



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

4

2024

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

РОДЬКИН О. И. – доктор биологических наук, доцент; директор Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
E-mail: info@iseu.by

**Заместитель
главного
редактора**

ГЕРМЕНЧУК М. Г. – кандидат технических наук, доцент; заместитель директора по научной работе Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
E-mail: germenchuk@iseu.by

**Ответственный
секретарь**

ЛОЗИНСКАЯ О. В. – старший преподаватель кафедры общей биологии и генетики Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
E-mail: aromia@rambler.ru

Батян А. Н.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Головатый С. Е.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Голубев А. П.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Гричик В. В.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Дардынская И. В.

Центр всемирного здоровья «Великие озера», Чикаго, США.

Дзятковская Е. Н.

Институт стратегии развития образования Российской академии образования, Москва, Россия.

Дроздович В. В.

Национальный институт рака, США, Бетесда.

Зафранская М. М.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Кильчевский А. В.

Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Коноплев А. В.

Институт радиоактивности окружающей среды университета г. Фукусима, Япония.

Коровин Ю. А.

Обнинский институт атомной энергетики – Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Обнинск, Россия.

Ленгфельдер Э.

Радиологический институт здоровья и окружающей среды им. Отто Хуга, Мюнхен, Германия.

Либерамос Г.

Афинский технический университет, Афины, Греция.

Линге И. И.

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия.

Лукашенко С. Н.

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия.

Логинов В. Ф.

Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Медведев С. В.

ГНУ «Объединенный институт проблем информатики» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Набиев И. Р.

Реймский университет, Франция, Реймс.

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 им. Н. Н. Александрова», Минск, Беларусь.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief	RODZKIN O. I. , doctor of science (biology), docent; International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: info@iseu.by
Deputy editor-in-chief	GERMENCHUK M. G. , PhD (engineering), docent; deputy director for research of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: germenchuk@iseu.by
Executive secretary	LOZINSKAYA O. V. , senior lecturer at the department of general biology and genetics of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University. E-mail: aromia@rambler.ru
<i>Batyan A. N.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Golovaty S. E.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Golubev A. P.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Grichik V. V.</i>	Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Dardynskaya I. V.</i>	Great Lakes Center for Occupational and Environmental Safety and Health, Chicago, USA.
<i>Dziatkovskaya E. N.</i>	Institute of Education Development Strategy of the Russian Academy of Education, Moscow, Russia.
<i>Drozdovitch V. V.</i>	Radiation Epidemiology Branch, DCEG (Division of Cancer Epidemiology and Genetics), National Cancer Institute, Bethesda MD.
<i>Zafranskaya M. M.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Kilchevsky A. V.</i>	National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Konoplev A. V.</i>	Environmental Radioactivity Institute, Fukushima University, Japan.
<i>Korovin Y. A.</i>	Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia.
<i>Lengfelder E.</i>	Otto Hug Radiological Institute for Health and Environment, Munich, Germany.
<i>Lyberatos G.</i>	Athens Technical University, Athens, Greece.
<i>Linge I. I.</i>	Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
<i>Lukashenko S. N.</i>	Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia.
<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>Nabiev I. R.</i>	University of Reims Champagne-Ardenne (URCA), France.
<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.

УДК 539.1.047:631.95:574.46

ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕХОДА РАДИОНУКЛИДОВ В БИОМАССУ МИСКАНТУСА ГИГАНТСКОГО НА ЗЕМЛЯХ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ ПОЛЕССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

М. В. КУДИН¹⁾, Е. Б. ЕВСЕЕВ¹⁾, Д. К. ГАРБАРУК¹⁾, А. Н. ВОРОНЕЦКАЯ¹⁾, А. В. ДРАГУН²⁾

¹⁾Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,
ул. Терешковой 7, 247618, г. Хойники, Гомельская область, Беларусь

²⁾Гомелаб Технолоджи,
ул. Хозяйственная, 5, 246144, г. Гомель, Беларусь

Изучается новая для Беларуси культура мискантус гигантус, интродуцированная в условиях Белорусского Полесья, описаны ее биологические и экологические особенности. Предложено использование исследуемой культуры на энергетические цели. Предполагается, что выращивание в Беларуси растений на энергетические цели наиболее перспективно в природно-климатических условиях Гомельской обл. Культивирование мискантуса способствует решению ряда значимых экологических вопросов, обеспечивая получение устойчивого урожая качественной растениеводческой продукции, что повышает эффективность низкоплодородных земель, улучшает гумусное состояние и стабилизирует фонд подвижных форм зольных элементов почвы, тем самым препятствуя нарастающему истощению ее плодородия и деградации. Дана характеристика климатических условий произрастания на протяжении опыта с 2020 по 2023 гг. Описывается экспериментальная деятельность по выращиванию мискантуса гигантуса сорта «Дружба-Автюки» на территории зоны отчуждения Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. Определены параметры накопления Cs^{137} и Sr^{90} в вегетативной массе растения. Рассчитаны предельно допустимые плотности загрязнения почв при выращивании исследуемого растения на различные технические цели. При выращивании мискантуса гигантского сорта «Дружба-Автюки» на дерново-подзолистых песчаных и дерново-подзолистых глееватых почвах для производства древесного технического сырья, топлива древесного и прочей непищевой продукции лесного хозяйства возможно без ограничений по плотности загрязнения Cs^{137} . Однако получение нормативно чистой биомассы исследуемой культуры на дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных почвах налагает ограничения по плотности загрязнения почвы Cs^{137} : 27,85 Ки/км² – для прочей непищевой продукции лесного хозяйства; 22,3 Ки/км² – для древесного технического сырья; 11,1 Ки/км² – для топлива древесного. Предполагается перспективность использования растительного сырья мискантуса гигантского, выращенного на радиоактивно загрязненных землях в технологических целях (для получения целлюлозы, биодизеля, биогаза), при условии выполнения дополнительных исследований и проработки технологических операций на реальных производственных объектах.

Образец цитирования:

Кудин МВ, Евсеев ЕБ, Гарбарук ДК, Воронцовская АН, Драгун АВ. Параметры перехода радионуклидов в биомассу мискантуса гигантского на землях зоны отчуждения Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;4:44–54.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-44-54>

For citation:

Kudin MV, Evseev EB, Garbaruk DK, Voronetskaia AN, Dragun AV. Parameters of the transition of radionuclides into the biomass of miscanthus giganteus on the lands of the exclusion zone of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;4:44–54. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-44-54>

Авторы:

Максим Владимирович Кудин – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заместитель директора по научной работе.

Евгений Борисович Евсеев – кандидат сельскохозяйственных наук; заведующий отделом радиационно-экологического мониторинга.

Дмитрий Константинович Гарбарук – заведующий отделом экологии растительных комплексов.

Алеся Николаевна Воронцовская – младший научный сотрудник отдела экологии растительных комплексов.

Александр Викторович Драгун – директор, владелец сорта «Дружба-Автюки».

Authors:

Maxim V. Kudin, PhD (agriculture), docent; deputy director for research.

max.kudin@mail.ru

Evgeniy B. Evseev, PhD (agriculture); head of the department of radiation and environmental monitoring.

evsey89@mail.ru

Dmitry K. Garbaruk, head of the department of ecology of plant complexes.

dima.garbaruk.77@mail.ru

Alesya N. Voronetskaia, junior researcher at the department of ecology of plant complexes.

voronetskaya2015@mail.ru

Alexander V. Dragun, director; owner of the "Druzhba-Avtyuki" variety.

gk.gomelab@yandex.ru

Ключевые слова: мискантус гигантский; Cs¹³⁷; Sr⁹⁰; параметры перехода; предельно допустимые плотности загрязнения почвы; технологические цели.

PARAMETERS OF THE TRANSITION OF RADIONUCLIDES INTO THE BIOMASS OF MISCANTHUS GIGANTUS ON THE LANDS OF THE EXCLUSION ZONE OF THE POLESIE STATE RADIATION-ECOLOGICAL RESERVE

M. V. KUDIN^a, E. B. EVSEEV^a, D. K. GARBARUK^a, A. N. VORONETSKAYA^a, A. V. DRAGUN^b

^aPolesie State Radiation-Ecological Reserve,
7 Tserashkova Street, Khoyniki 247618, Gomel region, Belarus

^bGomelab Technologies LLC,
5 Khazjajstvennaja Street, Gomel 246144, Belarus
Corresponding author: E. B. Evseev (evsey89@mail.ru)

The article describes a new culture for Belarus, *Miscanthus giganteus*, introduced in the conditions of Belarusian Polesie, and also describes its biological and environmental features. It is proposed to use the studied crop for energy purposes. It is assumed that growing plants for energy purposes in Belarus is most promising in the natural and climatic conditions of the Gomel region. The cultivation of *Miscanthus* contributes to solving a number of significant environmental issues. First of all, it ensures obtaining a sustainable harvest of high-quality crop products, which increases the efficiency of using low-fertile lands. Secondly, it improves the humus state and stabilizes the pool of mobile forms of ash elements in the soil, thereby preventing the increasing depletion of its fertility and degradation. The characteristics of the climatic conditions of growth during the experiment from 2020 to 2023 are given. Experimental activities for growing *Miscanthus giganteus* variety «Druzhba-Avtyuki» in the exclusion zone of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve are described. The parameters of accumulation of Cs¹³⁷ and Sr⁹⁰ in the vegetative mass of the plant were determined. The maximum permissible densities of soil contamination were calculated when growing the plant under study for various technical purposes. When growing *Miscanthus* of the giant variety «Druzhba-Avtyuki» on sod-podzolic sandy and sod-podzolic gleyic soils for the production of wood technical raw materials, wood fuel and other non-food forestry products, it is possible without restrictions on the density of contamination with Cs¹³⁷. At the same time, obtaining normatively pure biomass of the studied crop on soddy-podzolic soils that are temporarily excessively moistened imposes restrictions on the density of soil contamination with cesium-137: 27,85 Ci/km² – for other non-food forestry products; 22,3 Ci/km² – for wood technical raw materials; 11,1 Ci/km² – for wood fuel. It is suggested that there are prospects for using plant raw materials of giant *Miscanthus*, grown on radioactively contaminated lands, for technological purposes (to produce cellulose, biodiesel, biogas), subject to additional research and development of technological operations at real production facilities.

Keywords: giant *Miscanthus*; Cs¹³⁷; Sr⁹⁰; transition parameters; maximum permissible densities of soil pollution; technological goals.

Введение

Исторически сложившаяся проблема загрязнения большого количества земель Республики Беларусь в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС до сих пор остается актуальной и вызывает необходимость исследования закономерностей депонирования радионуклидов в новых культурах, интродуцированных в отдаленный период после аварии. Авария оценивается как крупнейшая в своем роде за всю историю атомной энергетики по предполагаемому количеству погибших и пострадавших от ее последствий людей и по экономическому ущербу.

На 1 января 2020 г. площадь территории радиоактивного загрязнения республики цезием-137 вследствие его радиоактивного распада уменьшилась в 1,7 раза, стронцием-90 – почти в 1,9 раза и составляет соответственно 13,4 и 5,3 % общей площади республики [1].

Одним из наиболее тяжелых экологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС явилось радиоактивное загрязнение сельскохозяйственных земель. С целью предотвращения производства продукции с высоким содержанием радионуклидов 265 тыс. га земель было выведено из хозяйственного оборота и отнесено к радиационно опасным [2].

Приоритеты государственной политики на 2021–2025 гг. – дальнейшее снижение риска неблагоприятных последствий для здоровья граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, проведение на достигнутом уровне защитных мероприятий, осуществление радиационного мониторинга и контроля радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды, содействие восстановлению и ускоренному устойчивому социально-экономическому развитию пострадавших регионов при

безусловном выполнении требований радиационной безопасности, научное и информационное сопровождение.

Для выполнения заданий государственной программы требуется сокращение использования местных видов топлива для снижения дозовых нагрузок населения, проживающих на загрязненных радионуклидами землях. Предлагаемые варианты их замены заключаются в дальнейшей газификации и электрификации. Акцентируются местные экологически чистые источники энергии. В данной ситуации перспективным источником газа и электроэнергии выступает биогаз.

Биогазовые технологии в настоящее время являются одним из перспективных направлений возобновляемой энергетики, обеспечивая решение как энергетических, так и экологических задач. Биогазовые технологии уже получили широкое распространение в Европе, США, Китае, Бразилии и некоторых других странах. По данным источника [3], Европейской Биогазовой Ассоциации на начало 2016 г. в Европейском союзе насчитывалось 17376 биогазовых установок, было подсчитано, что за год они вырабатывают такое количество биогаза, за счет которого можно выработать 60,6 ТВт·ч электроэнергии, достаточного для обеспечения электроэнергией 14 млн домашних хозяйств. По данным Департамента по энергоэффективности государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь, в стране действует 20 биогазовых установок общей мощностью 27,9 МВт. Самая крупная установка на 4,8 МВт расположена в Могилевской обл.

В нашей республике нет больших запасов ископаемых энергетических ресурсов, однако достаточно широко могут использоваться энергетические растения. По своей сути они являются возобновляемыми ресурсами, так как периодически восстанавливаются и при рациональном использовании не наносят вреда окружающей среде. Помимо этого, энергетические растения могут использоваться в качестве пищевой энергии (кормов). В связи с этим развитие альтернативной энергетики имеет большое значение, а изучение биологических особенностей и способов выращивания энергетических растений является актуальным направлением исследований. Производство биоэнергии из биологической массы, выращенной на собственной земле, – перспективное направление для сельскохозяйственного производства [4].

Выращивание в Беларуси растений на энергетические цели наиболее важно в природно-климатических условиях Гомельской обл. Климат Белорусского Полесья (южная агроклиматическая область) теплый, неустойчиво-влажный, отличается большими перепадами температур и частыми засухами [5].

Наиболее перспективным, в этом отношении, растением является Мискантус (*Miscanthus* spp.), обладающий достаточно высоким адаптивным потенциалом. Его надземная целлюлозосодержащая биомасса относится к нетрадиционным возобновляемым источникам сырья и энергии, получение которых не требует значительных капитальных вложений.

В результате проведенного анализа литературных источников было выявлено большое количество преимуществ мискантуса.

1. Способность производственных плантаций произрастать на одном месте более 20 лет без существенного снижения продуктивности [6].

2. Свойство длительное время произрастать на низкопродуктивных землях [6].

3. Качественное сырье при производстве целлюлозы, бумаги, этанола, упаковочных материалов и других ценных продуктов.

4. Применение мискантуса в качестве биоразлагаемого сорбента для борьбы с загрязнением территорий, в частности тяжелыми металлами, ликвидации разливов нефти и т. д. [7–9].

Естественное географическое распространение рода *Miscanthus* приурочено к умеренной и субтропической зонам Юго-Восточной Азии, простираясь на запад до Центральной Индии и на восток до Полинезии; несколько видов обнаружены в Африке, а также на Дальнем Востоке в бореальной зоне [14]. Эти растения мискантуса в целом хорошо приспособляются к различным местам обитания, способны произрастать на разных высотах, что говорит о значительном адаптивном потенциале рода. Однако триплоид *M. giganteus* является наиболее распространенной формой для выращивания в южных регионах [15]. Он имеет фотосинтез C_4 -типа с высоким уровнем эффективности использования воды, света и элементов питания, при этом, в отличие от других видов растений C_4 -типа, некоторые виды мискантуса способны произрастать в относительно холодном климате [16]. Повышенная холодоустойчивость отдельных видов мискантуса делает перспективным кандидатом для возделывания в континентальных регионах России, в том числе в Сибири и регионах Поволжья [12;13].

В работах российских авторов [10–12; 17–20] подтверждается перспективность использования мискантуса, прогнозируются области культивирования на территории Российской Федерации, обосновывается настоятельная необходимость совершенствования технологий эффективной переработки этого целлюлозосодержащего растительного сырья, получаемого в специфических региональных условиях, описывается формирование и поддержание генофонда мискантуса в местных условиях [21].

Согласно исследованиям Л. А. Лосевой, по объемному содержанию зеленой массы исследованных растений, наиболее перспективными для получения зеленой массы в почвенно-экологических условиях восточной части нашей республики является мискантус гигантский [4].

Продуктивность биомассы этой культуры на малопродуктивных землях сильно варьирует и зависит от состояния используемых почв, применения удобрений и вида растений. Потенциальная продуктивность мискантуса при благоприятных факторах внешней среды может достигать 25 т сухой массы с 1 га, реальная же зависит от величины прихода фотосинтетической активной радиации (ФАР) и эффективности ее использования, почвенно-гидротермических условий выращивания, продолжительности вегетационного периода и вида растения [22]. Влияние климатических условий региона на урожайность мискантуса также показано в работах ряда отечественных и зарубежных авторов [13].

Исследования секвестирования углерода многолетними энергетическими культурами показали их способность связывать углерод (от 0,25 до 4 т/га в год почвенного углерода) и улучшать при этом агрофизические свойства почвы, увеличивать микробную биомассу и ее активность [23].

Одним из достоинств мискантуса является обеспечение его посадками положительного энергетического баланса и профицитного баланса гумуса. По данным В. А. Зинченко и М. Яшина (2011), урожай надземной биомассы этой культуры в 20 т/га может обеспечить столько же энергии, сколько производится из 12 т угля. При выращивании мискантуса уже на 5-й год в почве плантаций наблюдается увеличение (на 0,1–0,2 %) содержания гумуса [10]. Показано, что при его выращивании в течение 10 лет на почвах легкого гранулометрического состава содержание гумуса в почве возросло на 0,3–0,4 %, несмотря на интенсивное использование растениями почвенного мобильного азота, генерируемого соответствующими минерализационными процессами [11].

Исследования, проведенные за рубежом в посадках мискантуса, свидетельствуют, что запасы углерода в почве под этой культурой увеличиваются на 2 т/га в год [24]. В период формирования многолетних посадок мискантуса (4 года) в условиях Западной Сибири была проведена оценка компонентов баланса углерода, которая показала наличие объективных предпосылок для закрепления углерода атмосферы в устойчивых фракциях почвенного органического вещества [25].

С. Ю. Капустянчик с соавторами (2020) определили, что ежегодный вынос мискантусом элементов питания из почвенных запасов при средней урожайности 12 т/га составляет азота – 17–20 кг/га, фосфора – 11–17, калия – 35–40, магния – 2–3 кг/га. По сравнению с другими урожайными культурами, такие масштабы отчуждения питательных элементов из почвы представляются невысокими. Низкую потребность мискантуса в почвенных запасах элементов питания отмечали и другие авторы [7; 22].

По данным некоторых исследователей [26; 27], применение удобрений под мискантус целесообразно только в первые 1–2 года формирования плантации на почвах с очень низким содержанием NPK. Слабая отзывчивость этой культуры на внесение удобрений во многом связана с ее способностью к эффективной реутилизации питательных элементов.

Определенную степень опасности может вызывать предположение об инвазивности исследуемой культуры. Однако известно, что она свойственна растениям, размножающимся семенами. В этой связи, по мнению ряда авторов, мискантус не представляет инвазивной угрозы для сельскохозяйственных угодий [16].

Таким образом, исследования, проведенные в различных странах мира в разных почвенно-климатических условиях, установили положительные средообразующие возможности мискантуса, его очевидный фитомелиоративный и адаптивный потенциал. Выявлена способность растений рода *Miscanthus* поддерживать высокий уровень фотосинтеза C_4 -типа при низких температурах [28–30], показаны невысокие потребности в питательных веществах, способность связывать большое количество углерода, хорошая эффективность использования имеющейся влаги, высокая продукция биомассы [22; 28], а также повышенная устойчивость к болезням и вредителям [10].

На основании проведенного анализа большого числа литературных источников выдвигается гипотеза о перспективе культивирования мискантуса на энергетические цели на землях, загрязненных радионуклидами, выведенных из оборота. На основании инвентаризации выведенных из оборота земель установлено, что в настоящее время в Гомельской обл. числятся выведенными из хозяйственного оборота около 202 тыс. га, в Могилевской – около 44 тыс. га.

Материалы и методы исследования

В 2019 г. государственным природоохранным научно-исследовательским учреждением «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник» (далее – заповедник) была проведена закладка мелкоделяночного полевого эксперимента по оценке накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr мискантусом гигантским (сорт «Дружба-Автюки») на радиоактивно загрязненных землях с разной плотностью загрязнения почвы данными радионуклидами.

Стационарный полевой опыт по изучению параметров перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr из дерново-подзолистых почв разной степени гидроморфизма в биомассу мискантуса гигантского проводился в течение 4 лет (2020–2023 гг.) на землях белорусского сектора зоны отчуждения аварии на Чернобыльской АЭС согласно методике Доспехова [31]. Климатические условия вегетации мискантуса оценивались по общепринятой методике Г. Т. Селянинова [32]. Для постановки эксперимента было подобрано 3 участка с ненарушенной почвой и разной плотностью загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr . Объекты исследований располагались с севера на юг заповедника:

1. Бывший населенный пункт (далее – б. н. п.) Бабчин (северная граница заповедника) – 42 км до реактора.

Почвы: дерново-подзолистые глееватые иллювиально-гумусные супесчаные на рыхлых песках.

2. Б. н. п. Дроньки (центр заповедника) – 30 км до реактора.

Почвы: дерново-подзолистые временно избыточно увлажненные иллювиально-гумусные песчаные на связных песках.

3. Б. н. п. Масаны (южная граница заповедника) – 12 км до реактора.

Почвы: дерново-подзолистые слабодефлированные песчаные на мощных рыхлых песках.

На каждом участке опыт закладывался в трехкратной повторности с размещением площадок учетной площадью 1,4 м² на расстоянии не менее 10 см между ними. Перед посадкой на каждой площадке измерялась мощность дозы гамма-излучения (далее – МД) на высоте 1 м от поверхности почвы в 3-кратной повторности дозиметром-радиометром МКС–АТ6130 (Атомтех, Беларусь). Отбор проб почвы производили стандартным пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см с дерниной. После выполнения радиологических измерений почву вскапывали и на каждой площадке высаживали по 20 растений. Данные работы были выполнены 3–4 апреля 2020 г. В течение вегетационного сезона выполнялись работы по прополке и поливу растений мискантуса. Осенью отбирались сопряженные пробы почвы и биологического материала мискантуса. Пробы почвы и биологического материала подготавливали в соответствии с общепринятыми методиками. Удельную активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах определяли в лаборатории спектрометрии и радиохимии заповедника на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре МКС–АТ1315 (Атомтех, Беларусь). Ошибка измерений при этом не превышала 30 %.

С целью установления изменчивости (размаха варьирования) плотности загрязнения почвы и удельной активности в растительной массе были определены коэффициенты вариации К. Пирсона (V):

$$CV = \frac{S_x}{\bar{x}} \cdot 100 \%,$$

где S_x – среднее квадратическое отклонение для выборки;

$\bar{x}$ – средняя арифметическая из суммы частных или групповых средних.

Для статистической обработки данных использовалась программа пакет *Microsoft Office Excel*.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно источнику [33], климатические условия оказывают существенное влияние на накопление радионуклидов травами. Средняя многолетняя сумма осадков в условиях восточного Полесья составляет 650 мм, а за теплый период выпадает 300–400 мм осадков. В самые засушливые годы их количество может уменьшаться до 150–300 мм. Коэффициент увлажнения за теплый период часто снижается ниже 0,8, а испаряемость превышает количество осадков на 70–90 мм.

Вегетационный период Полесья наиболее длинный в пределах республики и составляет 192–205 дней, а период температур выше 10 °С – 151–160 дней. Вегетационный период характеризуется повышенными температурами воздуха и частым недостатком осадков. В этих условиях, неоднократно в течение вегетационного периода, влажность пахотного слоя почвы снижается до мертвых запасов (2–3 %). Термические условия и режим увлажнения предъявляют повышенные требования к возделываемым культурам. Они должны иметь высокую пластичность и устойчивость к засушливым условиям.

Для объективной оценки тепла и влагообеспеченности следует использовать интегральные показатели, которые, кроме температуры воздуха и атмосферных осадков, учитывали бы и другие ресурсы тепла и влаги. Такими показателями могут служить испаряемость, комплексно характеризующая теплоэнергетические ресурсы климата, и коэффициент природного увлажнения территории Ку. Значения испаряемости определяли по модифицированной Н. В. Данильченко формуле Н. Н. Иванова по среднедекадным значениям температур, относительной влажности воздуха и скорости ветра. Климатические условия анализируемого периода характеризовались следующими среднегодовыми параметрами коэффициента увлажнения: 2020 г. – 0,91; 2021 г. – 0,75; 2022 г. – 0,87; 2023 г. – 0,75.

На территории Беларуси при значениях ГТК (Селянинова) от 0,2 до 0,4 условия вегетационного периода характеризуются как сухие, от 0,4 до 0,7 – очень засушливые, от 0,7 до 1,0 – засушливые, от 1,0 до 1,3 – слабозасушливые, 1,3–1,6 – оптимальные и > 1,6 – влажные [33]. Данные показатели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Климатические показатели за период исследований (по данным научно-исследовательской станции «Масаны»)

Table 1

Climatic indicators for the research period (according to data from the Masany research station)

Год	Количество осадков, мм		Коэффициент увлажнения по Иванову		ГТК
	V–IX	год	V–IX	год	годовые значения
2020	385,7	622,1	0,95	0,91	1,36
2021	295,0	519,1	0,81	0,75	0,94
2022*	356,7	697,6	0,98	0,87	1,41
2023*	171,1	433,5	0,33	0,75	0,88

Примечание. *По данным метеостанции «Брагин».

Исходя из данных, приведенных в табл. 1, можно сделать следующие выводы: 2020 и 2022 гг. характеризуются оптимальными климатическими условиями, а 2021 и 2023 гг. выдались засушливыми в соответствии с принятой градацией. Однако не выявлено статистически значимого влияния погодных условий на параметры перехода радионуклидов из почвы в растения мискантуса.

В результате проведенного опыта были определены и рассчитаны значения удельной активности (Ау) биомассы, плотности загрязнения почвы (ПЗ) и коэффициенты перехода (КП) ^{137}Cs и ^{90}Sr (табл. 2).

Таблица 2

Параметры перехода радионуклидов в растения мискантуса

Table 2

Parameters of the transfer of radionuclides into miscanthus plants

Место положения делянок	Период	ПЗ почвы, Ки/км ²	Ау в биомассе мискантуса, Бк/кг	КП, Бк/кг: кБк/м ²	ПЗ почвы, Ки/км ²	Ау в биомассе мискантуса, Бк/кг	КП, Бк/кг: кБк/м ²
Б. н. п. Бабчин	Для ^{137}Cs				Для ^{90}Sr		
	2020	10,6	78,0	0,21	1,1	348,3	8,96
	2021	12,6	129,0	0,27	1,6	228,3	5,09
	2022	11,3	37,7	0,09	0,7	173,7	6,74
	2023	9,8	39,3	0,11	0,9	166,3	4,92
CV (коэффициент вариации)		0,31	0,66	–	0,6	0,37	–
Б. н. п. Дроньки	2020	5,9	265,7	1,16	2,3	686,3	7,79
	2021	8,3	304,0	0,98	3,2	573,0	4,87
	2022	5,8	233,0	1,09	1,8	554,0	8,46
	2023	6,2	506,5	1,80	2,4	764,5	9,45
CV (коэффициент вариации)		0,24	0,65		0,28	0,31	–
Б. н. п. Масаны	2020	72,2	256,0	0,10	30,7	2759,7	2,37
	2021	65,6	311,0	0,13	29,2	2514,0	2,33
	2022	66,5	129,0	0,05	30,4	1598,0	1,42
	2023	71,3	203,0	0,08	28,4	2118,0	2,02
CV (коэффициент вариации)		0,12	0,39	–	0,13	0,32	–

Из данных табл. 2 следует, что за исследуемый период приведенные данные характеризуются высокой степенью вариабельности. Для определения статистической достоверности был рассчитан коэффициент вариации (CV), который показывает степень изменчивости по отношению к среднему показателю выборки. Коэффициент вариации для данных объекта б. н. п. Масаны соответствует самым низким значениям, а по объектам б.н.п. Бабчин и б. н. п. Дроньки коэффициент значительно больше. Можно заметить, что для плотности загрязнения почвы по всем объектам коэффициент вариации ниже, чем для удельной активности в биомассе мискантуса.

Коэффициент перехода ^{137}Cs в биомассу мискантуса характеризуется невысоким значением на дерново-подзолистых песчаных почвах в б. н. п. Масаны, значения изменяются от 0,05 до 0,13 Бк/кг : кБк/м². Однако коэффициент перехода ^{137}Cs значительно возрастает на дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных почвах в б.н.п. Дроньки, значения изменяются от 0,98 до 1,8 Бк/кг : кБк/м². Коэффициент перехода ^{137}Cs в биомассу мискантуса в б. н. п. Бабчин характеризуется невысоким промежуточным значением на дерново-подзолистых глееватых почвах, значения изменяются от 0,09 до 0,27 Бк/кг : кБк/м². Существенные изменения значений коэффициента перехода объясняются степенью гидроморфизма почв, с увеличением гидроморфизма повышаются и параметры перехода радионуклидов в растения.

Анализ данных параметров перехода ^{90}Sr из почвы биомассу мискантуса свидетельствует, что тенденции взаимосвязи гидроморфизма почв и коэффициентов переход сохраняются. Так, в б. н. п. Масаны наблюдаются самые низкие значения КП (среднее значение за период исследований 2,03 Бк/кг : кБк/м²), несмотря на самое большое значение плотности загрязнения почвы. Параметры перехода ^{90}Sr на делянках в б. н. п. Дроньки характеризуются довольно высокими значениями и высокой степенью вариабельности, изменения значению колеблются от 4,87 до 9,45 Бк/кг:кБк/м². Для дерново-подзолистых глееватых почв находящихся в б. н. п. Бабчин, характерно изменение коэффициентов перехода от 4,92 до 8,96 Бк/кг : кБк/м².

В Республике Беларусь отсутствуют допустимые уровни содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в растительном сырье для мискантуса гигантского¹. Для вероятной оценки возможности его использования в непищевых целях приведем некоторые допустимые нормативы содержания ^{137}Cs , принятые в Беларуси для древесины (РДУ/ЛХ-2001): древесное технологическое сырье – 1480 Бк/кг; топливо древесное – 740 Бк/кг; прочая непищевая продукция лесного хозяйства – 1850 Бк/кг; топливо древесное, контрольный уровень для котельных мощностью >0,1 МВт – 200 Бк/кг; щепы топливная²– 300 Бк/кг (ТУ ВУ 100145188.003-2009). Содержание ^{90}Sr в лесопроductии не нормируется [34].

При прогнозе удельной активности цезия-137 в биомассе мискантуса учитывались рассчитанные коэффициенты перехода. В наших оценках удельная активность ^{137}Cs в растительном сырье, где возможно производство продукции из мискантуса сорта «Дружба-Автюки» в пределах РДУ/ЛХ-2001 и ТУ ВУ 100145188.003-2009, принималась на уровне минимального значения за годы исследований³. Результат отражен в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что получение нормативно чистой биомассы мискантуса гигантского для производства древесного технического сырья, топлива древесного и прочей непищевой продукции лесного хозяйства возможно без ограничений по плотности загрязнения Cs^{137} на дерново-подзолистых песчаных и дерново-подзолистых глееватых почвах (б. н. п. Масаны и б. н. п. Бабчин), однако в условиях повышенной степени гидроморфизма на дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных почвах (б.н.п. Дроньки) возникают ограничения: 27,85 Ки/км² – для прочей непищевой продукции лесного хозяйства; 22,3 Ки/км² – для древесного технического сырья; 11,1 Ки/км² – для топлива древесного.

В условиях ужесточения радиологических требований при возделывании мискантуса на щепу топливную и топливо древесное (контрольный уровень для котельных мощностью >0,1 МВт) нормативно чистую биомассу возможно получать без ограничений по плотности загрязнения ^{137}Cs на дерново-подзолистых песчаных почвах. Однако на дерново-подзолистых глееватых почвах возникают ограничения: 29,9 Ки/км² – для щепы топливной; 19,9 Ки/км² – для топлива древесного (контрольный уровень для котельных мощностью > 0,1 МВт). Для производства нормативно чистой биомассы мискантуса на дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных почвах есть ограничения по плотности загрязнения Cs^{137} : 4,5 Ки/км² – для щепы топливной; 3,0 Ки/км² – для топлива древесного (контрольный уровень для котельных мощностью >0,1 МВт).

¹РДУ/ЛХ-2001: ГН 2.6.1.10-1-01-2001. Республиканские допустимые уровни содержания цезия-137 в древесине, продукции из древесины и древесных материалов и прочей непищевой продукции лесного хозяйства. Минск, 2000. 5 с.

²ТУ ВУ 100145188.003-2009 Щепы топливная. Технические условия. Минск, 2009.

³Там же.

Таблица 3

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в биомассу мискантуса гигантского и прогнозные значения предельно допустимой плотности загрязнения почвы, Ки/км²

Table 3

Coefficients of transition of ^{137}Cs into the biomass of giant miscanthus and predicted values of the maximum permissible density of soil contamination, Ci/km²

Объект	2020	2021	2022	2023	Среднее значение
Бабчин(КП)	0,21	0,27	0,09	0,11	0,17
Масаны(КП)	0,10	0,13	0,05	0,08	0,09
Дроньки(КП)	1,16	0,98	1,09	1,80	1,26
Прочая непищевая продукция лесного хозяйства – 1850 Бк/кг					
Бабчин	238,18	184,35	531,30	462,52	292,67
Масаны	521,09	389,97	953,37	649,66	565,65
Дроньки	42,98	50,77	45,94	27,85	39,75
Древесное техническое сырье, 1480 Бк/кг					
Бабчин	190,5	147,5	425,0	370,0	234,1
Масаны	416,9	312,0	762,7	519,7	452,5
Дроньки	34,4	40,6	36,8	22,3	31,8
Топливо древесное, 740 Бк/кг					
Бабчин	95,3	73,7	212,5	185,0	117,1
Масаны	208,4	156,0	381,3	259,9	226,3
Дроньки	17,2	20,3	18,4	11,1	15,9
Щепа топливная – 300 Бк/кг					
Бабчин	38,6	29,9	86,2	75,0	47,5
Масаны	84,5	63,2	154,6	105,3	91,7
Дроньки	7,0	8,2	7,5	4,5	6,4
Топливо др., контрольный уровень для котельных мощностью >0,1 МВт – 200 Бк/кг					
Бабчин	25,7	19,9	57,4	50,0	31,6
Масаны	56,3	42,2	103,1	70,2	61,2
Дроньки	4,6	5,5	5,0	3,0	4,3

Заключение

Полученные прогнозные данные предельно допустимых плотностей загрязнения почвы Cs^{137} при возделывании мискантуса гигантского позволяют сделать вывод о перспективности выращивания на загрязненных радионуклидами землях.

По итогам проделанной исследовательской работы был сделан вывод: получение нормативно чистой биомассы мискантуса гигантского сорта «Дружба-Автюки» для производства древесного технического сырья, топлива древесного и прочей непищевой продукции лесного хозяйства возможно без ограничений по плотности загрязнения Cs^{137} на дерново-подзолистых песчаных и дерново-подзолистых глееватых почвах. Однако в условиях повышенной степени гидроморфизма на дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных почвах возникают ограничения по плотности загрязнения почвы Cs^{137} : 27,85 Ки/км² –

для прочей непищевой продукции лесного хозяйства; 22,3 Ки/км² – для древесного технического сырья; 11,1 Ки/км² – для топлива древесного. Для подтверждения полученных результатов требуется проведение и углубление исследований по накоплению ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr мискантусом при разной плотности загрязнения данными радионуклидами и трансурановыми радионуклидами, разных уровнях минерального питания, различных почвенно-гидрологических условиях.

Библиографические ссылки

1. Беларусь и Чернобыль: 34 года спустя. В: Информационно-аналитические материалы. Минск: ИВЦ Минфина; 2020. 38 с.
2. Цыбулько НН Радиоактивное загрязнение территории Беларуси: динамика и современное состояние. *Экологический вестник*. 2012;2(1):80–85.
3. Величко ВВ, Уласевич МВ Анализ эффективности использования биогазовых установок. В: Басалай ИА, редактор. Сборник материалов 73-й студенческой научно-технической конференции. Минск : БНТУ; 2017. с. 49–55.
4. Лосева ЛА. Возделывание энергетических травянистых растений в условиях восточной части Беларуси. В: Маковская НВ, редактор. Проблемы устойчивого развития регионов Республики Беларусь и сопредельных стран. Сборник научных статей XI международной научно-практической интернет-конференции. Могилев: МГУ им. А. А. Кулешова; 2022. с. 8–11.
5. Шкляр АХ. Климатические ресурсы Белоруссии и использование их в сельском хозяйстве. Минск: Вышэйшая школа; 1973. 432 с.
6. Купцов НС, Попов ЕГ. Энергоплантации. Справочное пособие по использованию энергетических растений. Минск: Тэхналогія; 2015. 128 с.
7. Nijssen M, Smeets E, Stehfest E, et al. An evaluation of the global potential of bioenergy production on degraded lands. *Global Change Biology Bioenergy*. 2012;4(2):130–147.
8. Figala J, Vranova V, Rejsek K, Formanek P. Giant miscanthus (*Miscanthus x Giganteus* Greef et Deu.) – A promising plant for soil remediation: A Mini Review. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2015;63(6):2241–2246.
9. Wang C, Kong Y, Hu R, Zhou G. Miscanthus: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production. *Global Change Biology Bioenergy*. 2020;13(1):1–12.
10. Зинченко ВА, Яшин М. Энергия мискантуса. *Леспроминформ*. 2011;6(80):134–140.
11. Капустянчик СЮ, Бурмакина НВ, Якименко ВН. Оценка эколого-агрохимического состояния агроценоза с многолетним выращиванием мискантуса в Западной Сибири. *Агрохимия*. 2020;9:65–73.
12. Гущина ВА, Остробородова НИ. Формирование биомассы мискантуса гигантского в лесостепи Среднего Поволжья. *Нива Поволжья*. 2019;3(52):81–87.
13. Капустянчик СЮ, Якименко ВН. Мискантус – перспективная сырьевая, энергетическая и фитомелиоративная культура (литературный обзор). *Почвы и окружающая среда*. 2020;3(3):126.
14. Yan J, Chen W, Luo F, et al. Variability and adaptability of *Miscanthus* species evaluated for energy crop domestication. *Global Change Biology Bioenergy*. 2012;4(1):49–60.
15. Hodkinson TR, Chase MW, Takahashi C, et al. The use of dna sequencing (ITS and trnL-F), AFLP, and fluorescent in situ hybridization to study allopolyploid *Miscanthus* (Poaceae). *American Journal of Botany*. 2002;89(2):279–286.
16. Bonin CL, Mutegi E, Chang H, Heaton EA. Improved feedstock option or invasive risk? Comparing establishment and productivity of fertile *miscanthus giganteus* to *miscanthus sinensis*. *Bioenergy Research*. 2017;10:317–328.
17. Бармет ЛВ, Дзюбенко ЕА. Прогнозирование областей культивирования *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae) на территории Российской Федерации. *Vavilova*. 2019;2(4):35–49.
18. Булаткин ГА. Исследование эффективности энергетических культур на примере мискантуса китайского (*Miscanthus sinensis* Anderss). *Экологический вестник России*. 2018;10:36–41.
19. Сакович ГВ, Скиба ЕА, Гладышева ЕК, Голубев ДС, Будаева ВВ. Мискантус – сырье для производства бактериальной наноцеллюлозы. *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2020;495:35–38.
20. Гущина ВА, Остробородова НИ. Формирование биомассы мискантуса гигантского в лесостепи Среднего Поволжья. *Нива Поволжья*. 2019;3(52):81–87.
21. Дорогина ОВ, Васильева ОЮ, Нуждина НС и др. Формирование и изучение коллекционного генофонда ресурсных видов рода *Miscanthus* Anderss. в условиях лесостепи Западной Сибири. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(7):926–932.
22. Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Myrsini C. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*. 2003;25(4):335–361.
23. Blanco-Canqui H, Gilley J, Eisenhauer D, Boldt A. Soil carbon accumulation under switchgrass barriers. *Agronomy Journal*. 2014;106(6):2185–2192.
24. Robertson AD, Davies Ch A, Smith P, et al. Carbon inputs from *Miscanthus* displace older soil organic carbon without inducing priming. *BioEnergy Research*. 2017;10:86–102.
25. Капустянчик СЮ, Данилова АА, Лихенко ИЕ. *Miscanthus sacchariflorus* в Сибири. Параметры продукционного процесса, динамика биофильных элементов. *Сельскохозяйственная биология*. 2021;1:25–33.
26. Himken M, Lammel J, Neukirchen D, et al. Cultivation of *Miscanthus* under West European conditions: seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization. *Plant and Soil*. 1997;189:117–126.
27. Lewandowski I, Kicherer A. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. *European Journal of Agronomy*. 1997;6(3–4):163–177.
28. Lewandowski I, Clifton-Brown JC, Scurlock JMO. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*. 2000;19(4):209–227.

29. Naidu SL, Moose SP, Al-Shoaibi AK, et al. Gold tolerance in *Miscanthus x giganteus*: adaptation in amounts and sequence of C4 photosynthetic enzymes. *Plant Physiology*. 2003;132:1688–1697.
30. Heaton EA, Flavell RB, Mascia PN, et al. Herbaceous energy crop development: recent progress and future prospects. *Current Opinion in Biotechnology*. 2008;19(3):202–209.
31. Доспехов БА. *Методика полевого опыта*. Москва: Агропромиздат; 1985. 351 с.
32. Мельник ВИ, и др. Агроклиматическое зонирование территории Беларуси с учетом изменения климата. Минск – Женева: [б. и.]; 2017. с. 6–8.
33. Цыбулько НН, Шашко АВ, Жукова ИИ, Евсеев ЕБ. Влияние азотных и калийных удобрений на накопление ^{137}Cs многолетними бобово-злаковыми и злаковыми травами на торфяных почвах. *Мелиорация*. 2021;4(98):35–45.
34. Евсеев ЕБ, Кудин МВ, Гарбарук ДК, Воронцовская АН, Драгун АВ. Перспективная энергетическая культура *Miscanthus giganteus* на загрязненных радионуклидами землях. *Радиобиология и экологическая безопасность – 2024. Сборник научных статей по материалам международной научной конференции*. Гомель: Институт радиобиологии НАН Беларуси; 2024. с. 85–88.

References

1. Belarus' i Chernobyl': 34 goda spustya. *Informacionno-analiticheskie materialy* [Belarus and Chernobyl: 34 years later. Information and analytical materials]. Минск: IVC Minfina; 2020. 38 p. Russian.
2. Cybul'ko NN. Radioaktivnoe zagryaznenie territorii Belarusi: dinamika i sovremennoe sostoyanie [Radioactive contamination of the territory of Belarus: dynamics and current state]. *Ekologicheskij vestnik BGU*. 2012;2(1):80–85. Russian.
3. Velichko VV, Ulasevich MV. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya biogazovykh ustanovok [Analysis of the efficiency of using biogas plants]. In: Basalaj IA, editor. *Sbornik materialov 73-j studencheskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Минск: BNTU; 2017. p. 49–55. Russian.
4. Loseva LA. Vozdeleyvanie energeticheskikh travyanistykh rastenij v usloviyah vostochnoj chasti Belarusi [Cultivation of energy herbaceous plants in the conditions of the eastern part of Belarus]. In: Makovskaya NV, editor. *Problemy ustojchivogo razvitiya regionov Respubliki Belarus' i sopredel'nyh stran: sbornik nauchnykh statej HI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy internet-konferencii*. Mogilev: MGU imeni A. A. Kuleshova; 2022. p. 8–11. Russian.
5. Shklyar AH. Klimaticheskie resursy Belorussii i ispol'zovanie ih v sel'skom hozyajstve [Climatic resources of Belarus and their utilization in agriculture]. Минск: Vyshejschaya shkola; 1973. 432 p. Russian.
6. Kupcov NS, Popov EG. *Energoplantacii. Spravochnoe posobie po ispol'zovaniyu energeticheskikh rastenij* [Energoplantations. Reference manual on the use of energy plants]. Минск: Tekhnologiya; 2015. 128 p. Russian.
7. Nijsen M, Smeets E, Stehfest E et al. An evaluation of the global potential of bioenergy production on degraded lands. *Global Change Biology Bioenergy*. 2012;4(2):130–147.
8. Figala J, Vranova V, Rejsek K, Formanek P. Giant miscanthus (*Miscanthus x Giganteus* Greef et Deu.) – A promising plant for soil remediation: A Mini Review. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2015;63(6):2241–2246.
9. Wang C, Kong Y, Hu R, Zhou G. Miscanthus: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production. *Global Change Biology Bioenergy*. 2020;13(1):1–12.
10. Zinchenko VA, Yashin M. *Energiya miskantusa* [The energy of miscanthus]. *Lesprominform*. 2011;6(80):134–140. Russian.
11. Kapustyanchik SY, Burmakina NV, Yakimenko VN. *Ocenka ekologo-agrohimicheskogo sostoyaniya agrocenoza s mnogoletnim vyrashchivaniem miskantusa v Zapadnoj Sibiri* [Assessment of ecological and agrochemical condition of agrocenosis with perennial cultivation of miscanthus in Western Siberia]. *Agrohimiya*. 2020;9:65–73. Russian.
12. Gushchina VA, Ostroborodova NI. *Formirovanie biomassy miskantusa gigantskogo v lesostepi Srednego Povolzh'ya* [Formation of biomass of *Miscanthus giganteus* in the forest-steppe of the Middle Volga region]. *Niva Povolzh'ya*. 2019;3(52):81–87. Russian.
13. Kapustyanchik SY, Yakimenko VN. *Miskantus – perspektivnaya syr'evaya, energeticheskaya i fitomeliorativnaya kul'tura (literaturnyj obzor)* [Miscanthus – promising raw material, energy and phytomeliorative crop (literature review)]. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*. 2020;3(3):126. Russian.
14. Yan J, Chen W, Luo F, et al. Variability and adaptability of *Miscanthus* species evaluated for energy crop domestication. *Global Change Biology Bioenergy*. 2012;4(1):49–60.
15. Hodkinson TR, Chase MW, Takahashi C, et al. The use of dna sequencing (ITS and trnL-F), AFLP, and fluorescent in situ hybridization to study allopolyploid *Miscanthus* (Poaceae). *American Journal of Botany*. 2002;89(2):279–286.
16. Bonin CL, Mutegi E, Chang H, Heaton EA. Improved feedstock option or invasive risk? Comparing establishment and productivity of fertile *Miscanthus giganteus* to *Miscanthus sinensis*. *Bioenergy Research*. 2017;10:317–328.
17. Bagmet LV, Dzyubenko EA. *Prognozirovaniye oblastej kul'tivirovaniya Miscanthus sacchariflorus (Poaceae) na territorii Rossijskoj Federacii* [Predicting areas of *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae) cultivation on the territory of the Russian Federation]. *Vavilova*. 2019;2(4):35–49. Russian.
18. Bulatkin GA. *Issledovanie effektivnosti energeticheskikh kul'tur na primere miskantusa kitajskogo (Miscanthus sinensis Anderss)* [Study of the efficiency of energy crops on the example of Chinese *Miscanthus sinensis* Anderss (*Miscanthus sinensis* Anderss)]. *Ekologicheskij vestnik Rossii*. 2018;10:36–41. Russian.
19. Sakovich GV, Skiba EA, Gladysheva EK, Golubev DS, Budaeva VV. *Miskantus – syr'e dlya proizvodstva bakterial'noj nanocellyulozy* [Miscanthus – raw material for the production of bacterial nanocellulose]. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Himiya, nauki o materialah*. 2020;495:35–38. Russian.
20. Gushchina VA, Ostroborodova NI. *Formirovanie biomassy miskantusa gigantskogo v lesostepi Srednego Povolzh'ya* [Formation of biomass of *Miscanthus giganteus* in the forest-steppe of the Middle Volga region.]. *Niva Povolzh'ya*. 2019;3(52):81–87. Russian.
21. Dorogina OV, Vasil'eva OYu, Nuzhdina NS, et al. *Formirovanie i izuchenie kollekcionnogo genofonda resursnykh vidov roda Miscanthus Anderss. v usloviyah lesostepi Zapadnoj Sibiri* [Formation and study of the collection gene pool of resource species of

the genus *Miscanthus* Anderss. in the conditions of the forest-steppe of Western Siberia]. *Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii*. 2019;23(7):926–932. Russian.

22. Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Myrsini C. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*. 2003;25(4):335–361.

23. Blanco-Canqui H, Gilley J, Eisenhauer D, Boldt A. Soil carbon accumulation under switchgrass barriers. *Agronomy Journal*. 2014;106(6):2185–2192.

24. Robertson AD, Davies Ch A, Smith P, et al. Carbon inputs from *Miscanthus* displace older soil organic carbon without inducing priming. *BioEnergy Research*. 2017;10:86–102.

25. Kapustyanchik SY, Danilova AA, Lihenko IE. *Miscanthus sacchariflorus* v Sibiri. Parametry produkcionnogo processa, dinamika biofil'nyh elementov [Miscanthus sacchariflorus in Siberia. Parameters of the production process, dynamics of biophilic elements]. *Sel'skohozyajstvennaya biologiya*. 2021;1:25–33. Russian.

26. Himken M, Lammel J, Neukirchen D, et al. Cultivation of *Miscanthus* under West European conditions: seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization. *Plant and Soil*. 1997;189:117–126.

27. Lewandowski I, Kicherer A. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. *European Journal of Agronomy*. 1997;6(3–4):163–177.

28. Lewandowski I, Clifton-Brown JC, Scurlock JMO. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*. 2000;19(4):209–227.

29. Naidu SL, Moose SP, Al-Shoaibi AK, et al. Gold tolerance in *Miscanthus x giganteus*: adaptation in amounts and sequence of C4 photosynthetic enzymes. *PlantPhysiology*. 2003;132:1688–1697.

30. Heaton EA, Flavell RB, Mascia PN, et al. Herbaceous energy crop development: recent progress and future prospects. *Current Opinion in Biotechnology*. 2008;19(3):202–209.

31. Dospikhov BA. *Metodika polevogo opyta* [Methodology of field experience]. Moskva: Agropromizdat;1985. 351 p. Russian.

32. Mel'nik VI, et al. *Agroklimaticheskoe zonirowanie territorii Belarusi s uchetom izmeneniya klimata* [Agroclimatic zoning of the territory of Belarus taking into account climate change]. Minsk – Zheneva: [publisher unknown]; 2017. p. 6–8. Russian.

33. Cybul'ko NN, Shashko AV, Zhukova II, Evseev EB. *Vliyanie azotnyh i kalijnyh udobrenij na nakoplenie ¹³⁷Cs mnogoletnimi bobovo-zlakovymi i zlakovymi travami na torfyanyh pochvah* [Effect of nitrogen and potassium fertilizers on ¹³⁷Cs accumulation by perennial legume-grass and cereal grasses on peat soils]. *Melioraciya*. 2021;4(98):35–45. Russian.

34. Evseev EB, Kudin MV, Garbaruk DK, Voroneckaya AN, Dragun AV. *Perspektivnaya energeticheskaya kul'tura miscanthus giganteus na zagryaznennyh radionuklidami zemlyah. Radiobiologiya i ekologicheskaya bezopasnost' – 2024* [Prospective energy crop miscanthus giganteus on radionuclide-contaminated lands]. In: *Sbornik nauchnyh statej po materialam mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. Gomel': Institut radiobiologii NAN Belarusi; 2024. p. 85–88. Russian.

Статья поступила в редколлегию 27.08.2024.

Received by editorial board 27.08.2024.

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Калиниченко С. А., Марченко Ю. Д., Белаи В. Е.</i> Тенденции изменения климата в белорусском секторе ближней зоны Чернобыльской АЭС.....	4
<i>Голубев А. П., Улащик Е. А., Бодиловская О. А.</i> Моделирование роста инвазивного вида речных раков <i>Procambarus virginalis</i> (Decapoda, Astacidea) в различных температурных условиях	18

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Шабалева М. А., Деменковец Н. Н., Ненашев Р. А.</i> Оценка динамики индивидуальных доз внутреннего облучения ПГРЭЗ работников Полесского радиационно-экологического заповедника	35
<i>Кудин М. В., Евсеев Е. Б., Гарбарук Д. К., Воронецкая А. Н., Драгун А. В.</i> Параметры перехода радионуклидов в биомассу мискантуса гигантского на землях зоны отчуждения Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.....	44
<i>Емельяненко Е. В., Штуро И. А., Петкевич М. Н.</i> Неопределенности вычисления геометрических параметров очагов накопления радиофармацевтического препарата на диагностических изображениях при проведении предлучевой подготовки к радиохирургии.....	55
<i>Журавков В. В., Тонконогов Б. А., Герменчук М. Г., Цыбулько Н. Н.</i> Web-ориентированная информационно-аналитическая система для совершенствования мероприятий по радиационной защите населения и объектов окружающей среды на различных региональных уровнях	61

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Пухтеева И. В., Герасимович Н. В., Гиль М. Д.</i> Комбинированное действие дексаметазона и перекиси водорода на структурное состояние плазматических мембран тимоцитов экспериментальных животных	74
<i>Величко А. В., Нижегородова Д. Б., Назаренко Е. М., Музыченко Б. А., Зафранская М. М.</i> Микроокружение опухоли: систематический обзор	85

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Головатый С. Е., Савченко С. В., Самусик Е. А., Сеницкая М. Л.</i> Пространственно-временные особенности содержания сульфатов и нитратов в почвах урбанизированных территорий	99
--	----

CONTENTS

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Kalinichenko S. A., Marchenko Yu. D., Belash V. E.</i> Climate change trends in the belarusian sector of exclusion zone of the Chernobyl NPP.....	4
<i>Golubev A. P., Ulashchyk E. A., Bodilovskaya O. A.</i> Modeling the growth of the invasive river crayfish species <i>Procambarus virginalis</i> (Decapoda, Astacidea) under different temperature conditions	18

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Shabaleva M. A., Demenkovec N. N., Nenashev R. A.</i> Assessment of the dynamics of individualized internal exposure dose irradiation of PSRER workers of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve	35
<i>Kudin M. V., Evseev E. B., Garbaruk D. K., Voronetskaya A. N., Dragun A. V.</i> Parameters of the transition of radionuclides into the biomass of <i>miscanthus giganteus</i> on the lands of the exclusion zone of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve	44
<i>Emelianenko E. V., Shturo I. A., Piatkevich M. N.</i> Uncertainties in calculating the geometric parameters of radiopharmaceutical accumulation lesion on diagnostic images during pre-radiation preparation for radiosurgery	55
<i>Zhuravkov V. V., Tonkonogov B. A., Germenchuk M. G., Tsybulka M. M.</i> Web-oriented information and analytical system for improving complex of radiation protection of population and environmental objects at various regional levels	61

MEDICAL ECOLOGY

<i>Puhteeva I. V., Gerasimovich N. V., Gil M. D.</i> The combined effect of dexamethasone and hydrogen peroxide on the structural state of the plasma membranes of thymocytes of experimental animals.....	74
<i>Vialichka A. V., Nizheharodava D. B., Nazaranka E. M., Muzychenka B. A., Zafranskaya M. M.</i> Tumor microenvironment: systematic review	85

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Golovaty S. E., Savchenko S. V., Samusik E. A., Sinitskaya M. L.</i> Spatiotemporal peculiarities of sulfate and nitrate concentration in soils of urbanized areas	99
---	----