 %) снижение содержания пектинов относительно контроля, то у обоих межвидовых гибридов, наблюдалось увеличение их содержания на 8–19 % у сорта *Northcountry* и на 5–37 % у сорта *Northblue* при наиболее выразительном проявлении выявленных эффектов в 4, 5 и 6 вариантах опыта на фоне применения жидкого препарата АгроМик, совместного внесения препаратов Бактопин и АгроМик, а также $N_{16}P_{16}K_{16}$ (табл. 2).

Заключение

В результате сравнительного исследования в опытной культуре на рекультивируемом участке торфяной выработки углеводного состава плодов *V. angustifolium* и межвидовых гибридов *Northcountry* и *Northblue* на фоне внесения полного минерального ($N_{16}P_{16}K_{16}$) и ряда микробных удобрений – жидкого препарата МаКлор в концентрациях 10 и 50 %, жидкого и сухого препарата АгроМик, а также жидкого препарата Бактопин при дифференцированном и совместном применении, установлено следующее:

1. Внесение микробных и минеральных удобрений в основном способствовало обогащению плодов голубики на 4–20 %, по сравнению с контролем, растворимыми сахарами и увеличению их сахарокислотного индекса на 44–142 %.

2. Независимо от генотипа растений голубики наиболее выраженное позитивное влияние на содержание в плодах растворимых сахаров и их вкусовые свойства оказало внесение жидкого препарата АгроМик и полного минерального удобрения.

3. Под действием испытываемых агроприемов выявлены противоположные по знаку изменения в содержании пектиновых веществ в плодах *V. angustifolium* и межвидовых гибридов относительно контроля в пределах 4–37 % (отрицательные в первом случае и положительные – во втором), при наибольшей выразительности выявленных эффектов на фоне применения препарата АгроМик, совместно-го внесения препаратов Бактопин и АгроМик, а также $N_{16}P_{16}K_{16}$.

Библиографические ссылки

1. Рупасова Ж. А., Яковлев А. П. Фиторекультивация выбывших из промышленной эксплуатации торфяных месторождений севера Беларуси на основе культивирования ягодных растений сем. Ericaceae. Минск, 2011.
2. Алещенко З. М. Микробные удобрения для стимуляции роста и развития растений // Наука и инновации. 2015. № 8 (150). С. 66–67.
3. Соловьева Е. А., Савчиц Т. Л., Алещенко З. М. и др. Микробный препарат АгроМик для стимуляции роста и развития тритикале // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты: сб. науч. тр. Минск, 2013. С. 331–342.
4. Большой практикум «Биохимия». Лабораторные работы: учеб. пособие / сост. М. Г. Кусакина, В. И. Суворов, Л. А. Чудинова. Пермь, 2012.
5. Методы биохимического исследования растений / под ред. А. И. Ермакова. Ленинград, 1987.
6. Рупасова Ж. А., Яковлев А. П., Алещенко З. М. и др. Влияние минеральных и микробных удобрений на параметры плодоношения и содержание органических кислот в плодах голубики на выработанном участке торфяного месторождения на севере Беларуси // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2017. № 4. С. 100–106.

References

1. Rupasova J. A., Yakovlev A. P. [Phytorecultivation of opencast peatlands on the basis of cultivation of berry plants of the family Ericaceae in conditions of the north of Belarus]. Minsk, 2011 (in Russ.).
2. Aleshchenkova Z. M. [Microbial of fertilizing for stimulation of growth and development of plants]. *Science and Innovations*. 2015. No. 8 (150). Pp. 66–67 (in Russ.).
3. Solovjeva E. A., Savchits T. L., Aleshchenkova Z. M., et. al. [Microbial AgroMic preparation for stimulation of growth and development of triticale]. *Microbial biotechnologies: fundamental and applied aspects*: coll. sci. tr. Minsk, 2013. P. 331–342 (in Russ.).
4. Kusakina M. G., Suvorov V. I., Chudinova L. A. (comp.) [The big practical work «Biological chemistry». Laboratory works: studies. schoolbook]. Perm, 2012 (in Russ.).
5. Ermakov A. I. (ed.) [Methods biochemical study of plants]. Leningrad, 1987 (in Russ.).
6. Rupasova Zh. A., Yakovlev A. P., Aleshchenkova Z. M., et. al. [Influence of mineral and microbial fertilizers on fruiting parameters and the content of organic acids in the fruits of blueberry on opencast peatland in conditions of the North of Belarus]. *Ecology: J. of Belarusian State University*. 2017. No. 4. P. 100–106 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 07.05.2018
Received by editorial board 07.05.2018

УДК 631.879

ОЦЕНКА СОСТАВА ОТХОДОВ ЗЕРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А. В. СОРОКА¹⁾, Н. Ф. ТЕРЛЕЦКАЯ¹⁾, А. Н. ГАПОНЮК¹⁾, А. С. АНТОНЮК¹⁾

*¹⁾Полесский аграрно-экологический институт Национальной академии наук Беларуси,
ул. Московская, 204/1-1, 224020, Брест, Беларусь*

Проведена оценка состава отходов зерноперерабатывающих предприятий. Установлено, что отходы зерновых являются ценным органическим удобрением, которое может быть использовано в качестве альтернативы традиционным органическим удобрениям.

Ключевые слова: зерноотходы; органическое удобрение; физический и химический состав; засоренность.

EVALUATION OF GRAIN PROCECCING ENTERPISES WASTE COMPOUNDS

A. V. SOROKA^a, N. F. TSIARLETSKAYA^a, A. N. GAPONIUK^a, A. S. ANTONIUK^a

*^aPoleski agrarian-ecological institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Moskovskaya street, 204/1-1, 224020, Brest, Belarus*

Corresponding author: N. F. Tsiarletskaia (klmvntsh@rambler.ru)

The composition of wastes of grain processing enterprises was estimated. It is established that grain wastes are a valuable organic fertilizer, and can be used as an alternative to traditional organic fertilizers.

Key words: grain wastes; organic fertilizer; physical and chemical composition; weediness.

Введение

Проблема утилизации отходов характерна для многих типов промышленных производств, в том числе и для предприятий, перерабатывающих сельскохозяйственную продукцию. Во всех странах имеются и постоянно накапливаются большие запасы малоиспользуемых или вообще неиспользуемых отходов

Образец цитирования:

Сорока А. В., Терлецкая Н. Ф., Гапонюк А. Н., Антонюк А. С. Оценка состава отходов зерноперерабатывающих предприятий // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 124–128.

For citation:

Soroka A. V., Tsiarletskaia N. F., Gaponiuk A. N., Antoniuk A. S. Evaluation of grain proceccing enterpises waste compounds. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 124–128 (in Russ.).

Автор:

Андрей Викторович Сорока – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий лабораторией «Агробиология».

Наталья Федоровна Терлецкая – научный сотрудник лаборатории «Агробиология».

Андрей Николаевич Гапонюк – научный сотрудник лаборатории «Агробиология».

Александра Степановна Антонюк – научный сотрудник лаборатории «Агробиология».

Author:

Andrei V. Soroka, PhD (agriculture), associate professor; head of the laboratory «Agrobiology».

agropolesia@rambler

Natallia F. Tsiarletskaia, researcher of the laboratory «Agrobiology».

klmvntsh@rambler.ru

Andrei N. Gaponiuk, researcher of the laboratory «Agrobiology».

agropolesia@rambler

Aliaksandra S. Antoniuk, researcher of the laboratory «Agrobiology».

agropolesia@rambler

растениеводства, зерноперерабатывающих, мукомольных производств, лесотехнической и пищевой промышленности, а также отходов животноводства и птицеводства, что приводит к ухудшению экологической обстановки.

Одним из наиболее перспективных и широко распространенных подходов в области рационального использования отходов агропромышленного комплекса, в том числе зерноперерабатывающих и зернозаготовительных предприятий, является возможность их применения в растениеводческой отрасли сельскохозяйственного производства с учетом охраны окружающей среды. Большинство отходов, образующихся при переработке зерна, многокомпонентны по набору химических элементов, имеют органическую природу, что повышает их сродство к органическому веществу почвы. Однако, несмотря на вышеизложенное, из всего комплекса предприятий зерноперерабатывающее производство характеризуется низкой степенью использования отходов. В литературе также недостаточно научно обоснованных решений по разработке ресурсосберегающих технологий в зерноперерабатывающей промышленности, особенно применения в земледелии отходов, которые нерационально использовать в энергетике и животноводстве [1–3].

В связи с этим проблема поиска новых и альтернативных способов утилизации отходов зерноперерабатывающих предприятий актуальна и является одной из основных задач агропромышленного сектора [4]. Цель исследования – изучение состава зерновых отходов предприятий Брестской обл.

Материалы и методы исследования

Изучение состава зерноотходов проводилось в 2016–2017 гг. Объемная масса зерноотходов определялась в соответствии с ГОСТ Р 55451-2013 [5]. Содержание золы учитывалось на основе весового метода по ГОСТ 26714-85 [6]. Соотношение углерода к азоту определялось по ГОСТ 27980-88 [7], массовая доля общего фосфора по ГОСТ 26717-85 [8], общего калия – ГОСТ 26718-85 [9]. Определение массовой доли общего азота проводилось по ГОСТ 26715-85 по методу Кьельдаля [10].

Оценка засоренности зерноотходов проводилась в соответствии с ГОСТ Р 54002-2010 [11]. Общий запас семян сорных растений в зерноотходах рассчитывался по формуле:

$$M_T = K \frac{1000}{P},$$

где M_T – запас семян сорных растений в 1 т зерноотходов, шт.;

K – количество сорных растений в анализируемой навеске, шт.;

P – навеска зерноотходов, взятая на анализ, кг.

Всхожесть семян сорных растений определялась в лабораторных условиях при оптимальных для каждого вида растений показателях температуры и влажности [12].

Результаты исследований и их обсуждение

Оценка состава органических удобрений на основе зерноотходов. Результаты лабораторных исследований показали (табл. 1), что большинство отходов зерноперерабатывающих предприятий имеет оптимальное для обеспечения разложения в почве соотношение углерода к азоту (18,05–24,65), что сравнимо с соотношением данных показателей в подстилочном навозе [13].

Таблица 1

Химические и физические показатели отходов зерноперерабатывающих предприятий Брестской обл.
(в расчете на сухое вещество)

Table 1

Chemical and physical indicators from Brest region grain processing enterprises waste (based on dry matter)

Наименование отхода зерноперерабатывающих предприятий	Органический углерод, %	Массовая доля азота, %	C/N	Объемная масса, г/см ³
Солодовенный цех – пыль (ОАО «Белсолод»)	47,09	2,47	19,06	0,16
Цех ПЗ и ОС – пыль (ОАО «Белсолод»)	47,65	2,64	18,05	0,36
Цех ПЗ и ОС – отходы с содержанием зерна до 2 % (ОАО «Белсолод»)	45,49	1,90	23,94	0,24
Отходы 3-ей категории с содержанием зерна до 3 % (ОАО «Пинский комбинат хлебопродуктов»)	47,83	2,22	21,54	0,33
Отходы 3-ей категории с содержанием зерна до 3 % (ОАО «Пинский комбинат хлебопродуктов»)	47,83	2,22	21,54	0,33

Окончание табл. 1

Ending table 1

Наименование отхода зерноперерабатывающих предприятий	Органический углерод, %	Массовая доля азота, %	C/N	Объемная масса, г/см ³
Зерноотходы 3-ей категории (ОАО «Брестхлебопродукт»)	47,09	1,91	24,65	0,24
Отходы зерновые 3-ей категории (ОАО «Барановичхлебопродукт»)	45,06	2,27	19,85	0,19
НСР	–	0,04	–	–

Проведенный агрохимический анализ свидетельствует, что в зерноотходах массовая доля азота варьирует в пределах 1,90–2,64 %. В отходах зерновых 3-ей категории ОАО «Жабинковский комбикормовый завод», ОАО «Барановичхлебопродукт», ОАО «Пинский комбинат хлебопродуктов», а также пыли из солодовенного цеха и цеха ПЗ и ОС ОАО «Белсолод» отмечено наиболее высокое содержание азота в абсолютно сухом веществе – 2,27–2,64 %, что в два раза выше, чем в соломе (0,49–1,0 %), и находится на уровне содержания в подстилочном навозе. Массовая доля общего фосфора в зерноотходах выше, чем в соломе и составляет 0,82–1,38 %.

В результате наших исследований выявлено, что содержание общего калия в зерноотходах ниже имеющихся в литературе [13] значений данного показателя в соломе, жидком и подстилочном навозе. Статистический анализ показал, что по содержанию азота, фосфора и калия отходы зерноперерабатывающих предприятий Брестской области существенно отличаются.

При естественной влажности содержание фосфора в зерноотходах составило 0,74–1,29 %, калия – 0,88–1,00 %, азота – 2,05–2,38 %, однако по сравнению с литературными данными [14] оно значительно выше, чем в традиционном подстилочном навозе.

Массовая доля золы в изучаемых зерноотходах находилась в пределах 4,71–9,89 %. В отходах зерновых 3-ей категории ОАО «Барановичхлебопродукт» содержание золы оказалось существенно выше, по сравнению с другими отходами (табл. 2).

Таблица 2

Содержание P_2O_5 , K_2O и массовая доля золы в зерновых отходах, %

Table 2

The content of P_2O_5 , K_2O and the mass fraction of ash in cereal waste, %

Наименование отхода зерноперерабатывающих предприятий	P_2O_5		K_2O		Массовая доля золы
	в расчете на сухое вещество	при естественной влажности	в расчете на сухое вещество	при естественной влажности	
Отходы зерновые 3-ей категории (ОАО «Жабинковский комбикормовый завод»)	1,38	1,29	1,01	0,94	4,97
Отходы зерновые 3-ей категории (ОАО «Барановичхлебопродукт»)	0,82	0,74	1,11	1,00	9,89
Цех ПЗ и ОС – пыль (ОАО «Белсолод»)	0,94	0,85	0,97	0,88	4,71
НСР	0,03	–	0,01	–	0,19

Оценка запасов семян сорных растений в отходах зерноперерабатывающих предприятий. Содержание семян сорных растений в зерноотходах изменяется в широких пределах и зависит от мероприятий по борьбе с сорной растительностью в посевах, а также от вида зерноотхода (табл. 3).

Таблица 3

Содержание семян сорных растений в отходах зерноперерабатывающих предприятий

Table 3

The content of weed plant seeds in the waste of grain processing enterprises

Наименование предприятия	Наименование отхода	Содержание семян сорняков в 1 т отходов, тыс. шт.
ОАО «Белсолод»	Пыль (цех ПЗ и ОС)	отсутствуют
	Пыль (солодовенный цех)	80
	Отходы зерновые с содержанием зерна до 2 % (цех ПЗ и ОС)	290
ОАО «Брестхлебопродукт»	Зерноотходы 3-й категории	160
ОАО «Пинский комбинат хлебопродуктов»	Отходы 3-ей категории с содержанием зерна до 3 % (элеватор)	8140
ОАО «Жабинковский комбикормовый завод»	Отходы зерновые 3-ей категории	996
ОАО «Барановичхлебопродукт»	Отходы зерновые 3-ей категории	2070

И. Баздырев (2004) указывает, что всхожесть семян основных видов сорных растений составляет, как правило, 10–30 %, поэтому в отдельных случаях допускается оценка засоренности органических удобрений по общему запасу семян. В соответствии с литературными данными, если в 1 т органических удобрений количество всхожих семян более 300 тыс. шт., то их внесение на поля не оправданно [11].

Согласно результатам наших исследований, абсолютно чистым от семян сорных растений является пыль из цеха ПЗ и ОС ОАО «Белсолод». Общие запасы семян сорняков в пыли из солодовенного цеха ОАО «Белсолод» составили 80 тыс. шт./т, зерноотходах 3-ей категории ОАО «Брестхлебопродукт» – 160 тыс. шт./т, отходах зерновых с содержанием зерна до 2 % ОАО «Белсолод» – 290 тыс. шт./т, что позволяет продолжить дополнительное исследование по использованию данных отходов в качестве органических удобрений.

Засоренность отходов зерновых 3-ей категории ОАО «Жабинковский комбикормовый завод» и ОАО «Барановичхлебопродукт» значительно выше допустимого для внесения их в качестве органических удобрений. Несмотря на низкую лабораторную всхожесть сорняков, данные зерноотходы рекомендуются компостировать перед применением в качестве удобрений с целью исключения засорения полей.

Общий запас всхожих семян сорных растений в отходах 3-ей категории с содержанием зерна до 3 % из элеватора ОАО «Пинский комбинат хлебопродуктов» составил более 8 млн шт./т отходов. С учетом лабораторной всхожести 16,7 %, запас всхожих семян сорных растений составляет 1357 тыс. шт./т зерноотходов, что, в соответствии с литературными данными, значительно превышает допустимое для внесения в качестве органического удобрения количество семян сорняков. Применение данных зерноотходов как удобрений возможно путем проведения дополнительных мероприятий, одним из которых является компостирование.

В исследуемых зерноотходах наиболее встречающимися являются семена следующих видов сорных растений: горца вьюнкового, горца развесистого, мари белой, ежовника обыкновенного, пырея ползучего.

Оценивая долю, которую в процентном отношении составляют семена отдельных видов от общего количества семян сорных растений, в отходе зерновом с содержанием зерна до 2 % из цеха ПЗ и ОС ОАО «Белсолод» можно выделить семена мари белой – 50 %; доля семян горца вьюнкового составляет от 3,7 % в отходах 3-ей категории с содержанием зерна до 3 % (ОАО «Пинский комбинат хлебопродуктов») до 42,6 % в зерноотходах 3-ей категории (ОАО «Брестхлебопродукт»).

Заключение

Таким образом, отходы зерноперерабатывающих предприятий по основным свойствам не уступают традиционным органическим удобрениям (соломе, жидкому и подстилочному навозу) и при отработке технологии применения могут быть использованы как их альтернатива. Большинство зерноотходов имеет оптимальное для разложения в почве соотношение углерода к азоту (18,05–24,65). Для контроля засоренности посевов необходимо определение общего запаса семян сорных растений в зерноотходах, а при превышении их допустимого количества проведение компостирования.

Библиографические ссылки

1. Белюченко И. С., Муравьев Е. И. Влияние отходов промышленного и сельскохозяйственного производства на физико-химические свойства почв // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2009. Т. 5, № 1. С. 84–86.
2. Мельник О. А. Использование отходов промышленного и сельскохозяйственного производства для улучшения свойств почвы // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2009. Т. 5, № 3. С. 30–36.
3. Мерзлая Г. Е., Афанасьев Р. А. Эффективность удобрений на основе осадков сточных вод // Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: материалы III Междунар. науч. эколог. конф. Краснодар. 2013. С. 15–19.
4. Титова В. И., Дабахов М. В., Дабахова Е. В. Обоснование использования отходов в качестве вторичного материального ресурса в сельскохозяйственном производстве. Н. Новгород, 2009.
5. ГОСТ Р 55451-2013. Удобрения органические. Методы определения объемной массы. Введ. 01.07.2014. М., 2014.
6. ГОСТ 26714-85. Удобрения органические. Методы определения золы. Введ. 14.03.86. М., 1986.
7. ГОСТ 27980-88. Удобрения органические. Методы определения органического вещества. Введ. 01.01.1990. М., 1989.
8. ГОСТ 26717-85. Удобрения органические. Методы определения общего фосфора. Введ. 01.01.87. М., 1988.
9. ГОСТ 26718-85. Удобрения органические. Метод определения общего калия: Введ. 01.01.87. М., 1988.
10. ГОСТ 26715-85. Удобрения органические. Методы определения общего азота. Введ. 01.01.87. М., 1986.
11. ГОСТ Р 54002-2010. Удобрения органические. Методы определения засоренности. Введ. 01.01.2012. М., 2011.
12. Баздырев Г. И. Защита сельскохозяйственных культур от сорных растений. М., 2004.
13. Серая Т. М., Кирдун Т. М., Богатырева Е. Н. и др. Влияние систем удобрения на продуктивность севооборота и агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы // Вести Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. 2016. № 2. С. 17–23.
14. Методические указания по учету и применению органических удобрений. Минск, 2007.

References

1. Beluchenko I. S., Muraviev E. I. [Influence of waste products of industrial and agricultural production on the physical and chemical properties of soils]. *Ekologicheskii Vestnik Severnoy Kavkaza*. 2009. T. 5, No. 1. P. 84–86 (in Russ.).
2. Melnik O. A. [Use of industrial and agricultural waste to improve soil properties]. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*. 2009. T. 5, No. 3. P. 30–36 (in Russ.).
3. Merzlaya G. E., Afanasiev R. A. [Efficiency of fertilizers based on sewage sludge]. *Problems of reclamation of household waste, industrial and agricultural production: materials III International. sci. ecological conference*. Krasnodar. 2013. P. 15–19 (in Russ.).
4. Titova V. I., Dabakhov M. V., Dabahova E. V. [Rationale for the use of waste as a secondary material resource in agricultural production]. N. Novgorod, 2009 (in Russ.).
5. GOST R 55451-2013. [Organic fertilizers. Methods for determining the bulk mass]. *Enter*. 01/07/2014. Moscow, 2014 (in Russ.).
6. GOST 26714-85. [Organic fertilizers. Methods for determination of ash]. *Enter*. 14.03.86. Moscow, 1986 (in Russ.).
7. GOST 27980-88. [Organic fertilizers. Methods for the determination of organic matter]. *Enter*. 01.01.1990. Moscow, 1989 (in Russ.).
8. GOST 26717-85. [Organic fertilizers. Methods for determination of total phosphorus]. *Enter*. 01/01/87. Moscow (in Russ.).
9. GOST 26718-85. [Organic fertilizers. Method for determining total potassium]. *Enter*. 01/01/87. Moscow, 1988 (in Russ.).
10. GOST 26715-85. [Organic fertilizers. Methods for determination of total nitrogen]. *Enter*. 01/01/87. Moscow, 1986 (in Russ.).
11. GOST R 54002-2010. [Organic fertilizers. Methods for determining contamination]. Introduction. 01.01.2012. Moscow, 2011 (in Russ.).
12. Bazdyrev G. I. [Protection of crops from weeds]. Moscow, 2004 (in Russ.).
13. Gray T. M., Kirdun T. M., Bogatyreva E. N. Influence of fertilizer systems on crop rotation productivity and agrochemical parameters of sod-podzolic soil. *Weight. Nat. acad. the Belarus' leader. Ser. agrarian. an ape*. 2016. No. 2. P. 17–23 (in Russ.).
14. [Methodical instructions on accounting and use of organic fertilizers]. Minsk, 2007 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 10.05.2018
Received by editorial board 10.05.2018

АНТИОКСИДАНТНАЯ АКТИВНОСТЬ СОКА ЯГОДНЫХ КУЛЬТУР

Е. И. ТАРУН¹⁾, И. В. АНТОНЧИК¹⁾

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

Проведено сравнительное изучение антиоксидантной активности 10 видов соков ягодных культур: черной и красной смородины, малины и ежевики, вишни и черешни, черники и голубики, черноплодной рябины и клубники. Получены зависимости интенсивности флуоресценции флуоресцеина от логарифма концентрации соков, из которых графически определены показатели IC₅₀, которые составляли 1,95–13,2·10⁻² %. Все исследованные соки показывают высокую антиоксидантную активность, восстанавливая интенсивность флуоресценции флуоресцеина до 51–78 %.

Ключевые слова: соки черной и красной смородины; малины; ежевики; вишни; черешни; черники, голубики; черноплодной рябины; клубники; флуоресцеин; антиоксидантная активность.

ANTIOXIDANT ACTIVITY OF BERRY CROPS JUICE

E. I. TARUN^a, I. V. ANTONCHIK^a

^aBelarusian State University, International Sakharov Environmental Institute,
Dolgobrodskaya street, 23/1, 220070, Minsk, Belarus
Corresponding author: E. I. Tarun (ktarun@tut.by)

The paper presents a comparative study of the antioxidant activity of 10 types of the juices of black and red currants, raspberries and bramble, cherry and sweet cherry, bilberry and blueberry, black chokeberry and strawberry. The fluorescence intensity of fluorescein was determined from the logarithm of the concentration of juice. On their Basis IC₅₀ indicators were graphically estimated as 1,95–13,2·10⁻² %. All the juices studied show a high antioxidant activity, restoring the fluorescein fluorescence intensity to 51–78 %.

Key words: the juices of black and red currants; raspberries; bramble; cherry; sweet cherry; bilberry; blueberry; black chokeberry; strawberry; fluorescein; antioxidant activity.

Введение

Избыточная концентрация свободных радикалов в организме является центральным фактором риска сердечно-сосудистых, онкологических заболеваний и других патологий. Флавоноиды обладают сильными антиоксидантными свойствами и могут использоваться для профилактики различных болезней. В состав многих ягод входят такие флавоноиды, как кверцетин и рутин, а также антоцианы и другие фенольные гликозиды, выступающие ингибиторами свободных радикалов.

Образец цитирования:

Тарун Е. И., Антончик И. В. Антиоксидантная активность сока ягодных культур // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 129–135.

For citation:

Tarun E. I., Antonchik I. V. Antioxidant activity of berry crops juice. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 129–135 (in Russ.).

Авторы:

Екатерина Ивановна Тарун – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры экологической химии и биохимии.
Ирина Васильевна Антончик – студентка факультета экологической медицины.

Authors:

Ekaterina I. Tarun, PhD (chemistry), associate professor; associate professor of chair of environmental chemistry and biochemistry.
ktarun@tut.by
Irina V. Antonchik, student of the faculty of environmental medicine.
irka,25.02@mail.ru

Ягоды черной смородины – один из ценнейших источников биологически активных фенольных веществ капиллярно-укрепляющего, противовоспалительного, сосудорасширяющего (антиспазматического) действия. В ягодах черной смородины содержатся витамины В, Р, провитамин А (каротин до 3 мг %), сахара, пектиновые вещества, фосфорная кислота, эфирное масло, дубильные вещества, витамин К, соли калия, фосфора и железа. Ценность красной смородины обусловлена наличием углеводов, органических кислот, макро- и микроэлементов, а также витаминов и полифенольных соединений. Содержание витамина С в ягодах красной смородины такое же, как в землянике, но в два раза больше, чем в ягодах крыжовника. Кроме того, в ягодах красной смородины содержатся антоцианы, которые регулируют процесс роста, участвуют в биологическом окислении. Флавонолы оказывают стабилизирующее действие на витамин С, подавляют действие фермента аскорбатоксидазы. Действие флавоноидов, подобно действию на организм витамина Р, уменьшают ломкость кровеносных сосудов, предотвращают подкожные кровоизлияния [1]. Методом ВЭЖХ в ягодах красной и черной смородины было обнаружено 65 различных фенольных соединений [2], в частности фенольные кислоты и гликозиды флавонолов [3; 4]. Показано, что содержание антоцианов в ягодах красной смородины было выше, чем в черной смородине, а содержание витамина С – в 3 раза выше в черной смородине [5].

Сравнение фенольного профиля черники, красной и черной смородины показало, что антоцианы составили самое высокое содержание общего количества фенольных соединений в смородине (> 85 %) и несколько ниже в чернике (35–74 %). Производные гидроксикоричной кислоты составили 23–56 % от общего количества фенольных соединений в чернике и 1–6 % в смородине [6]. Обнаружено высокое содержание антоцианов в разных сортах черники, а также положительная корреляция между количеством этих соединений и антиоксидантной активностью [7].

В фенольном профиле разных сортов вишни и черешни обнаружено высокое содержание антоцианов, флавонолов, гидроксикоричной кислоты. Вишня и черешня содержат такие сахара, как глюкоза и фруктоза, а основной органической кислотой была яблочная кислота [8; 9].

Исследования показали, что прием клубники, богатой антоцианами, способствует ослаблению воспаления и окислительного стресса, снижению риска сердечно-сосудистых заболеваний и защите от различных видов рака а также играет определенную роль в гликемическом контроле [10; 11].

Высокое содержание флавонолов и антоцианов обнаружено в малине и ежевике [12; 14].

Метод определения антиоксидантной активности (АОА) по отношению к активированным формам кислорода (АФК) является одним из наиболее применяемых в настоящее время [15; 16]. Он 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 используя систему Фентона, в которой образуются гидроксильные радикалы при взаимодействии комплекса железа (Fe^{2+}) с этилендиаминтетрауксусной кислотой (EDTA) и пероксида водорода [17; 18]. При взаимодействии флуоресцеина со свободными радикалами происходит тушение его флуоресценции, восстановить которую можно при добавлении в систему веществ, проявляющих такие антиоксидантные свойства, как входящие в состав ягод флавоноиды.

Цель работы – определение и сравнение антиоксидантной активности соков черной и красной смородины, малины и ежевики, вишни и черешни, черники и голубики, черноплодной рябины и клубники.

Материалы и методы исследования

Реагенты. Использовали соль Мора $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Fe^{2+}), пероксид водорода (H_2O_2) фирмы «Реахим» (Россия), флуоресцеин, этилендиаминтетрауксусной кислоты (EDTA) фирмы «Sigma» (США).

Соки ягодных культур: малины, ежевики, клубники, черешни, черники, голубики, черной смородины, красной смородины, вишни, черноплодной рябины.

Приготовление разведений сока. Концентрацию сока принимали за 100 %. Делали ряд разведений сока в 2, 5, 10, 50, 100, 500, 1000 раз. Соответственно, концентрации полученных разведений сока – 100; 50; 20; 10; 2; 1; 0,2; 0,1 %. Концентрация разведений сока в пробе уменьшалась в 10 раз и составляла 10; 5; 2; 1; 0,2; 0,1; 0,02; 0,01 %.

Растворы соли Мора, H_2O_2 , EDTA и флуоресцеина готовили в 0,1 М Na-фосфатном буфере, pH 7,4.

Методика определения антиоксидантной активности сока. Общий объем пробы, помещаемый в кювету, составлял 2 мл. Интенсивность флуоресценции определяли в образцах следующего состава:

- 0,02 мл флуоресцеина ($2 \cdot 10^{-6}$ М) и 1,98 мл 0,1 М Na-фосфатного буфера;
- 0,02 мл флуоресцеина ($2 \cdot 10^{-6}$ М), 0,2 мл Fe^{2+} с ЭДТА (10^{-3} М), 1,58 мл 0,1 М Na-фосфатного буфера и 0,2 мл H_2O_2 (10^{-2} М).

• 0,02 мл флуоресцеина ($2 \cdot 10^{-6}$ М), 0,2 мл Fe^{2+} с ЭДТА (10^{-3} М), 0,2 мл сока (0,1–100 %), 0,2 мл H_2O_2 (10^{-2} М) и 1,38 мл 0,1 М Na-фосфатного буфера.

Реакцию начинали добавлением 0,2 мл H_2O_2 (10^{-2} М).

Конечные концентрации: флуоресцеин – $2 \cdot 10^{-8}$ М, Fe^{2+} – 10^{-4} М, ЭДТА – 10^{-4} М, H_2O_2 – 10^{-3} М, сок – 0,01–10 %.

Полученные значения пиков флуоресценции выражали в процентах, взяв за 100 % флуоресценцию раствора без Fe^{2+} , ЭДТА, сока и H_2O_2 .

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

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследования ингибирования реакций свободных радикалов, генерируемых в системе Фентона, получены зависимости интенсивности флуоресценции флуоресцеина (А) от логарифма концентрации всех образцов соков. Исследования проведены в широком диапазоне концентраций 0,01–10 %. На рис. 1 представлены зависимости интенсивности флуоресценции флуоресцеина (А) от логарифма концентрации сока черной (1) и красной (2) смородины. Образцы соков начинали проявлять АОА при концентрации 0,01 %. При последующем увеличении концентрации соков наблюдается увеличение подавления действия свободных радикалов и возрастание флуоресценции флуоресцеина. Максимум антиоксидантной активности соков наблюдается при концентрации 0,2 %. Сок черной смородины показывает более высокую АОА, восстанавливая флуоресценцию флуоресцеина до 78 % (1). АОА сока красной смородины в 1,4 раза ниже. Этот сок восстанавливает флуоресценцию флуоресцеина до 56 % (2). Дальнейшее повышение концентрации сока приводит снижению его активности. При высоких концентрациях флавоноидов, содержащихся в соке, радикальные продукты их окисления могут взаимодействовать с флуоресцеином и снижать его флуоресценцию. Из графиков зависимостей определены показатели IC_{50} , значения которых представлены в табл. 1.

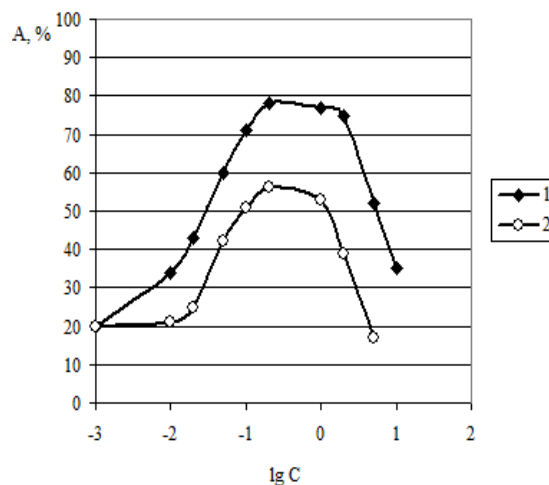


Рис. 1. Зависимость интенсивности флуоресценции флуоресцеина (А) от логарифма концентрации сока черной (1) и красной (2) смородины

Fig. 1. The fluorescence intensity of fluorescein (A) depends on the logarithm of the concentration of juice of black (1) and red (2) currants

На рис. 2 представлены зависимости интенсивности флуоресценции флуоресцеина (А) от логарифма концентрации сока вишни (1) и черешни (2). Сок черешни показывает более высокую АОА, восстанавливая флуоресценцию флуоресцеина до 76 % (2) при концентрации сока 1 %. АОА сока вишни в 1,5 раза ниже. Этот сок восстанавливает флуоресценцию флуоресцеина до 56 % (1). Однако при этом его концентрация в 5 раз ниже и составляет 0,2 %.

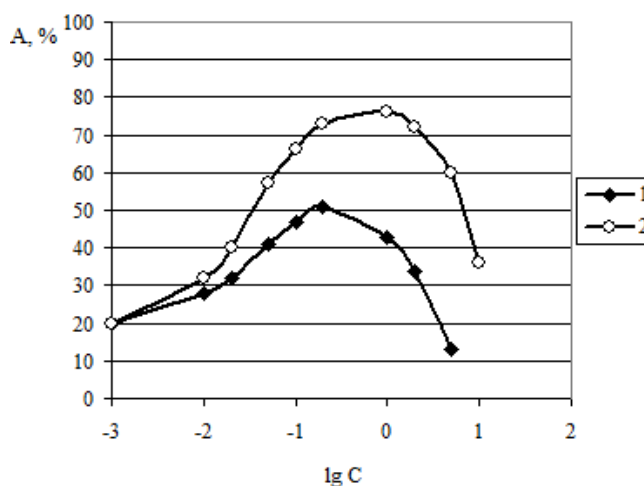


Рис. 2. Зависимость интенсивности флуоресценции флуоресцеина (A) от логарифма концентрации сока вишни (1) и черешни (2)

Fig. 2. The fluorescence intensity of fluorescein (A) depends on the logarithm of the concentration of juice of cherry (1) and sweet cherry (2)

На рис. 3 представлены зависимости интенсивности флуоресценции флуоресцеина (A) от логарифма концентрации сока малины (1) и ежевики (2). Показатели АОА этих соков близки. Они восстанавливают флуоресценцию флуоресцеина до 64 % (1) и 59 % (2), при концентрации сока 0,2 %.

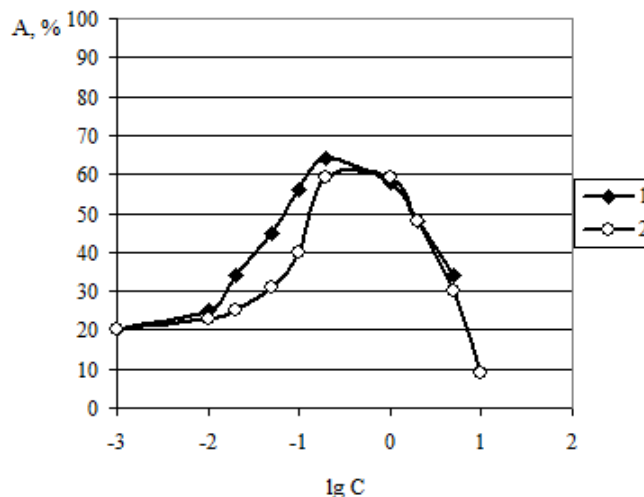


Рис. 3. Зависимость интенсивности флуоресценции флуоресцеина (A) от логарифма концентрации сока малины (1) и ежевики (2)

Fig. 3. The fluorescence intensity of fluorescein (A) depends on the logarithm of the concentration of juice of raspberries (1) and bramble (2)

На рис. 4 представлены зависимости интенсивности флуоресценции флуоресцеина (A) от логарифма концентрации сока голубики (1) и черники (2). Сок голубики показывает более высокую АОА, восстанавливая флуоресценцию флуоресцеина до 64 % (1), при концентрации сока 1 %. АОА сока черники в 1,17 раза ниже. Этот сок восстанавливает флуоресценцию флуоресцеина до 55 % (2). Однако при этом его концентрация в 5 раз ниже и составляет 0,2 %.

Аналогичные зависимости получены для соков черноплодной рябины и клубники, основные показатели антиоксидантной активности которых представлены в табл. 1.

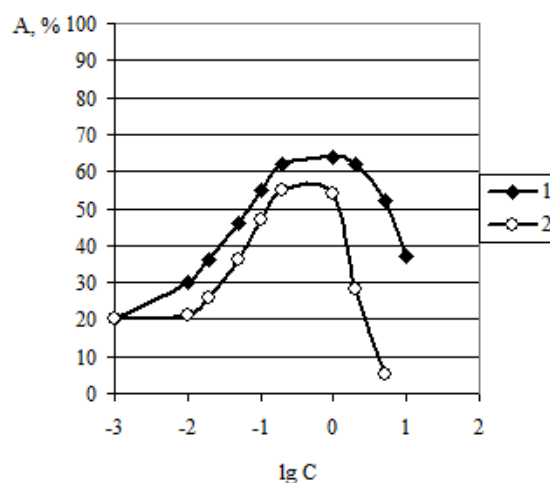


Рис. 4. Зависимость интенсивности флуоресценции флуоресцеина (A) от логарифма концентрации сока голубики (1) и черники (2)

Fig. 4. The fluorescence intensity of fluorescein (A) depends on the logarithm of the concentration of juice of blueberry (1) and bilberry (2)

Основными показателями антиоксидантной активности при сравнительном анализе являются: $A_{\max}$ – интенсивность флуоресценции, соответствующая максимальному ингибированию свободных радикалов, выраженная в %, C – концентрация соков, при которой достигается $A_{\max}$ и IC_{50} – концентрация сока, при которой достигается 50 % ингибирования свободных радикалов.

Таблица 1

Показатели антиоксидантной активности соков

Table 1

Indicators of antioxidant activity of juices

№	Соки	$A_{\max}, \%$	$C_{\max}, \%$	$IC_{50} \cdot 10^{-2}, \%$
1	Черная смородина	78	0,2	2,95
2	Черешня	76	1	3,47
3	Малина	64	0,2	6,17
4	Голубика	64	1	6,3
5	Черноплодная рябина	61	0,2	7,5
6	Клубника	66	1	8,77
7	Красная смородина	56	0,2	9,1
8	Черника	55	0,2	12,3
9	Ежевика	59	0,2	13
10	Вишня	51	0,2	13,2

Самый низкий показатель IC_{50} ($2,95 \cdot 10^{-2} \%$) получен при внесении образца сока черной смородины, что свидетельствует о его самой высокой антиоксидантной способности. Показатель $A_{\max}$ для этого сока также самый высокий. Показатель IC_{50} ($9,1 \cdot 10^{-2} \%$) красной смородины в 3 раза превышает аналогичный показатель черной смородины. Исследование состава черной и красной смородины, проведенные методом высокоэффективной жидкостной хроматографии, показали более высокое содержание флавоноидов в черной смородине, чем в красной. Кроме того, содержание витамина С, который также является антиоксидантом, в черной смородине в 3 раза выше, чем в красной. Это подтверждает полученные результаты, показывающие более высокие способности черной смородины к ингибированию свободных радикалов.

Сок черешни имел показатели IC_{50} ($3,47 \cdot 10^{-2} \%$) и $A_{\max}$ (76 %) близкие к соку черной смородины. Однако максимальное ингибирование свободных радикалов достигалось при концентрации сока в 5 раз больше, что свидетельствует о его более низких антиоксидантных свойствах, чем сок черной смородины. Соки

схожих по составу ягод – вишни и черешни также сильно отличаются показателями антиоксидантной активности, как и соки черной и красной смородины. Показатель IC_{50} ($13,2 \cdot 10^{-2} \%$) сока вишни превышал аналогичный показатель сока черешни в 3,8 раза. Он выявил самую слабую антиоксидантную активность, так как его показатель IC_{50} был максимальным, а показатель A_{max} – наименьшим по сравнению с другими образцами соков. Он ингибировал свободные радикалы на 51 %.

Показатель IC_{50} , полученный при внесении образца сока малины ($6,17 \cdot 10^{-2} \%$), в 2 раза превышал аналогичный показатель, полученный для сока черной смородины. Соки схожих по составу ягод (малины и ежевики) более близки по антиоксидантным свойствам, чем пары «черная–красная смородина» и «вишня–черешня». Однако сок ежевики показал более низкую антиоксидантную активность, чем сок малины. Его показатель IC_{50} ($13 \cdot 10^{-2} \%$) был в 2 раза выше аналогичного показателя для сока малины.

Показатели IC_{50} и A_{max} , полученные для сока голубики, были сравнимы с аналогичными показателями, полученными для сока малины. Однако максимальное ингибирование свободных радикалов достигалось при концентрации сока голубики в 5 раз больше, что свидетельствует о его более низких антиоксидантных свойствах, чем сок малины. Показатели IC_{50} ($6,3 \cdot 10^{-2} \%$) для сока голубики в 2 раза превышал аналогичный показатель, полученный для сока черной смородины. Сравнение схожих по составу соков черники и голубики показывает значительное различие их антиоксидантных свойств. Сок голубики оказался более сильным антиоксидантом по сравнению с соком черники. Показатели IC_{50} ($12,3 \cdot 10^{-2} \%$) для сока черники в 2 раза превышал аналогичный показатель, полученный для сока голубики.

Сок черноплодной рябины восстанавливал флуоресценцию флуоресцеина до 61 %, что сравнимо с аналогичными показателями, полученными для соков малины, голубики и ежевики и в 1,3 раза ниже показателя для сока черной смородины. Показатель IC_{50} ($7,5 \cdot 10^{-2} \%$) для сока черноплодной рябины превышал в 2,5 раза аналогичный показатель, полученный для сока черной смородины.

Показатель A_{max} , полученный для сока клубники, близок по значению к аналогичным показателям, полученным для соков малины и голубики, и составлял 66 %. Показатель IC_{50} ($8,77 \cdot 10^{-2} \%$) для сока клубники превышал в 3 раза аналогичный показатель, полученный для сока черной смородины, и был близок по значению к аналогичному показателю, полученному для сока красной смородины. Сок клубники восстанавливал флуоресценцию флуоресцеина на большую величину, чем сок красной смородины, однако его концентрация была в 5 раз выше.

Заключение

Сравнение пар соков ягод, имеющих аналогичный состав, позволило определить преимущество антиоксидантной активности одних ягод перед другими:

черная смородина > красная смородина,
черешня > вишня,
малина > ежевика,
голубика > черника.

Сок черной смородины более эффективно восстанавливает флуоресценцию флуоресцеина (до 78 %), являясь самым сильным антиоксидантом по сравнению с другими ягодными соками.

Благодаря высокому содержанию флавоноидов соки ягодных культур могут считаться высокоэффективными ингибиторами свободных радикалов. Изученные в данной работе соки повышали флуоресценцию флуоресцеина благодаря снижению действия свободных радикалов до 51–78 %. Показатели IC_{50} определены в диапазоне $2,95 - 13,2 \cdot 10^{-2} \%$, что соответствует разведению сока в 3390–760 раз. Низкие концентрации, при которых соки снижают действие свободных радикалов на 50 %, также свидетельствуют об их высокой антиоксидантной активности.

Библиографические ссылки

1. Лобанова А. А., Будаева В. В., Сакович Г. В. Исследование биологически активных флавоноидов в экстрактах из растительного сырья // Химия растительного сырья. 2004. № 1. С. 47–52.
2. Mikulic-Petkovsek M., Rescic J., Schmitzer V., et al. Changes in fruit quality parameters of four Ribes species during ripening // Food Chem. 2015. Vol. 173. P. 363–374.
3. Yang B., Zheng J., Laaksonen O., et al. Effects of latitude and weather conditions on phenolic compounds in currant (Ribes spp.) cultivars // J. Agric. Food Chem. 2013. Vol. 61 (14). P. 3517–3532.
4. Godevac D., Tešević V., Vajs V., et al. Chemical composition of currant seed extracts and their protective effect on human lymphocytes DNA // J. Food Sci. 2012. Vol. 77 (7). P. 779–783.
5. Milivojevic J., Slatnar A., Mikulic-Petkovsek M., et al. The influence of early yield on the accumulation of major taste and health-related compounds in black and redcurrant cultivars (Ribes spp.) // J. Agric. Food Chem. 2012. Vol. 60 (10). P. 2682–2691.
6. Gavrilova V., Kajdzanoska M., Gjamovski V., et al. Separation, characterization and quantification of phenolic compounds in blueberries and red and black currants by HPLC-DAD-ESI-MSn // J. Agric. Food Chem. 2011. Vol. 59 (8). P. 4009–4018.

7. Pertuzatti P., Barcia M. T., Rodrigues D., et al. Antioxidant activity of hydrophilic and lipophilic extracts of Brazilian blueberries // *Food Chem.* 2014. Vol. 164. P. 81–88.
8. Matias A. A., Rosado-Ramos R., Nunes S. L., et al. Protective Effect of a (Poly) phenol-Rich Extract Derived from Sweet Cherries Culls against Oxidative Cell Damage // *Molecules.* 2016. Vol. 21 (4). P. 406.
9. Cao J., Jiang Q., Lin J., et al. Physicochemical characterisation of four cherry species (*Prunus* spp.) grown in China // *Food Chem.* 2015. Vol. 173. P. 855–863.
10. Huang Y., Park E., Edirisinghe I., et al. Maximizing the health effects of strawberry anthocyanins: understanding the influence of the consumption timing variable // *Food Funct.* 2016. Vol. 7 (12). P. 4745–4752.
11. Afrin S., Gasparrini M., Forbes-Hernandez T. Y., et al. Promising Health Benefits of the Strawberry: A Focus on Clinical Studies // *J. Agric. Food Chem.* 2016. Vol. 64 (22). P. 4435–4449.
12. Basu P., Maier C. In vitro Antioxidant Activities and Polyphenol Contents of Seven Commercially Available Fruits // *Pharmacognosy Res.* 2016. Vol. 8 (4). P. 258–264.
13. Skrovankova S., Sumczynski D., Mlcek J., et al. Bioactive Compounds and Antioxidant Activity in Different Types of Berries // *Int. J. Mol. Sci.* 2015. Vol. 16 (10). P. 24673–24706.
14. Cao G. H., Alessio H. M., Cutler R. G. Oxygen-radical absorbance capacity assay for antioxidants // *Free Radicals In Biology And Medicine.* 1993. Vol. 3, № 14. P. 303–311.
15. Ehlenfeldt M. K., Prior R. I. Oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and phenolic and anthocyanin concentrations in fruit and leaf tissues of highbush blueberry // *J. of Agricultural and Food Chemistry.* 2001. Vol. 49. P. 2222–2227.
16. Сычев А. Я., Исак В. Г. Гомогенный катализ соединениями железа. Кишинев, 1988.
17. Wei Y. A novel H₂O₂-triggered anti-Fenton fluorescent pro-chelator excitable with visible light // *Chem. Commun.* 2009. Vol. 11. P.1413–1415.

References

1. Lobanova A. A., Budaeva V. V., Sakovich G. V. [Study of biologically active flavonoids in extracts from plant material]. *Chemistry of plant raw materials.* 2004. No. 1. P. 47–52 (in Russ.).
2. Mikulic-Petkovsek M., Rescic J., Schmitzer V., et al. Changes in fruit quality parameters of four *Ribes* species during ripening. *Food Chem.* 2015. Vol. 173. P. 363–374.
3. Yang B., Zheng J., Laaksonen O., et al. Effects of latitude and weather conditions on phenolic compounds in currant (*Ribes* spp.) cultivars. *J. Agric. Food Chem.* 2013. Vol. 61 (14). P. 3517–3532.
4. Godevac D., Tešević V., Vajs V., et al. Chemical composition of currant seed extracts and their protective effect on human lymphocytes DNA. *J. Food Sci.* 2012. Vol. 77 (7). P. 779–783.
5. Milivojevic J., Slatnar A., Mikulic-Petkovsek M., et al. The influence of early yield on the accumulation of major taste and health-related compounds in black and redcurrant cultivars (*Ribes* spp.). *J. Agric. Food Chem.* 2012. Vol. 60 (10). P. 2682–2691.
6. Gavrilova V., Kajdzanoska M., Gjamovski V., et al. Separation, characterization and quantification of phenolic compounds in blueberries and red and black currants by HPLC-DAD-ESI-MSn. *J. Agric. Food Chem.* 2011. Vol. 59 (8). P. 4009–4018.
7. Pertuzatti P., Barcia M. T., Rodrigues D., et al. Antioxidant activity of hydrophilic and lipophilic extracts of Brazilian blueberries. *Food Chem.* 2014. Vol. 164. P. 81–88.
8. Matias A. A., Rosado-Ramos R., Nunes S. L., et al. Protective Effect of a (Poly) phenol-Rich Extract Derived from Sweet Cherries Culls against Oxidative Cell Damage. *Molecules.* 2016. Vol. 21 (4). P. 406.
9. Cao J., Jiang Q., Lin J., et al. Physicochemical characterisation of four cherry species (*Prunus* spp.) grown in China. *Food Chem.* 2015. Vol. 173. P. 855–863.
10. Huang Y., Park E., Edirisinghe I., et al. Maximizing the health effects of strawberry anthocyanins: understanding the influence of the consumption timing variable. *Food Funct.* 2016. Vol. 7 (12). P. 4745–4752.
11. Afrin S., Gasparrini M., Forbes-Hernandez T. Y., et al. Promising Health Benefits of the Strawberry: A Focus on Clinical Studies. *J. Agric. Food Chem.* 2016. Vol. 64 (22). P. 4435–4449.
12. Basu P., Maier C. In vitro Antioxidant Activities and Polyphenol Contents of Seven Commercially Available Fruits. *Pharmacognosy Res.* 2016. Vol. 8 (4). P. 258–264.
13. Skrovankova S., Sumczynski D., Mlcek J., et al. Bioactive Compounds and Antioxidant Activity in Different Types of Berries. *Int. J. Mol. Sci.* 2015. Vol. 16 (10). P. 24673–24706.
14. Cao G. H., Alessio H. M., Cutler R. G. Oxygen-radical absorbance capacity assay for antioxidants. *Free Radicals In Biology And Medicine.* 1993. Vol. 3, № 14. P. 303–311.
15. Ehlenfeldt M. K., Prior R. I. Oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and phenolic and anthocyanin concentrations in fruit and leaf tissues of highbush blueberry. *J. of Agricultural and Food Chemistry.* 2001. Vol. 49. P. 2222–2227.
16. Sichev A. Y., Isak V. G. [Homogeneous catalysis with iron compounds.] Kishinev, 1988 (in Russ.).
17. Wei Y. A novel H₂O₂-triggered anti-Fenton fluorescent pro-chelator excitable with visible light. *Chem. Commun.* 2009. Vol. 11. P. 1413–1415.

Статья поступила в редколлегию 10.05.2018
Received by editorial board 10.05.2018

УДК 636.084/.087;631.155.2:633.1

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО КОНСЕРВАНТА «БИОПЛАНТ» ПРИ СИЛОСОВАНИИ ЗЛАКОВО-БОБОВЫХ ТРАВ

Е. П. ХОДАРЕНОК¹⁾, А. А. КУРЕПИН¹⁾

¹⁾Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству,
ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Минская обл., Беларусь

Заготовка силосованных кормов из злаково-бобовых трав с использованием биологического консерванта «Биоплант» на основе лиофильно высушенных штаммов *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei* позволила получить корм с питательной ценностью 9,78 МДж обменной энергии в 1 кг сухого вещества, снизить потери сухого вещества на 5,9 %, сырого протеина – на 7,7 %, повысить молочную продуктивность коров на 5,6 %. Консервант отечественного производства «Биоплант» отличается экологической чистотой, не обладает раздражающим и аллергическим действием. В ходе его применения не установлено отрицательного влияния на организм животного.

Ключевые слова: биологический консервант; молочная продуктивность; *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus plantarum*; *Lactobacillus casei*.

ECOLOGICAL ASPECTS OF USE OF «BIOPLANT» BIOLOGICAL PRESERVATIVES IN SILAGE GRASSES AND LEGUMES

E. P. HODARENOK^a, A. A. KUREPIN^a

^aScientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Husbandry,
Frunze street, 11, 222160, Zhodino, Minsk region, Belarus
Corresponding author: A. A. Kurepin (npclabhim@mail.ru)

Procurement of silo forage from cereal and leguminous herbs using Bioplant a biological preservative on the basis of lyophilized dried strains of *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei* allowed to get a feed with a nutritional value of 9,78 MJ of metabolizable energy per 1 kg of dry matter; and reduce the loss of dry matter by 5,9 %, of crude protein by 7,7 %, to increase milk productivity of cows by 5,6 %. «Bioplant» preservative of domestic production is ecologically clean, does not have irritating and allergic effect. In the course of its application, there is no negative effect on the environment and the animal's organism.

Key words: biological preservative; milk production; *Lactobacillus acidophilus*; *Lactobacillus plantarum*; *Lactobacillus casei*.

Образец цитирования:

Ходаренок Е. П., Курепин А. А. Экологические аспекты использования биологического консерванта «Биоплант» при силосовании злаково-бобовых трав // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 2. С. 136–141.

For citation:

Hodarenok E. P., Kurepin A. A. Ecological aspects of use of biological preservatives «Bioplant» in silage grasses and legumes. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 2. P. 136–141 (in Russ.).

Авторы:

Елена Петровна Ходаренок – научный сотрудник лаборатории кормопроизводства.

Александр Александрович Курепин – кандидат сельскохозяйственных наук; заведующий лабораторией оценки качества кормов и биохимических анализов.

Authors:

Elena P. Hodarenok, researcher of the fodder production laboratory.

npclabhim@mail.ru

Alexander A. Kurepin, PhD (agriculture); head of laboratory for feed quality assessment and biochemical analysis.

npclabhim@mail.ru

Введение

Насыщение рынка полноценными продуктами питания – неотложная задача сельского хозяйства страны. Развитие животноводства требует значительного повышения качества кормов при одновременном снижении их расхода за счет более рационального использования.

В последние годы в Республике Беларусь актуальными являются исследования, связанные с применением консервантов при заготовке силосованных кормов. Введение консервантов в корма обусловлено необходимостью обеспечить их максимальную сохранность. Они способны снизить развитие нежелательных микроорганизмов, вызывающих потери питательных веществ и энергии в ходе закладки и хранения, а также в процессе использования кормов.

Применяемое химическое консервирование – это процесс ингибирования ферментов в растениях как на генетическом уровне (тормозится биосинтез ферментов в клетках растений и микроорганизмов), так и кинетическом (консервант блокирует имеющиеся в корме ферменты и тормозит их действие). Химический консервант вступает во взаимодействие со всеми веществами и подавляет ферментативные реакции. Однако широкое применение химического консервирования в последние годы сильно сдерживается из-за возникающих трудностей при хранении химических веществ, транспортировки, внесении, агрессивности, а также загрязнения окружающей среды. Он должен разрушаться к моменту скармливания консервированного корма без образования токсичных продуктов, а также не придавать корму неприятного запаха и привкуса.

Поэтому при выборе того или иного консерванта следует учитывать не только его влияние на сохранность питательных веществ и качество корма, но и на безвредность для организма животного и окружающую среду.

В странах с развитым животноводством (США, Канада, Германия, Дания, Голландия и др.) в настоящее время для консервирования растительных кормов на 90–95 % используют сухие биологические консерванты [1–3].

Основой биологического консерванта служит одна или несколько живых культур молочнокислых бактерий, которые продуцируют молочную кислоту, подавляющую нежелательную анаэробную микрофлору. Однако и сегодня остается актуальным поиск новых сочетаний бактерий для получения экологически чистых, недорогих и технологичных биологических консервантов, обеспечивающих сохранение питательных веществ в кормах, что способствует реализации генетического потенциала животных при снижении затрат на единицу производимой продукции.

Для подавления развития аэробной микрофлоры в консерванты зачастую дополнительно вводят такие гетероферментативные молочнокислые бактерии, как *Lactobacillus buchneri* или пропионовокислые бактерии, которые синтезируют и накапливают в массе корма пропионовую кислоту и некоторые другие вещества, угнетающе действующие на развитие дрожжевых и плесневых грибов. Причина высокой популярности биологических консервантов кроется в их меньшей, по сравнению с химическими продуктами, стоимости. Кроме того, консервирование кормов с использованием бактериальных консервантов отличается экологической чистотой, так как они не оказывают токсического действия на окружающую среду и не угнетают микрофлору желудочно-кишечного тракта животных, не требуют применения защитных средств при их внесении в консервируемое сырье. Биологическое консервирование растительных кормов бактериальными заквасками – это микробиологический синтез в силосе из сбраживаемых сахаров молочной и уксусной кислот для интенсификации образования водородных ионов в жидкой фазе силоса, направленных на подавление активности гнилостных и маслянокислых бактерий. Биологические консерванты (молочнокислые бактерии) ускоряют процесс превращения углеводов в молочную кислоту, снижая потери питательных веществ и угнетая нежелательные ферментативные процессы [4–9].

Бактериальный препарат должен содержать (желательно) не один, а несколько штаммов молочнокислых бактерий, обладающих различными адаптирующими свойствами к условиям культивирования, что обеспечивает необходимую пластичность препарата. Особенно важно обеспечить доминирование культурных штаммов молочнокислых бактерий на всех стадиях брожения в силосе. Как известно, молочнокислое брожение в силосе протекает в две стадии: в начале преобладают кокковые, а затем палочковидные формы.

Эффективность бактериальных препаратов зависит от большого числа факторов – размера эпифитных популяций молочнокислых бактерий, вида бактерий и их активности, дозы и способа внесения бактериального препарата, равномерности обработки силосуемой массы, вида силосуемого сырья и т. д. Выбор наиболее подходящих штаммов должен основываться на их безопасности, возможности расти в различных условиях, как, например, разное содержание сухого вещества в корме, разные температуры и значения pH, способность штаммов расщеплять сахар, содержащийся в корме, способность подавлять

развитие гнилостных бактерий и грибов. Также очень важна стабильность консервантов, позволяющая поддерживать необходимый уровень содержания живых бактерий в корме. Такими характеристиками могут обладать только сухие консерванты, которые перед применением разводятся в воде [10; 11].

Использование биологических консервантов при заготовке силосованных кормов является в настоящее время целесообразным, так как они не только улучшают сохранность силоса, но и оказывают положительное влияние на организм животного.

Таким образом, цель работы – изучить эффективность применения биологического консерванта отечественного производства «Биоплант» при заготовке консервированных кормов и его влияние на организм животных.

Материалы и методы исследования

С целью изучения влияния скармливания злаково-бобового силоса, заготовленного с использованием биологического консерванта «Биоплант», на молочную продуктивность и влияние на организм животного, в РУСП «Заречье» Смолевичского р-на Минской обл. проведен научно-хозяйственный опыт на коровах черно-пестрой породы с удоем 5–5,5 тыс. кг молока за законченную лактацию.

Для этого в хозяйстве было заготовлено 1000 т силоса с использованием данного препарата. В качестве контрольного варианта было заложено 1000 т силоса из злаково-бобовых травосмесей без консерванта.

Биологический консервант «Биоплант» представляет собой консорциум лиофильно высушенных штаммов молочнокислых бактерий *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei* и предназначен для силосования растительных кормов. Норма внесения консерванта – 10 г на тонну силосуемой массы злаково-бобовых трав.

Количество молочнокислых бактерий в 1 г биологического консерванта – не менее 1×10^{10} КОЕ. Микроорганизмы, входящие в состав консорциума, обладают следующими производственно-ценными свойствами:

1. Быстро растут и способны к доминированию над местной силосной микрофлорой.
2. Имеют высокую антагонистическую активность.
3. Гомоферментативны и, таким образом, производят молочную кислоту из доступных утилизирующих углеводов.
4. Устойчивы к кислоте, по крайней мере, при pH 4.0.
5. Способны сбраживать гексозы, пентозы и фруктаны.
6. Не производят декстраны и никак не воздействуют на органические кислоты.
7. Обладают способностью к росту при температуре до 50 °C.

Препарат применяется в виде 0,6–1,0 % раствора. Распыляется на растительный материал при его уборке насосом-дозатором, расположенном на кормоуборочном комплексе.

В опытах были изучены состав и дозы внесения консерванта, химический анализ кормов и продуктов обмена по схеме зоотехнического анализа: зола, содержание влаги, общий азот, сырая клетчатка, сырой жир, кальций, фосфор, pH, сухое и органическое вещество, БЭВ, содержание органических кислот [12; 13].

Учет молочной продуктивности съеденных кормов, а также отбор средних образцов (молока, корма, крови) для лабораторных исследований проводили в лаборатории оценки качества кормов и биохимических анализов РУП «НПЦ НАН Беларуси по животноводству». Химический состав молока определен на «Милкоскане 605», гематологические показатели на анализаторе URIT VETPLUS.

Данные, полученные в ходе проведения опытов, обработаны методом вариационной статистики по П. Ф. Рокицкому [14].

Одним из важных показателей, характеризующих качество силоса, является активная кислотность (pH). По величине pH можно судить о доброкачественности силоса, приготовленного из свежескошенных растений. Интересно, что быстрое подкисление корма до pH 4,2–4,3 исключает развитие маслянокислых бактерий. Многие нежелательные бактерии утрачивают способность размножаться при уровне pH 4,2. Можно с уверенностью утверждать, что при таком уровне pH в корме преобладает молочная кислота, а масляной кислоты или нет вообще, или количество ее ничтожно мало.

В ходе проведенных нами исследований в РУСП «Заречье» Смолевичского р-на Минской обл. установлено, что pH злаково-бобового силоса спонтанного брожения составляло 4,4, в варианте с консервантом «Биоплант» активная кислотность находилась на уровне 4,2 ед.

Внесение консерванта «Биоплант» при заготовке злаково-бобового силоса оказало положительное влияние на кислотный состав силоса. В силосе с биологическим консервантом содержалось на 7,95 %

больше молочной кислоты и на 7,92 % меньше уксусной, чем в контроле. В силосе спонтанного брожения отмечено наличие масляной кислоты в количестве 0,03 %.

На основании проведенных биохимических исследований злаково-бобовых силосов следует отметить, что корма имели достаточную концентрацию органических кислот. Применение биологического препарата позволило улучшить соотношение молочной и уксусной кислот, при этом в силосе с использованием препарата «Биоплант» отсутствовала масляная кислота, что говорит об ограничении в силосе маслянокислого брожения.

Сравнительное изучение химического состава силосов показало (табл. 1), что злаково-бобовый силос с консервантом содержит сырого протеина больше на 12,95 %, сухого вещества на 8,6 %, сырого жира на 6,3 % и меньше сырой клетчатки на 8,2 %, по сравнению с силосом спонтанного брожения.

Таблица 1

Химический состав и питательная ценность силосов

Table 1

Chemical composition and nutritional value of silos

Показатели	Контроль	Опыт
Сухое вещество, %	30,85	33,51
Содержится в 1 кг сухого вещества:		
Кормовых единиц	0,91	0,96
Обменной энергии, МДж	9,42	9,78
Сырого протеина, г	125,1	141,3
Сырого жира, г	39,6	42,1
Сырой клетчатки, г	261,3	239,8
БЭВ, г	487,5	512,3

Увеличение содержания протеина (16,2 г) в опытном силосе явилось следствием протекания биохимических процессов в силосуемой массе по принципу гомоферментативного брожения, что негативно сказалось на жизнедеятельности аминотрофов, а также других возбудителей нежелательного брожения. Следствием этого явилось сокращение срока созревания силоса и, соответственно, потерь протеина в процессе хранения.

Изучение энергетической питательности заготовленных кормов показало, что концентрация обменной энергии силоса, заготовленного с использованием биологического консерванта «Биоплант», составила 9,78 МДж в 1 кг сухого вещества, что выше на 3,8 % в сравнении с контрольным силосом.

Использование штаммов молочнокислых бактерий при заготовке силосованных кормов способствует сокращению потерь при их хранении. Так, в злаково-бобовом силосе произошло сокращение потерь сухого вещества по сравнению с контрольным на 5,9 %, сырого протеина – на 7,7 %.

Низкие потери сухого вещества при заготовке и хранении силоса с внесением консерванта происходят из-за сокращения срока участия в микробиологических процессах гнилостной, маслянокислой микрофлоры, ускоряя при этом интенсивное размножение и развитие молочнокислых бактерий и подкисление среды.

Согласно учетным данным, поедаемость коровами сена, свеклы, патоки и комбикорма была полной в обеих группах. Животные опытной группы лучше поедали опытный силос на 7,6 %. В контрольной группе наблюдался больший расход кукурузного силоса на 6,7 %, комбикорма – на 9,6 %.

Структура рациона контрольной группы была следующей: силос злаково-бобовый – 30,3 %, силос кукурузный – 24,8, сено разнотравное – 7,7, пивная дробина – 5,4, комбикорм – 31,8; опытной группы – силос злаково-бобовый, заготовленный с консервантом – 36,1 %, силос кукурузный – 22,7, сено разнотравное – 7,5, пивная дробина – 5,3, комбикорм – 28,3 %.

Анализ среднесуточных рационов показал, что по питательности рационы обеих групп удовлетворяли потребностям животных. Животные опытной группы потребляли сырого протеина на 3,9 % больше, чем контрольные аналоги.

Содержание переваримого протеина на 1 кормовую единицу в рационах составило в контрольной группе – 98,57 г, в опытной – 101,13 г. Концентрация обменной энергии в сухом веществе опытного рациона составила 9,82 МДж, контрольного – 9,74 МДж.

Уровень продуктивности коров обусловлен величиной концентрации обменной энергии и всех питательных веществ рациона. Введение в состав рациона коров опытной группы силоса, заготовленного

с использованием биологического консерванта «Биоплант», способствовало достоверному повышению молочной продуктивности лактирующих коров на 5,6 % ($P < 0,01$) (табл. 2). В пересчете на 4 %-ное молоко разница между опытной и контрольной группами составила 11,7 % ($P < 0,01$).

Таблица 2

Молочная продуктивность и химический состав молока подопытных животных

Table 2

Milk productivity and chemical composition of milk of experimental animals

Показатели	Группы	
	контроль	опыт
Среднесуточный удой за опыт, кг	18,96±0,29	20,02±0,21**
Удой 4 %-ного молока, кг	16,96±0,26	18,94±0,19**
Массовая доля жира, %	3,58±0,03	3,76±0,02
Массовая доля белка, %	3,13±0,03	3,25±0,02

** $P < 0,01$

По содержанию массовой доли жира молоко животных опытной группы превосходило контрольных на 0,18 п.п., содержанию белка – 0,12 п.п.

Анализ полученных данных свидетельствует, что скормливание лактирующим коровам силоса с биологическим препаратом оказывает положительное влияние на потребление кормов, переваримость, использование питательных веществ и энергии рационов, что отразилось на производстве молока. Также следует отметить, что все гематологические показатели крови находились в пределах физиологических норм.

Заключение

Консервант отечественного производства «Биоплант» (ТУ ВУ 100377914.557-2008) отличается экологической чистотой, не обладает раздражающим и аллергическим действием. В ходе его применения не установлено отрицательного влияния на организм животного.

Исходя из анализа гематологических показателей и качественных показателей молока, можно сделать вывод, что скормливание подопытным коровам силосов, заготовленных с использованием биологического консерванта, не оказывает отрицательного влияния на их физиологическое состояние и качество получаемого молока.

Заготовка силосованных кормов из злаково-бобовых трав с использованием биологического консерванта «Биоплант» на основе лиофильно высушенных штаммов *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei* позволило получить корм с питательной ценностью 9,78 МДж обменной энергии в 1 кг сухого вещества, снизить потери сухого вещества на 5,9 %, сырого протеина – на 7,7 %, повысить молочную продуктивность коров на 5,6 %.

Библиографические ссылки

1. Пенькова И. Н., Ривняк Т. Т., Онистратенко Н. В. Использование силоса, заготовленного с консервантом «Бишокон-идеал», в кормлении лактирующих коров // Кормопроизводство. 2011 г. № 2. С. 46–48.
2. Разумовский, Н. П. Качество травяных кормов – здоровье и продуктивность животных // Наше сельское хозяйство. 2011. № 4. С. 32–38.
3. Отрошко, С. А., Ахламов Ю. Д., Шевцов А. В. О внесении консервантов в силосуемую массу многолетних бобовых трав // Кормопроизводство. 2008. № 9. С. 28–29.
4. Пуновский И. И. Как снизить потери при заготовке кормов из трав // Агропанорама. 2002. № 3. С. 13–16.
5. Капустин Н. К., Зиновенко А. Л. Переваримость питательных веществ в рационах с злаково-бобовыми силосами и баланс азота, кальция и фосфора // Международный аграрный журнал. 2000. № 12. С. 37–39.
6. Абраскова С. В., Шлапунов В. Н. Резервы улучшения качества травяных кормов // Зямляробства і ахова раслін. 2009. № 1 (62). С. 22–24.
7. Schmidt R. J., Hu W., Mills J. A., et al. The development of lactic acid bacteria and *Lactobacillus buchneri* and their effects on the fermentation of alfalfa silage // J. of Dairy Science. 2009. Vol. 92, № 10. P. 5005–5010.
8. Сульtimoва Т. Д., Стоянова Л. Г., Цыренов В. Ж. Биологический консервант на основе штамма *Lactococcus lactis subsp. lactis* F-116 // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2013. Т. 44. С. 91–98.
9. Ибраимова Ж. К., Рустенов А. Р., Елеугалиева Н. Ж. и др. Исследование эффективности силосования различного растительного сырья с применением некоторых видов молочнокислых бактерий в качестве консервантов // Биотехнология: теория и практика. 2013. № 3. С. 41–45.

10. Давидюк Д. С. Лактофлор – первый белорусский консервант // Белорусское сельское хозяйство. 2006. № 5. С. 43–44.
11. Добрук Е. А. Использование биоконсервантов «Лактофлор» и «Лабоксил Дуо» при консервировании травянистых кормов // Сельское хозяйство – проблемы и перспективы: сб. науч. тр. 2006. С. 159–162.
12. Мальчевская Е. Н., Миленская Г. С. Оценка качества и зоотехнический анализ кормов. Минск, 1981.
13. Петухова, Е. А., Бессабарова Р. Ф., Холенева Л. Д. Зоотехнический анализ кормов. М., 1989.
14. Рокицкий П. Ф. Биологическая статистика. Минск, 1973.

References

1. Penkova I. N., Rivnjak T. T., Onistratenko N. V. [Use of silage harvested with preservative «Bishokon-ideal» in the feeding of lactating cows]. *Fodder production*. 2011. No. 2. P. 46–48 (in Russ.).
2. Razumovsky N. P. [Quality of herbal forages – health and productivity of animals]. *Our agriculture*. 2011. No. 4. P. 32–38 (in Russ.).
3. Otroshko S. A., Akhlamov Yu. D., Shevtsov A. V. [On the application of preservatives in the silage mass of perennial Bo-bo-herbs]. *Fodder production*. 2008. No. 9. P. 28–29 (in Russ.).
4. Piunovsky I. I. [How to reduce losses when harvesting forages from grasses]. *Agropanorama*. 2002. No. 3. P. 13–16 (in Russ.).
5. Kapustin N. K., Zinovenko A. L. [Digestibility of nutrients in diets with cereal-bean silage and balance of nitrogen, calcium and phosphorus]. *International Agrarian J.* 2000. No. 12. P. 37–39 (in Russ.).
6. Abraskova S. V., Shlapunov V. N. [Reserves for improving the quality of herbal]. *Agriculture and plant protection*. 2009. No. 1 (62). P. 22–24 (in Russ.).
7. Schmidt R. J., Hu W., Mills J. A., et al. The development of lactic acid bacteria and *Lactobacillus buchneri* and their effects on the fermentation of alfalfa silage. *J. of Dairy Science*. 2009. Vol. 92, No. 10. P. 5005–5010.
8. Sulyimova T. D., Stoyanova L. G., Tsyrenov V. Zh. [Biological preservative on the basis of the strain *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* F-116]. *Bulletin of the East Siberian State University of Technology and Management*. 2013. Vol. 44. P. 91–98 (in Russ.).
9. Ibraimova Zh. K., Rustenov A. R., Eleugalieva N. Zh., et al. [Investigation of the effectiveness of the siloing of various plant raw materials using certain types of lactic acid bacteria as preservatives]. *Biotechnology: Theory and Practice*. 2013. No. 3. P. 41–45 (in Russ.).
10. Davidiuk D. S. [Lactoflor is the first Belarusian preservative]. *Belarusian agriculture*. 2006. No. 5. P. 43–44 (in Russ.).
11. Dobruk E. A. [The use of bioconservants «Lactoflor» and «Laboxil Duo» in the conservation of herbaceous forages]. *Agriculture – problems and perspectives: coll. sci. tr. Grodno*, 2006. P. 159–162 (in Russ.).
12. Malchevskaya E. N., Milenkaya G. S. [Assessment of quality and zootechnical analysis of feeds]. Minsk, 1981 (in Russ.).
13. Petukhova E. A., Bessabarova R. F., Kholeneva L. D. [Zootechnical analysis of feeds]. Moscow, 1989 (in Russ.).
14. Rokitsky P. F. [Biological statistics]. 1973 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 10.05.2018
Received by editorial board 10.05.2018

СОДЕРЖАНИЕ

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Трембле Л., Гончарова Н. В. Мобилизация кафедр ЮНЕСКО по естественным наукам на курс действий по Повестке дня 2030.....	4
---	---

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

Гляковская Е. И., Жоров Д. Г., Рыжая А. В., Буга С. В. Экологическая, таксономическая и хорологическая структура комплекса инвазивных видов членистоногих-фитофагов зеленых насаждений Гродненского Понеманья	10
Змачинский А. С. Антропогенное преобразование гидрографической сети г. Минска за исторический период.....	18
Кабашикова Л. Ф. Молекулярные механизмы взаимодействия растений и фитопатогенов: врожденный иммунитет	26
Матюшевская Е. В., Киселев В. Н., Яротов А. Е., Митрахович П. А., Девгутъ С. В. Сравнительный анализ продукционного потенциала ели на осушенной и неосушенной территориях Белорусского Полесья	38
Холодная А. С., Десятник К. А. Оперативная диагностика функциональной стойкости почв под действием различных нагрузок.....	48

РАДИОЭКОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Цыбулько Н. Н. Оценка рисков производства сельскохозяйственной продукции с превышением допустимых уровней содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr на территории радиоактивного загрязнения.....	57
---	----

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

Бакунович А. В., Бичан О. Д., Лобанок Л. М., Буланова К. Я. Особенности влияния диаденозин тетрафосфата на тромбин-индуцированную агрегацию тромбоцитов беременных женщин с преэклампсией	71
Сыманович А. А., Примакова Е. А., Гомон А. А., Дедюля Н. И., Петровская Е. Г., Бузук Е. С., Смольникова В. В., Щерба А. Е., Кривенко С. И. Ко-трансплантаты на основе гепатоцитов и мезенхимальных стволовых клеток: характеристика, клиническое применение и первичная оценка эффективности подхода	79
Храмченкова О. М., Матвеевков М. В. Цитотоксическая активность экстрактов из четырех видов лишайников в отношении культур опухолевых клеток.....	88

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Дубатовка А. И. Экологическая безопасность соединений бора в целлюлозной изоляции.....	99
Куян В. Г., Овезмирадова О. Б., Евтушок И. М. Интенсификация технологий выращивания и экологическое качество плодов смородины черной (<i>R. nigrum</i> L.).....	110
Рупасова Ж. А., Яковлев А. П., Ярошук А. А., Савосько И. В., Гончарова Л. В., Алещенкова З. М., Коломиец Э. И. Влияние удобрений на накопление углеводов в плодах голубики на рекультивируемом участке торфяной выработки на севере Беларуси	118
Сорока А. В., Терлецкая Н. Ф., Гапонюк А. Н., Антонюк А. С. Оценка состава отходов зерноперерабатывающих предприятий.....	124
Тарун Е. И., Антончик И. В. Антиоксидантная активность сока ягодных культур	129
Ходаренок Е. П., Курепин А. А. Экологические аспекты использования биологического консерванта «Биоплант» при силосовании злаково-бобовых трав.....	136

CONTENTS

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

<i>Trembley L., Goncharova N. V.</i> Mobilising UNESCO chairs in natural sciences for policy action towards the 2030 agenda	4
---	---

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Hliakouskaya K. I., Zhorov D. G., Ryzhaya A. V., Buga S. V.</i> Ecological, taxonomic and zoogeographic structure of complex of invasive phytophagous arthropods in green stands in Grodno Poneman Region	10
<i>Zmachynski A. S.</i> Anthropogenic transformation of hydrographic network of Minsk for the historical period	18
<i>Kabashnikava L. F.</i> Molecular mechanisms of plants and phytopathogens interaction: innate immunity	26
<i>Matushevskaya E. V., Kisieliou V. N., Jarotou A. E., Mitrakhovich P. A., Devgut S. V.</i> Comparative analysis of the productive potential of spruce on the drainage and undrainage territories of the Belarusian Polesje	38
<i>Kholodna A. S., Desyatnyk K. A.</i> Operational diagnostics of functional stability of soils under the action of various loads	48

RADIOECOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Tsybulka M. M.</i> Assessment of agricultural production risks with exceeding the admissible levels content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the territory of radioactive contamination.....	57
---	----

MEDICAL ECOLOGY

<i>Bakunovich A. V., Bichan O. D., Lobanok L. M., Bulanova K. Ya.</i> Features of diadenosine tetraphosphate influence on thrombin-induced platelet aggregation of pregnant women with pre-eclampsia	71
<i>Symanovich A. A., Prymakova Y. A., Homan A. A., Dzyadzyulya N. I., Pyatrouskaya K. G., Buzuk E. S., Smolnikova V. V., Shcherba A. E., Krivenko S. I.</i> Ko-transplants based on hepatocytes and mesenchimal stem cells: characteristic, clinical application and primary assessment of the approach efficiency	79
<i>Khramchankova V. M., Matveyenkau M. V.</i> Cytotoxic activity of extracts from the four lichen species against human cancer cells lines.	88

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Dubatouka A. I.</i> Environmental safety of boron compounds in cellulose insulation.....	99
<i>Kuyan V. G., Ovezmyradova O. B., Yevtushok I. M.</i> The Intensification of the Cultivation Technologies and the Ecological Quality of Black Currants (<i>R. nigrum</i> L.) Fruit.	110
<i>Rupasova Z. A., Yakovlev A. P., Krinitskaya N. B., Yaroshuk A. A., Savosko I. V., Goncharova L. V., Aleschenkova Z. M., Kolomiets E. I.</i> Impact of fertilizings on accumulation of carbohydrates in blueberry fruits on recultivated cutover peatlands in the north of Belarus.....	118
<i>Soroka A. V., Tsiarletska N. F., Gaponiuk A. N., Antoniuk A. S.</i> Evaluation of grain processing enterprises waste compounds.....	124
<i>Tarun E. I., Antonchik I. V.</i> Antioxidant activity of berry crops juice.....	129
<i>Hodarenok E. P., Kurepin A. A.</i> Ecological aspects of use of «Bioplant» biological preservatives in silage grasses and legumes	136

Журнал включен Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований по биологическим, сельскохозяйственным и техническим (экология) наукам.

Журнал включен в библиографическую базу данных научных публикаций «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

**Журнал Белорусского
государственного университета. Экология.
№ 2. 2018**

Учредитель:
Белорусский государственный университет

Юридический адрес: пр. Независимости, 4,
220030, Минск.

Почтовый адрес: ул. Долгобродская, 23/1, каб. 205-2, 302,
220070, Минск.
Тел. 398-89-34, 398-93-44.
E-mail: bulletin@iseu.by

«Журнал Белорусского государственного
университета. Экология» издается с сентября 2017 г.
До августа 2017 г. выходил под названием
«Экологический вестник»
(ISSN 1994-2087).

Редакторы Л. М. Кореневская, Т. А. Лавринович
Технический редактор Д. В. Головач
Корректор А. В. Красуцкая

Подписано в печать 19.06.2018.
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, 2018

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 2. 2018**

Founder:
Belarusian State University

Registered address: Nezavisimosti ave., 4,
220030, Minsk.

Correspondence address: Dolgobrodskaya str., 23/1, office 205-2, 302,
220070, Minsk.
Tel. 398-89-34, 398-93-44.
E-mail: bulletin@iseu.by

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

Editors L. M. Korenevskaya, T. A. Lavrinovich
Technical editor D. V. Golovach
Proofreader A. V. Krasutskaya

Signed print 19.06.2018.
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.
Kalvaryjskaya str., 17, 220004, Minsk.

© BSU, 2018