



БЕЛОРУССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЭКОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

ECOLOGY

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

3

2023

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Главный редактор** **МАСКЕВИЧ С. А.** – доктор физико-математических наук, профессор; директор Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
E-mail: direktor@iseu.by
- Заместитель главного редактора** **ГЕРМЕНЧУК М. Г.** – кандидат технических наук, доцент; заместитель директора по научной работе Международного государственного экологического института 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.
- Либератос 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** **MASKEVICH S. A.**, doctor of science (physics and mathematics), professor; director of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus.
E-mail: direktor@iseu.by
- Deputy editor-in-chief** **GERMENCHUK M. G.**, PhD (engineering), docent; deputy director for research of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus.
E-mail: 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

- Batyan A. N.* International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
- Golovaty S. E.* International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
- Golubev A. P.* International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
- Grichik V. V.* Belarusian State University, Minsk, Belarus
- Dardynskaya I. V.* Great Lakes Center for Occupational and Environmental Safety and Health, Chicago, USA.
- Dziatkovskaya E. N.* Institute of Education Development Strategy of the Russian Academy of Education, Moscow, Russia.
- Drozdovitch V. V.* Radiation Epidemiology Branch, DCEG (Division of Cancer Epidemiology and Genetics), National Cancer Institute, Bethesda MD.
- Zafranskaya M. M.* International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
- Kilchevsky A. V.* National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
- Konoplev A. V.* Environmental Radioactivity Institute, Fukushima University, Japan.
- Korovin Y. A.* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia.
- Lengfelder E.* Otto Hug Radiological Institute for Health and Environment, Munich, Germany.
- Lyberatos G.* Athens Technical University, Athens, Greece.
- Linge I. I.* Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
- Lukashenko S. N.* Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia.
- Loginov V. F.* National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
- Medvedev S. V.* The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
- Nabiev I. R.* University of Reims Champagne-Ardenne (URCA), France.
- Stepanov S. A.* International Independent Ecological and Political University, Moscow, Russia.
- Stozharov A. N.* Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus.
- Tarutin I. G.* N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, Minsk, Belarus.

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 581.524.1:581.142+631.879.4

ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЭКСТРАКТОВ ИЗ КОМПСТИРОВАННЫХ ЛИСТЬЕВ *ACER NEGUNDO* L. И *ROBINIA PSEUDOACACIA* L. НА ПРОРОСТКАХ ТЕСТ-КУЛЬТУР

М. Н. ЯХНОВЕЦ^{1), 2)}, Е. О. ЮРЧЕНКО³⁾

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,

Белорусский государственный университет,

²⁾Полесский государственный университет,

ул. Днепровской флотилии, 23, 225710, г. Пинск, Беларусь,

³⁾Белостокский политехнический университет,

ул. Вейска, 45А, 15-351, Белосток, Польша

Клен ясенелистный и робиния лжеакация являются инвазионными древесными видами, требующими мер сдерживания их распространения. При механическом уничтожении рассматривается возможность использования надземной фитомассы данных растений в качестве удобрения после компостирования. Для подобного применения необходимо оценить аллелопатические эффекты компоста на другие растения. Аэробное пассивное компостирование листьев клена

Образец цитирования:

Яхновец МН, Юрченко ЕО. Оценка биологической активности экстрактов из компстированных листьев *Acer negundo* L. и *Robinia pseudoacacia* L. на проростках тест-культур. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;3:4–15.

<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-4-15>

For citation:

Yakhnovets MN, Yurchenko EO. Evaluation of the biological activity of extracts from *Acer negundo* L. and *Robinia pseudoacacia* L. composted leaves on seedlings of test cultures. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;3:4–15. Russian.

<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-4-15>

Авторы:

Максим Николаевич Яхновец – аспирант кафедры общей биологии и генетики¹; преподаватель-стажер кафедры ландшафтного проектирования².

Юрченко Евгений Олегович – доцент кафедры лесопользования и лесоразведения.

Authors:

Maksim N. Yakhnovets, postgraduate student at the department of general biology and genetics^a; trainee teacher at the department of landscape design^b.

maksim.yakhnovets@gmail.com

Eugene O. Yurchenko, associate professor at the department of silviculture and forest utilization.

yauheni.yurchanka@pb.edu.pl

и робинии проводилось в течение 10 мес. (с сентября по июль) под открытым небом. Действие водных экстрактов компоста тестировалось *in vitro* на прорастающих семенах *Lepidium sativum*, *Raphanus sativus* и *Daucus carota*; учитывался процент проросших семян, длина корешка и гипокотыля проростка при концентрациях экстракта в пересчете на сухую массу 5, 10, 50 и 100 г/л с контролем на дистиллированной воде. Вторым контролем были водные экстракты из высушенных зеленых листьев *A. negundo* и *R. pseudoacacia*, то есть из некомпостированной фитомассы. Указанное одногодичное компостирование листьев *A. negundo* позволяет значительно снизить фитотоксичность данной фитомассы. В частности, на фоне экстракта 50 г/л прорастание семян моркови составляло 3,7 % для некомпостированных листьев и 112 % к контролю для компоста. Экстракт из компостированных листьев *R. pseudoacacia* показал неизменность или усиление ингибирующих аллелопатических свойств по сравнению с экстрактом из некомпостированных листьев. Экстракты из компоста *R. pseudoacacia* демонстрировали увеличение ингибирующего действия на развитие проростков по мере увеличения концентрации от 5 до 100 г/л. Для экстрактов из компоста *A. negundo* такая закономерность слабо прослеживалась. В отдельных случаях вытяжки из компоста имели стимулирующий эффект на развитие проростков: экстракты из клена и робинии 5 г/л вызывали удлинение корешка у проростков редиса в 1,7–1,9 раза; экстракты из клена 5–50 г/л – в 1,3–1,9 раза; экстракты из робинии 5 и 10 г/л – в 1,4 раза и аналогичный экстракт 10 г/л вызывал удлинение гипокотыля у кресс-салата в 1,3 раза. Три тест-культуры показали разную чувствительность к воздействию веществ компоста. В частности, экстракт из *A. negundo* оказывал ингибирующее воздействие на длину корешка кресс-салата во всех вариантах, тогда как для редиса выявлен только нейтральный и стимулирующий эффекты; тот же экстракт стимулировал развитие гипокотыля только у редиса, а ингибировал только у кресс-салата. Экстракт из компоста *R. pseudoacacia* 50 г/л снижал всхожесть кресс-салата до 0 %, а редиса – до 58,6 %.

Ключевые слова: аллелопатия; биотестирование; древесные сорные растения; мульча; овощные культуры.

EVALUATION OF THE BIOLOGICAL ACTIVITY OF EXTRACTS FROM ACER NEGUNDO L. AND ROBINIA PSEUDOACACIA L. COMPOSTED LEAVES ON SEEDLINGS OF TEST CULTURES

M. N. YAKHNOVETS^{a,b}, E. O. YURCHENKO^c

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

^bPolessky State University,

23 Dniaproŭskaj ŋatyl'ii Street, Pinsk 225710, Belarus

^cBiałystok University of Technology,

45A Wiejska Street, Białystok 15-351, Poland

Corresponding author: M. N. Yakhnovets (maksim.yakhnovets@gmail.com)

Ash-leaved maple and black locust are invasive woody species that require the measures for their spread control. In the case of mechanical elimination of these plants, the possibility of using their phytomass as a fertilizer after composting is considered. For such kind of application, it is necessary to evaluate the allelopathic effects of the phytomass on other plants. Aerobic passive composting of *A. negundo* and *R. pseudoacacia* leaves was carried out outdoor during 10 month (from September to July). In the article, the activity of compost water extracts was tested *in vitro* on germinating seeds of *Lepidium sativum*, *Raphanus sativus*, and *Daucus carota*; the percentage of germinated seeds, the length of the root and hypocotyl were measured, at concentrations of the extract 5, 10, 50, and 100 g/l of dry powdered composted leaves, with control on distilled water. The second control was the water extracts from dried green leaves of *A. negundo* and *R. pseudoacacia*, i.e. from non-composted phytomass. The composting process described above led to a significant decrease of allelopathic inhibition effect of *A. negundo* composted leaves compared to non-composted ones. In particular, 3,7 % of carrot seeds germinated on extract (50 g/l) from non-composted leaves and 112 % to control on extract from composted ones. The extracts from compost of *R. pseudoacacia* demonstrated near unchanged or increased allelopathic inhibition properties compared to non-composted leaves. Moreover, extracts from *R. pseudoacacia* compost showed the increase of inhibition properties on seedlings, when their concentration increased from 5 to 100 g/l. Such regularity was little pronounced for extracts from *A. negundo* compost. In several cases, the extracts from compost had stimulating effect: from *A. negundo* and *R. pseudoacacia*, 5 g/l, provoked 1.7–1.9 times elongation of root in radish seedlings; from *A. negundo*, 5–50 g/l, stimulated 1.3–1.9 times elongation of hypocotyl in radish; from *R. pseudoacacia*, 5 and 10 g/l, led to 1.4 times elongation of hypocotyl in radish; from *R. pseudoacacia*, 10 g/l, stimulated 1.3 times elongation of hypocotyl in watercress. Three test cultures involved in this research demonstrated different sensitivity to the same compost extracts. E.g., *A. negundo* extract inhibited the elongation of roots in watercress seedlings, whereas it had neutral or stimulating effect on radish. The same extract stimulated the development of hypocotyl in radish only, and inhibited in watercress only. Extract from *R. pseudoacacia* compost, 50 g/l, decreased the germination rate to 0% for watercress, but to 58.6 % in radish.

Keywords: allelopathy; biotesting; mulch; vegetable cultures; wooden weeds.

Введение

Распространение инвазионных видов растений (видов-агрессоров) – это одна из глобальных проблем современности. Фитоинвазии не только изменяют флору и растительность различных территорий, но и влияют на состояние почв, гидрологический режим, круговорот химических элементов [1–3]. В Республике Беларусь среди древесных инвазионных видов в наибольшей степени прогрессируют клен ясенелистный (*Acer negundo* L., известный под названием *Negundo aceroides* Moench) и робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.) [4; 5]. В различных странах эти деревья применялись для создания защитных и декоративных насаждений. Затем они натурализовались во многих местах интродукции.

Acer negundo первоначально произрастал в умеренной части Северной Америки [6], но затем его инвазия стала проблемой почти по всей умеренной Евразии, от Западной Европы до Приморья [7–10]. *Robinia pseudoacacia* имела первичный ареал в юго-восточной части Северной Америки [11], впоследствии натурализовалась и стала видом-агрессором в Европе, Азии, Южной Америке, Южной Африке, Австралии [12; 13].

Одним из методов борьбы с инвазией или мерой сдерживания распространения древесных инвазионных видов является низкая срезка растущей надземной части для истощения корневой системы [1; 14], с возможным последующим нанесением гербицидов на пеньки [15]. Запасы фитомассы *A. negundo* и *R. pseudoacacia* в отдельных местах произрастания в Беларуси весьма значительны, что требует утилизации после срезки. Листья и измельченные ветви потенциально могут быть использованы в качестве мульчи и компоста для огородных, плодовых и декоративных растений, однако аллелопатические свойства данной фитомассы, ее безопасность применения под культурными растениями не до конца изучены. В нашей предыдущей работе [16] изучалась аллелопатическая активность экстрактов из зеленой листовой массы *A. negundo* и *R. pseudoacacia*, подготовленной различными способами, методом биотестирования *in vitro* на проростках овощных растений. Биологическое тестирование вытяжек на прорастающих семенах *in vitro* – это один из главных методов в исследовании аллелопатии [17–19], а также фитотоксичности компостов [20; 21].

Известны работы, в которых изучалась аллелопатическая активность экстрактов из зеленых листьев [22], побегов [23], листового опада/подстилки *A. negundo* [24–26], а также почвы из-под *A. negundo* [26] в отношении проростков различных травянистых растений. Сходные исследования проведены по экстрактам из листьев [27; 28] и побегов [23] *R. pseudoacacia*.

Цель данной работы – оценка изменений аллелопатических свойств листовой массы двух древесных инвазионных видов при ее компостировании по сравнению с высушенными зелеными листьями. Последние потенциально могут применяться в качестве натуральной мульчи [29]. Существуют публикации, где обсуждается динамика фитотоксичности фитомассы различных растений по мере разложения данной фитомассы [30–32]. Однако ранее свойства компоста из *A. negundo* и *R. pseudoacacia* не были предметом исследований других авторов.

Материалы и методы исследования

Оценка биологической активности экстрактов проводилась по методике, описанной в нашей предыдущей работе по данной теме [16], включая сбор фитомассы инвазионных растений, место и схему проведения экспериментов, тестовые растительные объекты и статистическую обработку результатов. Экстракцию проводили с навесками высушенной размолотой фитомассы в вариантах 5, 10, 50 и 100 г/л, что обозначено в тексте как концентрация экстракта.

Фитомассу *A. negundo* и *R. pseudoacacia* подвергли пассивному аэробному компостированию. Для этого высушенные на солнце зеленые листья поместили в проницаемые для дождя плетеные пластиковые мешки (для защиты фитомассы от пыли), которые разместили на 10 мес. (с сентября 2021 по июль 2022 г.), на дощатом настиле, не контактирующем с поверхностью земли. Для оценки изменения аллелопатической активности применяли контроль в виде экстракта некомпостированных листьев. Для этого использовалась зеленая листовая масса, собранная летом – в начале осени 2021 г., которую высушили на солнце и хранили до лета 2022 г. в сухом проветриваемом помещении с уличной температурой, после чего измельчали для экстрагирования. Лабораторные эксперименты проводились в период январь – май 2023 г.

Различия между средними значениями проверялись на достоверность, часть из них были признаны статистически значимыми при $p < 0,05$. С учетом достоверности различий между средними и типом влияния на развитие проростков на столбчатых диаграммах (см. Результаты исследования и их обсуждение) применяются следующие условные обозначения: в случае ингибирования значения выделены красным цветом, в случае стимулирования – зеленым цветом, при несущественном ингибирующем или стимулирующем действии (в случае нейтрального эффекта) – черным цветом.

Результаты исследования и их обсуждение

Влияние экстрактов на прорастание семян. В большинстве случаев всхожесть семян тест-культур в контроле не составляла 100 %. По этой причине в качестве поправки количество проросших семян в вариантах опыта выражали в процентах к контролю, то есть к количеству семян, проросших на дистиллированной воде.

Экстракты из компоста *A. negundo* обладали гораздо меньшей аллелопатической активностью, чем экстракты из некомпостированных листьев (рис. 1 а). При концентрациях 5 и 10 г/л их действие на тест-культуры нейтрально. При концентрации 50 г/л также наблюдается преимущественно нейтральный эффект, за исключением кресс-салата, прорастание которого ингибировалось (проросло 44,4 % семян). При 100 г/л экстракт оказался нейтральным только для моркови, а на прорастание кресс-салата и редиса оказывал небольшой ингибирующий эффект (проросло 80,8 и 73,3 % семян соответственно). Для экстрактов некомпостированной фитомассы (рис. 1 б) наблюдается полное ингибирование прорастания кресс-салата в концентрациях 50 и 100 г/л, редиса при 50 г/л и моркови при 100 г/л.

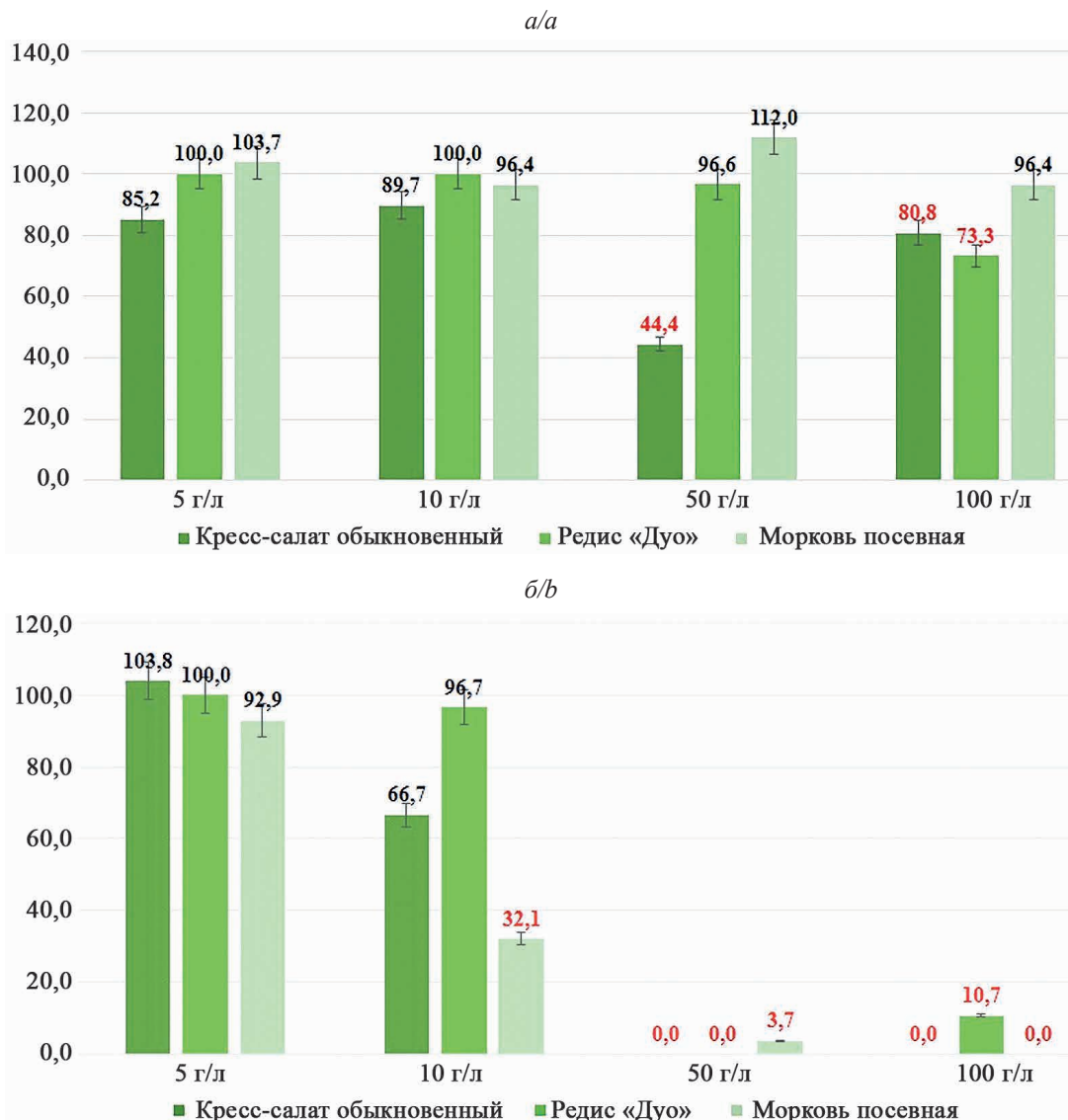


Рис. 1. Процент проросших семян тест-объектов под воздействием различных концентраций экстракта из компоста *A. negundo* (а) в сравнении с некомпостированной листовой массой (б)

Fig. 1. The percentage of germinated seeds of test objects exposed to different concentrations of *A. negundo* compost extract (a), compared to non-composted leaves extract (b)

Экстракты из компоста *R. pseudoacacia* в концентрациях 5 и 10 г/л показали результат, близкий по своему паттерну к экстракту некомпостированной фитомассы (рис. 2). Для экстракта из компоста при концентрации 50 г/л нейтральный эффект наблюдался только для моркови (52 % проросших семян), в то

время как прорастание редиса частично ингибировалось (58,6 %), а прорастание кресс салата полностью подавлялось. При концентрации 100 г/л полное ингибирование наблюдалось для кресс-салата и моркови, а у редиса проросло только 10 % семян. Экстракт из некомпостируемой фитомассы робинии полностью ингибировал прорастание только кресс-салата в концентрации 100 г/л.

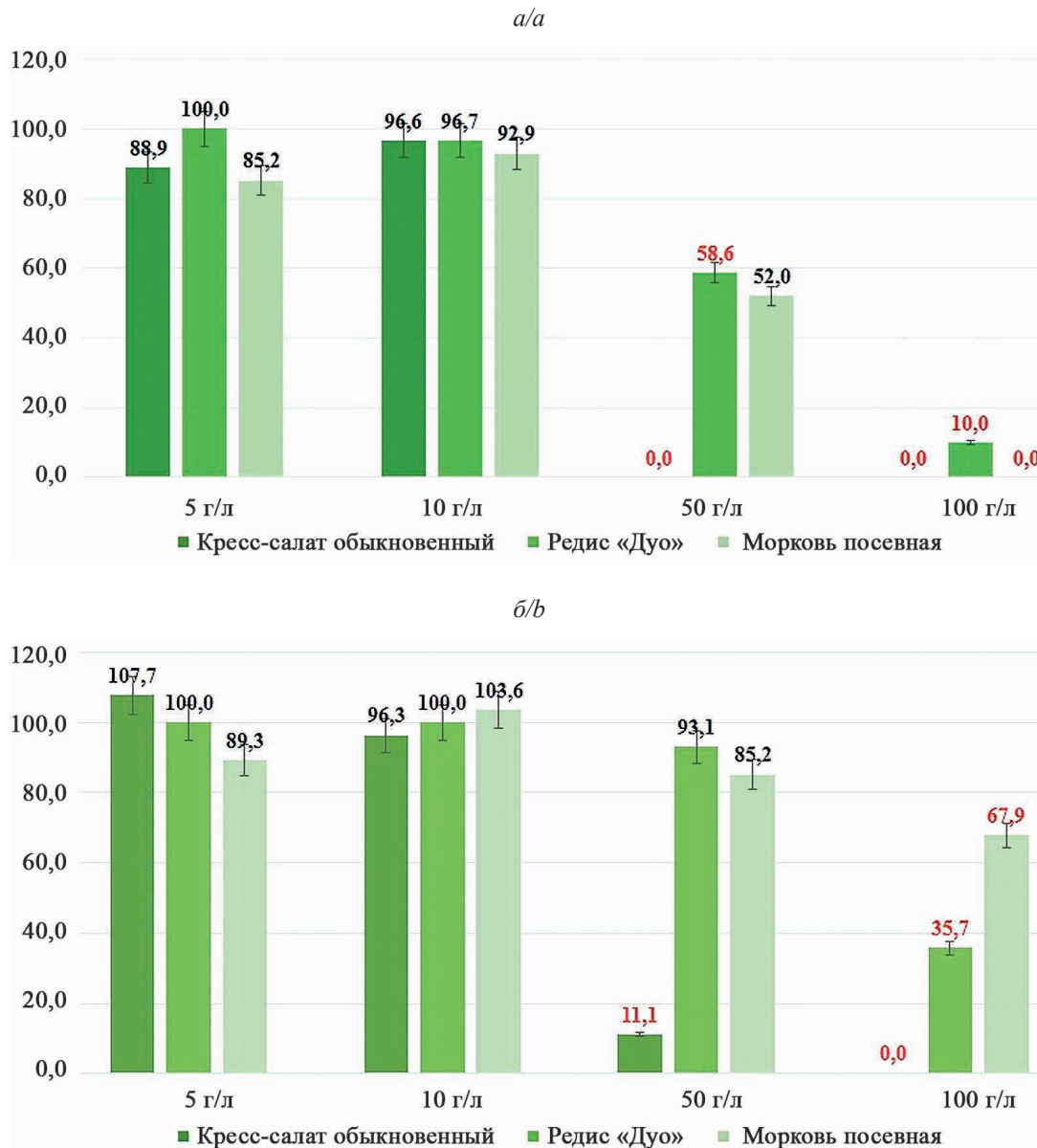


Рис. 2. Процент проросших семян тест-объектов под воздействием различных концентраций экстракта из компоста *R. pseudoacacia* (а) в сравнении с некомпостируемой листовой массой (б)

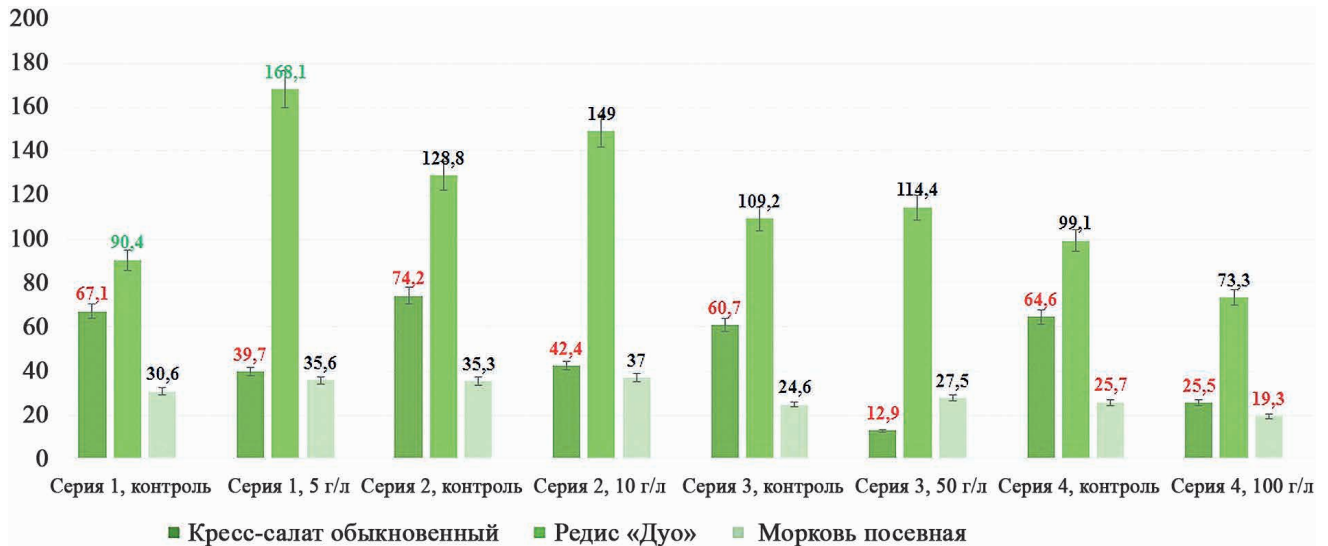
Fig. 2. The percentage of germinated seeds of test objects exposed to different concentrations of *R. pseudoacacia* compost extract (a), compared to non-composted leaves extract (b)

Влияние экстрактов на длину корня проростков. В отношении развития корешка проростков результаты влияния экстрактов из компоста *A. negundo* заметно отличаются от результатов, полученных на экстрактах из некомпостируемой фитомассы: отмечено снижение аллелопатического потенциала у компоста (рис. 3). Для редиса выявлен только нейтральный и стимулирующий (при 5 г/л) эффекты. Для моркови данный тип преобразованной фитомассы также оказался преимущественно нейтральным по действию, за исключением ингибирования при концентрации 100 г/л. Компост из клена оказывал ингибирующее воздействие на кресс-салат во всех вариантах.

Паттерны аллелопатического влияния компостируемой и некомпостируемой фитомассы *R. pseudoacacia* на рост корешков проростков оказались схожи (рис. 4). Как и в случае экстракта некомпостируемой фитомассы, наиболее чувствительным к аллелопатически активным веществам компоста

оказался кресс-салат, у которого при всех концентрациях проявляется ингибирование, в том числе при 50 и 100 г/л – полное ингибирование. Экстракт стимулировал проростки редиса в концентрации 5 г/л, при 10 г/л воздействовал нейтрально, а при более высоких концентрациях проявлял ингибирующий эффект. Для моркови экстракт из компоста был нейтральным при 5 и 10 г/л, ингибирующим – при 50 и 100 г/л, причем при 100 г/л наблюдалось полное ингибирование прорастания моркови.

a/a



b/b

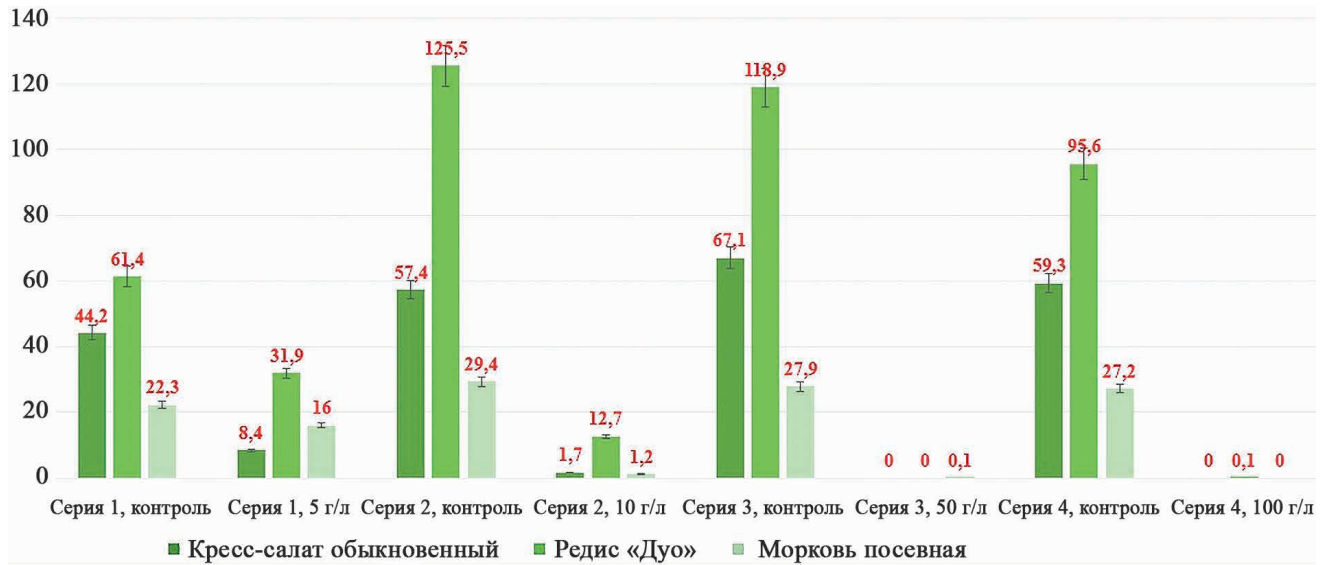


Рис. 3. Длина корней тест-объектов (мм), выросших на экстракте из компоста *A. negundo* (a) в сравнении с экстрактом некомпостированной листовой массы (б)

Fig. 3. Root length of test objects (mm) grown on *A. negundo* compost extract (a), compared to non-composted leaves extract (b)

Влияние экстрактов на длину гипокотилия проростков. Развитие гипокотилия на фоне экстракта из компоста клена демонстрирует следующие закономерности (рис. 5a): при концентрациях 5 и 10 г/л ингибирование отсутствует, наблюдаются только нейтральный (у кресс-салата и моркови) и стимулирующий (у редиса) эффекты. При 50 г/л происходит ингибирование роста гипокотилей кресс-салата, для редиса и моркови эффект не изменяется. При 100 г/л наблюдается ингибирование кресс-салата и нейтральный эффект у редиса и моркови. При сравнении картин влияния на длину гипокотилей (рис. 5) видны те же закономерности, что и в аналогичном эксперименте по длине корешков проростков: аллелопатические свойства у компоста *A. negundo* гораздо ниже, чем у некомпостированной фитомассы.

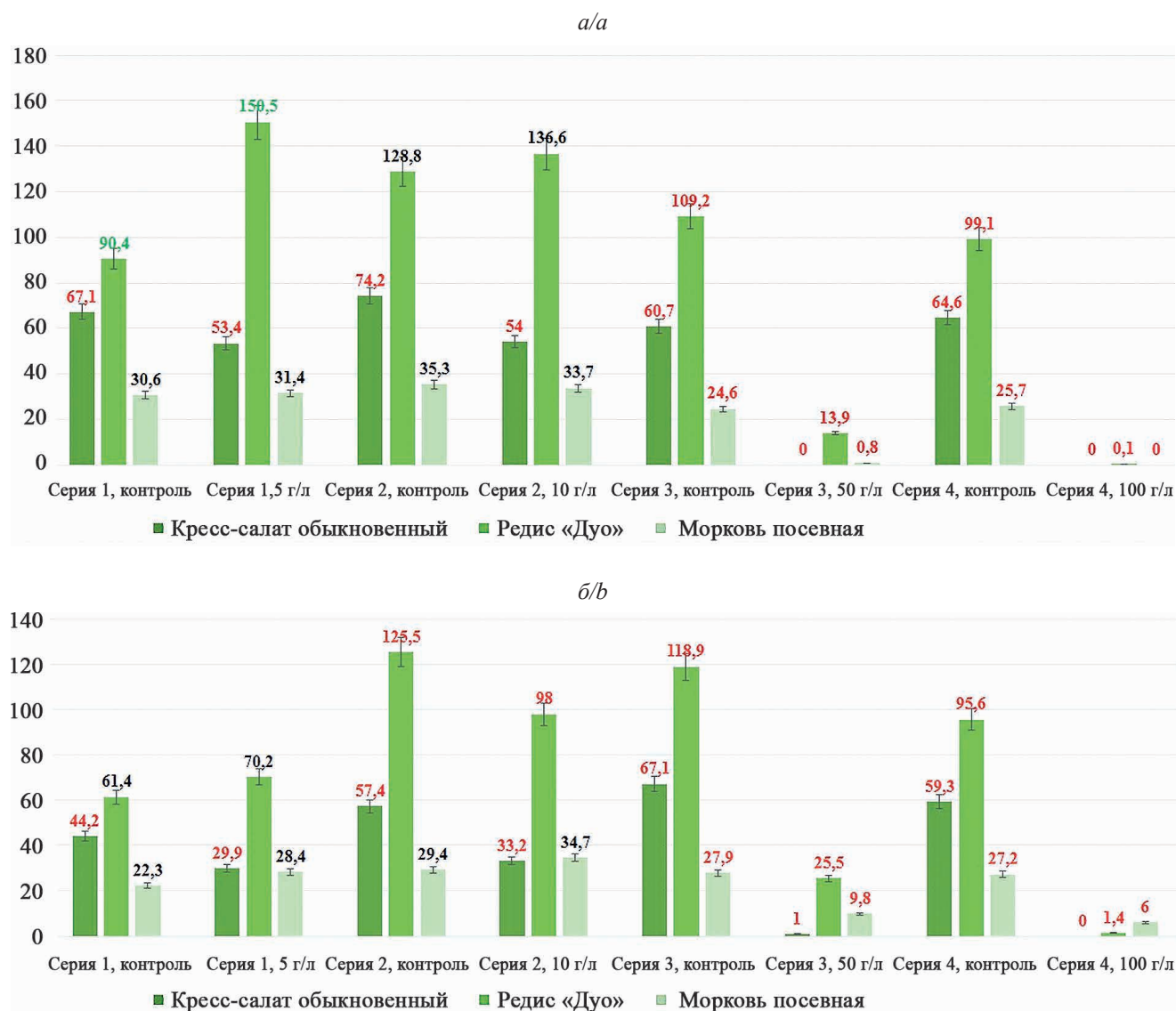


Рис. 4. Длина корней тест-объектов (мм), выросших на экстракте из компоста *R. pseudoacacia* (а) в сравнении с некомпостированной листовой массой (б)

Fig. 4. Root length of test objects (mm) grown on *R. pseudoacacia* compost extract (a), compared to non-composted leaves extract (b)

Экстракты из компоста робинии воздействовали следующим образом (рис. 6а): при концентрации 5 г/л происходит стимулирование роста гипокотилей у редиса; у кресс-салата и моркови наблюдается нейтральный эффект. При 10 г/л стимулирование сохраняется у редиса, также проявляется у кресс-салата, а для моркови эффект остается нейтральным. При концентрациях 50 и 100 г/л экстракты оказывают ингибирующий эффект на все тест-объекты, так же как и в опыте, учитывающем длину корешков проростков. Не наблюдалось существенных различий в паттернах воздействия экстрактов из компостированной и некомпостированной фитомассы (рис. 5б).

Для получения готового компоста из листьев при пассивном компостировании (без перемешивания) в умеренном климате требуется в среднем 2 года [33]. Учитывая период и условия компостирования в нашем эксперименте, готовность компоста была частичной.

В качестве рабочей гипотезы мы допустили, что компост теряет часть своих аллелопатически активных веществ по сравнению с некомпостированной фитомассой. Это подтверждается результатами экспериментов, полученными для *A. negundo*: снижение или потеря активности наиболее заметна при концентрациях экстракта 10, 50 и 100 г/л. В публикациях отмечается, что водорастворимые фитотоксины вымываются из растительных остатков в почву, и этот процесс идет параллельно с разрушением фитомассы [30] и химического разрушения самих фитотоксинов [31].

В то же время выбранная рабочая гипотеза не была подтверждена на модели листьев робинии, прошедших одногодичное компостирование, где фитотоксичность осталась на прежнем уровне, либо даже

усилилась. Известно [29], что в ходе разложения растительных остатков могут образовываться новые аллелопатически активные вещества. Они также имеют ограниченный срок существования в окружающей среде, поэтому решением вопроса может быть более длительное компостирование.

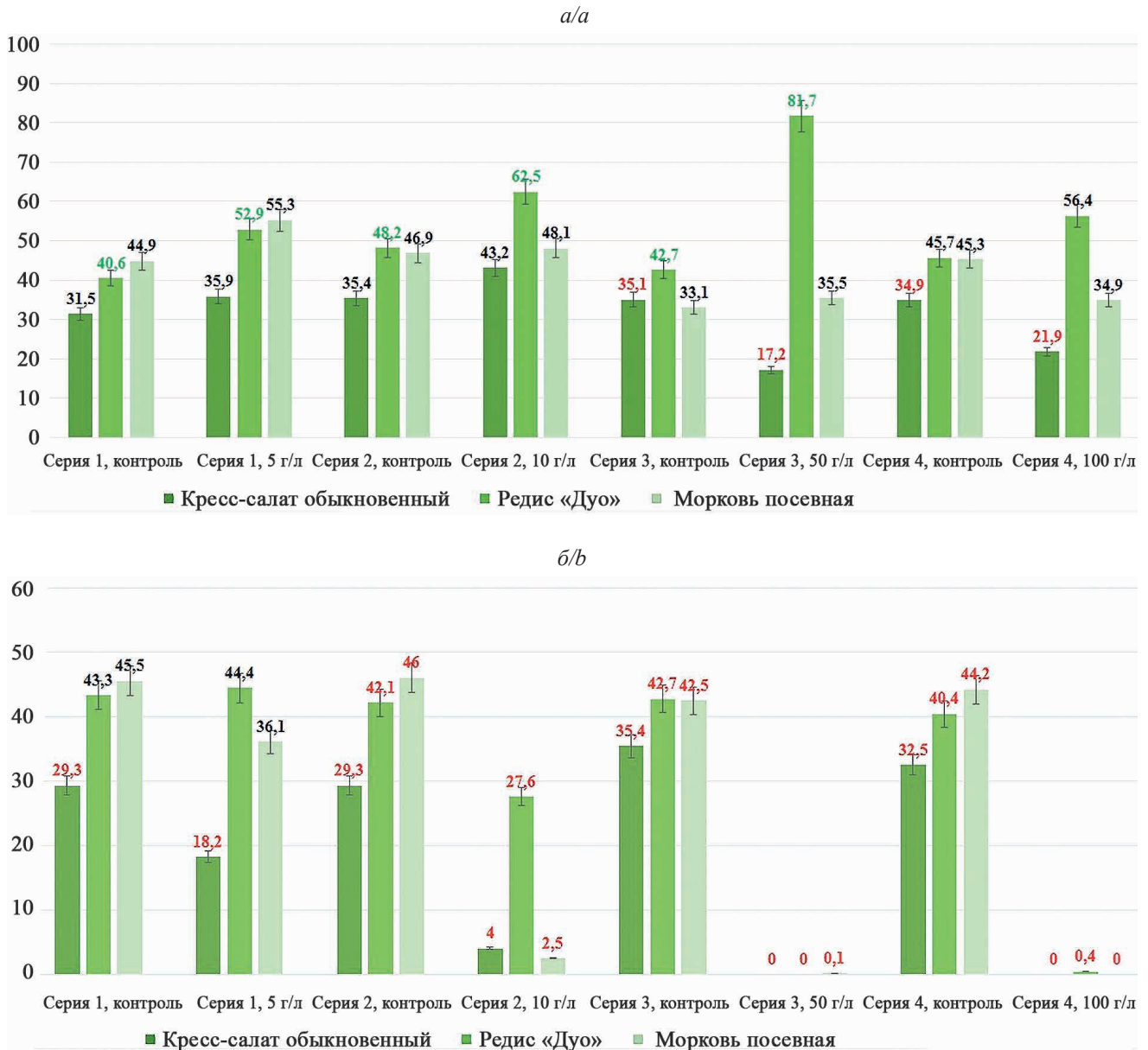


Рис. 5. Длина гипокотилей тест-объектов (мм), выросших на экстракте из компоста *A. negundo* (а) в сравнении с некомпостированной листовой массой (б)

Fig. 5. The length of hypocotyls of test objects (mm) grown on *A. negundo* compost extract (a), compared to non-composted leaves extract (b)

По полученным нами данным *in vitro*, вытяжка из одногодичного листового компоста *A. negundo* не вызывает полного ингибирования развития проростков; в основном проявлялся нейтральный, а в некоторых случаях – стимулирующий эффект. Это аргументирует возможное использование такого компоста под культурными растениями после проведения дополнительных полевых экспериментов и вовлечения большего количества тест-культур. Частично разложившийся компост также может быть использован как натуральная мульча.

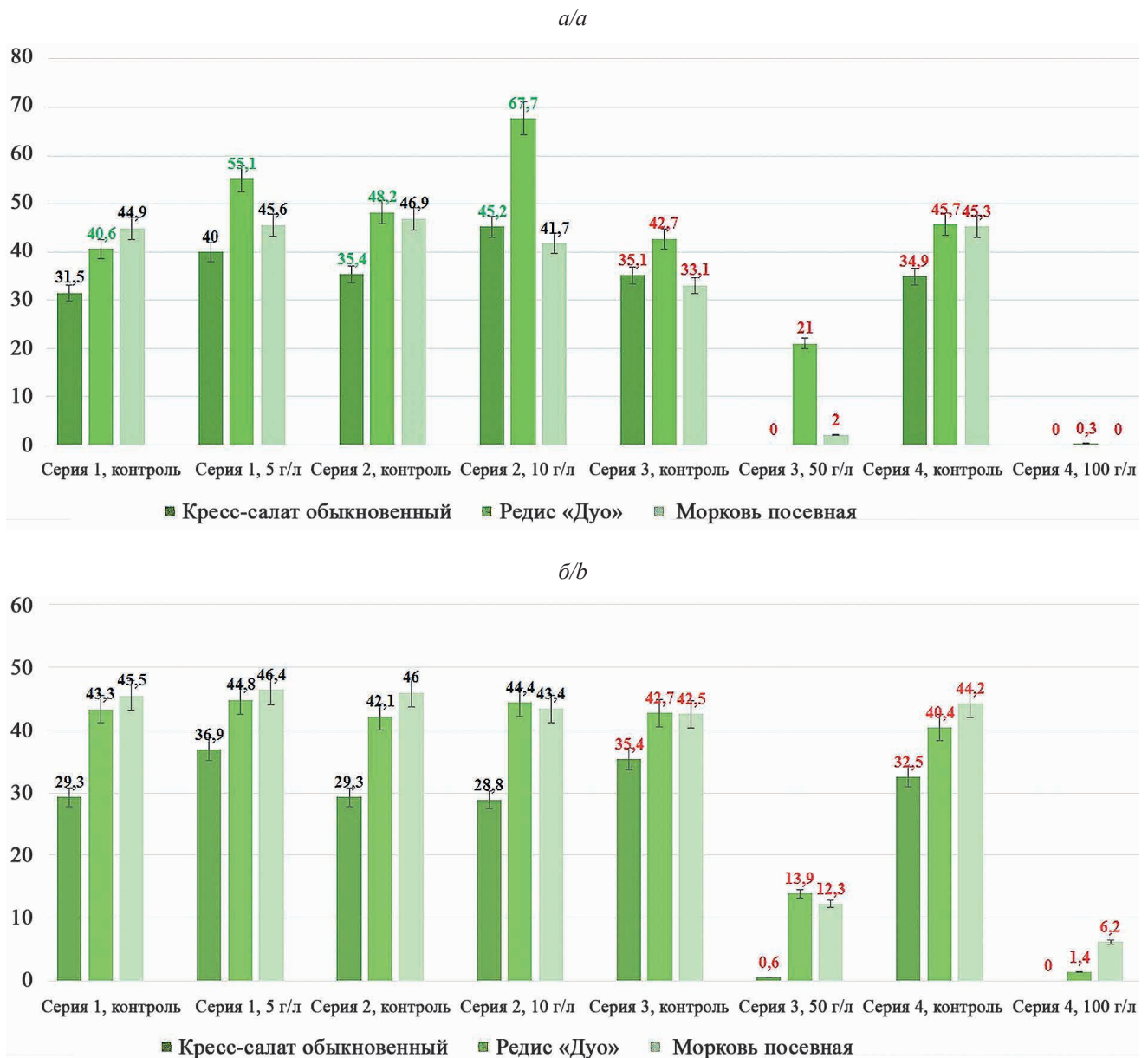


Рис. 6. Длина гипокотилей тест-объектов (мм), выросших на экстракте из компоста *R. pseudoacacia* (а) в сравнении с некомпостированной листовой массой (б)

Fig. 6. The length of hypocotyls of test objects (mm) grown on *R. pseudoacacia* compost extract (a), compared to non-composted leaves extract (b)

Наибольший интерес представляют результаты, показывающие стимулирующий эффект вытяжки из компоста как *A. negundo*, так и *R. pseudoacacia*. В табл. представлена статистическая обработка таких результатов на основе *t*-критерия Стьюдента при сравнении средних арифметических для контрольных и опытных образцов. Все значения *t*-критерия статистически достоверны ($p < 0,05$). Стимулирующие эффекты были характерны преимущественно для редиса и при более низких концентрациях экстракта (5, 10, в одном случае – 50 г/л), полученного исключительно из компоста. Стимулирование было наиболее заметно в отношении длины гипокотилей.

Стимулирующее действие экстрактов из компостированной листовой массы инвазивных видов на развитие проростков тест-культур

Stimulating effects of composted leaf mass extracts of invasive species on the development of seedlings of test cultures

Тест-объект, концентрация сырья при экстрагировании, источник сырья	Средние значения		Значение <i>t</i> -критерия Стьюдента при сравнении средних	<i>p</i>
	контроль	опыт		
Длина корешка растений, мм				
Редис «Дуо», 5 г/л, <i>A. negundo</i>	90,4	168,1	4,83	0,00001
Редис «Дуо», 5 г/л, <i>R. pseudoacacia</i>	90,4	150,5	3,83	0,0003
Длина гипокотилей растений, мм				
Редис «Дуо», 5 г/л, <i>A. negundo</i>	40,6	52,9	2,57	0,01
Редис «Дуо», 10 г/л, <i>A. negundo</i>	48,2	62,5	3,11	0,003
Редис «Дуо», 50 г/л, <i>A. negundo</i>	42,7	81,7	6,39	0,00
Редис «Дуо», 5 г/л, <i>R. pseudoacacia</i>	40,6	55,1	2,51	0,02
Кресс-салат, 10 г/л, <i>R. pseudoacacia</i>	35,4	45,2	2,32	0,02
Редис «Дуо», 10 г/л, <i>R. pseudoacacia</i>	48,2	67,7	4,05	0,0002

Заключение

Проанализировав результаты исследования, мы пришли к следующим выводам:

1. Аэробное пассивное компостирование зеленых листьев *A. negundo* в течение приблизительно одного года позволяет значительно снизить фитотоксичность данной фитомассы для возможного последующего применения компоста как удобрения или мульчи. Снижение ингибирующих свойств экстракта из компоста по сравнению с экстрактом из некомпостированных листьев установлено на индикаторном развитии *in vitro* проростков кресс-салата, редиса и моркови по всем трем изученным показателям: количеству проросших семян, длине корня, длине гипокотилей. В частности, на фоне экстракта 50 г/л прорастание семян моркови составляло 3,7 % для некомпостированных листьев и 112 % к контролю для компоста.

2. Экстракт из компостированных тем же способом листьев *R. pseudoacacia* показал неизменность или усиление ингибирующих аллелопатических свойств по сравнению с экстрактом из некомпостированных листьев. Экстракт из компоста (1) в высоких концентрациях примерно в той же степени, как и экстракт из фитомассы до компостирования (2), подавлял рост корня и гипокотилей. Экстракт 1 сильнее подавлял прорастание семян, чем экстракт 2.

3. Экстракты из компоста *R. pseudoacacia* показывали увеличение ингибирующего действия на развитие проростков по мере увеличения концентрации от 5 до 100 г/л. Для экстрактов из компоста *A. negundo* такая закономерность слабо прослеживалась.

4. В отдельных случаях вытяжки из компоста имели стимулирующий эффект на развитие проростков: экстракты из клена и робинии 5 г/л вызывали удлинение корешка у проростков редиса в 1,7–1,9 раза; экстракты из клена 5–50 г/л вызывали удлинение гипокотилей у редиса в 1,3–1,9 раза; экстракты из робинии 5–10 г/л вызывали удлинение гипокотилей у редиса в 1,4 раза и аналогичный экстракт 10 г/л вызывал удлинение гипокотилей у кресс-салата в 1,3 раза. Для экстрактов из некомпостированной фитомассы случаев стимулирования выявлено не было.

5. Разные культуры по-разному чувствительны к воздействию аллелохимических веществ компоста. В частности, экстракт из компоста *A. negundo* оказывал ингибирующее воздействие на длину корешка кресс-салата во всех вариантах, тогда как для редиса выявлен только нейтральный и стимулирующий эффекты; экстракт из компоста клена стимулировал развитие гипокотилей только у редиса, а ингибировал только у кресс-салата. Экстракт из компоста *R. pseudoacacia* 50 г/л снижал всхожесть кресс-салата до 0 %, а редиса – до 58,6 %.

Библиографические ссылки

1. Randall JM, Marinelli J, editors. Invasive plants: Weeds of the global garden. New York: Brooklyn Botanic Garden; 1996. 111 p.
2. Pyšek P, Jarošík V, Hulme PE, et al. A global assessment of invasive plant impacts on resident species, communities and ecosystems: the interaction of impact measures, invading species' traits and environment. *Global Change Biology*. 2012;18:1725–1737.
3. Weidlich EWA, Flórido FG, Sorrini TB, Brancalion PHS. Controlling invasive plant species in ecological restoration: A global review. *Journal of Applied Ecology*. 2020;57:1806–1817.
4. Дубовик ДВ, Лебедько ВН, Парфенов ВИ, и др. *Растения-агрессоры. Инвазивные виды на территории Беларуси*. Минск: Белорусская Энциклопедия імя Пётруся Броўкі; 2017. 192 с.

5. Дубовик ДВ, Дмитриева СА, Ламан НА, и др. *Черная книга флоры Беларуси: чужеродные вредоносные растения*. Минск: Белорусская наука; 2020. 407 с.
6. Maeglin RR, Ohmann LF. Boxelder (*Acer negundo*): A review and commentary. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. 1973;100(6):357–363.
7. Ednich EM, Chernyavskaya IV, Tolstikova TN, Chitao SI. Biology of the invasive ippecies *Acer negundo* L. in the conditions of the north-west Caucasus foothills. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015;8(30):85426.
8. Camenen E, Porté AJ, Garzón MB. American trees shift their niches when invading Western Europe: evaluating invasion risks in a changing climate. *Ecology and Evolution*. 2016;6(20):7263–7275.
9. Виноградова ЮК, Куприянов АН, редакторы. *Черная книга флоры Сибири*. Новосибирск: ГЕО; 2016. 440 с.
10. Kolyada NA, Kolyada AS. Occurrence of potentially invasive species box elder (*Acer negundo* L.) in the south of the Russian Far East. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2017;8:41–44.
11. Kanwar K, Bhardwaj A, Deepika R, Sharma DR. *Robinia pseudoacacia* Linn. *Tree and Forestry Science and Biotechnology*. 2007;1(1):74–80.
12. Cierjacks A, Kowarik I, Joshi J, et al. Biological Flora of the British Isles: *Robinia pseudoacacia*. *Journal of Ecology*. 2013;101:1623–1640.
13. Martin GD. Addressing geographical bias: A review of *Robinia pseudoacacia* (black locust) in the Southern Hemisphere. *South African Journal of Botany*. 2019;125:481–492.
14. Nicolescu VN, Rédei K, Mason WL, et al. Ecology, growth and management of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.), a non-native species integrated into European forests. *Journal of Forestry Research*. 2020;31(4):1081–1101.
15. Nikolaeva AA, Golosova EV, Shelepova OV. Methods of combating *Acer negundo* L. in specially protected natural areas. *BIO Web of Conferences*. 2020;24:00063.
16. Яхновец МН, Юрченко ЕО. Оценка биологической активности экстрактов из листьев *Acer negundo* и *Robinia pseudoacacia* на проростках тест-культур. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;1:20–31.
17. Inderjit, Dakshini KMM. On laboratory bioassays in allelopathy. *The Botanical Review*. 1995;61(1):28–44.
18. Haugland E, Brandsaeter LO. Experiments on bioassay sensitivity in the study of allelopathy. *Journal of Chemical Ecology*. 1996;22(10):1845–1859.
19. Pellissier F. Improved germination bioassays for allelopathy research. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2013;35:23–30.
20. Barral MT, Paradelo R. A review on the use of phytotoxicity as a compost quality indicator. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*. 2011;5(Special Issue 2):36–44.
21. Jagadabhi PS, Wani SP, Kaushal M, et al. Physico-chemical, microbial and phytotoxicity evaluation of composts from sorghum, finger millet and soybean straws. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2019;8:279–293.
22. Rafikova OS, Veselkin DV. Leaf water extracts from invasive *Acer negundo* do not inhibit seed germination more than leaf extracts from native species. *Management of Biological Invasions*. 2022;13(4):705–723.
23. Csiszár Á. Allelopathic effects of invasive woody plant species in Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*. 2009;5:9–17.
24. Панасенко НН, Володин ВВ, Володченко ЮС, Холенко МС. Аллелопатические свойства *Acer negundo*. *Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований Брянского государственного университета*. Брянск: [б. и.]; 2018. с. 34–36.
25. Nikolaeva AA, Golosova EV, Shelepova OV. Allelopathic activity of *Acer negundo* L. leaf litter as a vector of invasion species into plant communities. *BIO Web of Conferences*. 2021;38:00088.
26. Цандекова ОЛ. Роль аллелопатического влияния *Acer negundo* L. на рост травянистых растений. *Вестник Нижневартковского государственного университета*. 2020;1:15–18.
27. Nasir H, Iqbal Z, Hiradate S, Fujii Y. Allelopathic potential of *Robinia pseudo-acacia* L. *Journal of Chemical Ecology*. 2005;31(9):2179–2192.
28. Bektić S, Huseinović S, Husanović J, Memić S. Allelopathic effects of extract *Robinia pseudoacacia* L. and *Chenopodium album* L. on germination of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2021;40(26):11–18.
29. Bross EL, Gold MA, Nguyen RV. Quality and decomposition of black locust (*Robinia pseudoacacia*) and alfalfa (*Medicago sativa*) mulch for temperate alley cropping systems. *Agroforestry Systems*. 1995;29:255–264.
30. Toai TV, Linscott DL. Phytotoxic effect of decaying quackgrass (*Agropyron repens*) residues. *Weed Science*. 1979;27(6):595–598.
31. Xuan TD, Tawata S, Khanh TD, Chung IM. Decomposition of allelopathic plants in soil. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2005;191:162–171.
32. Bonanomi G, Sicurezza MG, Caporaso S, et al. Phytotoxicity dynamics of decaying plant materials. *New Phytologist*. 2006;169:571–578.
33. Rynk R, editor. *On-farm composting handbook*. New York: Plant and Life Sciences Publishing; 1992. 186 p.

References

1. Randall JM, Marinelli J, editors. *Invasive plants: Weeds of the global garden*. New York: Brooklin Botanic Garden; 1996. 111 p.
2. Pyšek P, Jarošík V, Hulme PE, et al. A global assessment of invasive plant impacts on resident species, communities and ecosystems: the interaction of impact measures, invading species' traits and environment. *Global Change Biology*. 2012;18:1725–1737.
3. Weidlich EWA, Flórido FG, Sorrini TB, Brancalion PHS. Controlling invasive plant species in ecological restoration: A global review. *Journal of Applied Ecology*. 2020;57:1806–1817.
4. Dubovik DV, Lebed'ko VN, Parfenov VI, et al. *Rasteniya-agressory. Invazionnye vidy na territorii Belarusi* [Aggressive plants. Invasive species on the territory of Belarus]. Minsk: Belaruskaya Entsyklopedyya imya Petrusya Broŭki; 2017. 192 p. Russian.
5. Dubovik DV, Dmitrieva SA, Laman NA, et al. *Chernaya kniga flory Belarusi: chuzherodnye vredonosnye rasteniya* [Black book of Belarus flora: alien harmful plant species]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2020. 407 p. Russian.
6. Maeglin RR, Ohmann LF. Boxelder (*Acer negundo*): A review and commentary. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. 1973;100(6):357–363.
7. Ednich EM, Chernyavskaya IV, Tolstikova TN, Chitao SI. Biology of the invasive ippecies *Acer negundo* L. in the conditions of the north-west Caucasus foothills. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015;8(30):85426.

8. Camenen E, Porté AJ, Garzón MB. American trees shift their niches when invading Western Europe: evaluating invasion risks in a changing climate. *Ecology and Evolution*. 2016;6(20):7263–7275.
9. Vinogradova YuK, Kupriyanov AN, editors. Chernaya kniga flory Sibiri [Black book of Siberian flora]. Novosibirsk: GEO; 2016. 440 p. Russian.
10. Kolyada NA, Kolyada AS. Occurrence of potentially invasive species box elder (*Acer negundo* L.) in the south of the Russian Far East. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2017;8:41–44.
11. Kanwar K, Bhardwaj A, Deepika R, Sharma DR. *Robinia pseudoacacia* Linn. *Tree and Forestry Science and Biotechnology*. 2007;1(1):74–80.
12. Cierjacks A, Kowarik I, Joshi J, et al. Biological Flora of the British Isles: *Robinia pseudoacacia*. *Journal of Ecology*. 2013;101:1623–1640.
13. Martin GD. Addressing geographical bias: A review of *Robinia pseudoacacia* (black locust) in the Southern Hemisphere. *South African Journal of Botany*. 2019;125:481–492.
14. Nicolescu VN, Rédei K, Mason WL, et al. Ecology, growth and management of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.), a non-native species integrated into European forests. *Journal of Forestry Research*. 2020;31(4):1081–1101.
15. Nikolaeva AA, Golosova EV, Shelepova OV. Methods of combating *Acer negundo* L. in specially protected natural areas. *BIO Web of Conferences*. 2020;24:00063.
16. Yakhnovets MN, Yurchenko EO. *Otsenka biologicheskoi aktivnosti ekstraktov iz list'ev Acer negundo i Robinia pseudoacacia na prorostkakh test-kul'tur* [Evaluation of the biological activity of the extracts from *Acer negundo* and *Robinia pseudoacacia* leaves on germinating seeds of test cultures]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya* [Journal of the Belarusian State University. Ecology]. 2023;1:20–31. Russian.
17. Inderjit, Dakshini KMM. On laboratory bioassays in allelopathy. *The Botanical Review*. 1995;61(1):28–44.
18. Haugland E, Brandsaeter LO. Experiments on bioassay sensitivity in the study of allelopathy. *Journal of Chemical Ecology*. 1996;22(10):1845–1859.
19. Pellissier F. Improved germination bioassays for allelopathy research. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2013;35:23–30.
20. Barral MT, Paradelo R. A review on the use of phytotoxicity as a compost quality indicator. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*. 2011;5(Special Issue 2):36–44.
21. Jagadabhi PS, Wani SP, Kaushal M, et al. Physico-chemical, microbial and phytotoxicity evaluation of composts from sorghum, finger millet and soybean straws. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2019;8:279–293.
22. Rafikova OS, Veselkin DV. Leaf water extracts from invasive *Acer negundo* do not inhibit seed germination more than leaf extracts from native species. *Management of Biological Invasions*. 2022;13(4):705–723.
23. Csizsár Á. Allelopathic effects of invasive woody plant species in Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*. 2009;5:9–17.
24. Panasenko NN, Volodin VV, Volodchenko YuS, Kholenko MS. *Allelopaticheskie svoystva Acer negundo* [Allelopathic properties of *Acer negundo*]. *Ezhegodnik NII fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Annals of the Research Institute for Fundamental and Applied Research of the Bryansk State University]. Bryansk: [publisher unknown]; 2018. p. 34–36. Russian.
25. Nikolaeva AA, Golosova EV, Shelepova OV. Allelopathic activity of *Acer negundo* L. leaf litter as a vector of invasion species into plant communities. *BIO Web of Conferences*. 2021;38:00088.
26. Tsandekova OL. *Rol' allelopaticheskogo vliyaniya Acer negundo L. na rost travyanistykh rasteniy* [The role of allelopathic influence of *Acer negundo* L. on the growth of herbaceous plants]. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Nizhnevartovsk State University]. 2020;1:15–18. Russian.
27. Nasir H, Iqbal Z, Hiradate S, Fujii Y. Allelopathic potential of *Robinia pseudo-acacia* L. *Journal of Chemical Ecology*. 2005;31(9):2179–2192.
28. Bektić S, Huseinović S, Husanović J, Memić S. Allelopathic effects of extract *Robinia pseudoacacia* L. and *Chenopodium album* L. on germination of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2021;40(26):11–18.
29. Bross EL, Gold MA, Nguyen RV. Quality and decomposition of black locust (*Robinia pseudoacacia*) and alfalfa (*Medicago sativa*) mulch for temperate alley cropping systems. *Agroforestry Systems*. 1995;29:255–264.
30. Toai TV, Linscott DL. Phytotoxic effect of decaying quackgrass (*Agropyron repens*) residues. *Weed Science*. 1979; 27(6):595–598.
31. Xuan TD, Tawata S, Khanh TD, Chung IM. Decomposition of allelopathic plants in soil. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2005;191:162–171.
32. Bonanomi G, Sicurezza MG, Caporaso S, et al. Phytotoxicity dynamics of decaying plant materials. *New Phytologist*. 2006;169:571–578.
33. Rynk R, editor. On-farm composting handbook. New York: Plant and Life Sciences Publishing; 1992. 186 p.

Статья поступила в редакцию 25.07.2023.
Received by editorial board 25.07.2023.

УДК 504.3

СЕЗОННЫЙ ХОД КОНЦЕНТРАЦИЙ АНТРОПОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОЗДУХА И ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В ГОРОДАХ БЕЛАРУСИ

А. Н. АКИМОВ¹⁾, А. М. ЛЮДЧИК¹⁾, Е. А. МЕЛЬНИК²⁾, П. Н. ПАВЛЕНКО³⁾

¹⁾Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы,
Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

²⁾Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю
радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды,
пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь

³⁾Белорусский национальный технический университет,
пр. Партизанский, 77, 220107 г. Минск, Беларусь

На основании данных наблюдений Национальной системы мониторинга окружающей среды анализируются уровни антропогенного загрязнения воздуха и приземного озона в областных городах Беларуси и Березинском биосферном заповеднике. Исследуются особенности суточного хода концентраций загрязнений. Рассчитаны среднемесячные значения концентраций в разные годы для каждого пункта наблюдений и определены их многолетние средние для каждого пункта наблюдений и средние месячные уровни загрязнений для городов с несколькими пунктами наблюдений. Анализируется изменение уровней загрязнения воздуха с годами и различия в уровнях загрязнения отдельных городов. Наблюдаемое различие обусловлено не только разными источниками загрязнений воздуха и их интенсивностью, но и различием в метеорологических условиях. Общие выводы могут быть сделаны в отношении сезонного хода концентраций загрязнений: почти все из них максимальны в феврале, затем падают к лету и растут в осенний период до следующего февраля. Только с летучими органическими соединениями четкой повторяющейся сезонной зависимости во всех пунктах наблюдений не выявлено. Общее снижение концентраций загрязнений в летнее время объясняется снижением вертикальной устойчивости атмосферы, интенсификацией ее вертикального перемешивания и разбавлением концентраций загрязнений в приземном слое воздуха. Выявленное снижение в последние годы концентраций антропогенных загрязнений в городах требует детального анализа для выяснения его причин. Две возможные причины – уменьшение выбросов промышленными предприятиями и меняющийся климат, приводящий к интенсификации очищения городского воздуха. По результатам исследования самый чистый воздух зафиксирован в Березинском заповеднике. Однако в Бресте, Могилеве и Гродно концентрации приземного озона в весенне-летний период оказываются выше, чем в заповеднике, несмотря на существенно более высокие концентрации антропогенных загрязнений в городах по сравнению с заповедником. Объяснение следует искать в различии метеоусловий и трансграничном переносе загрязнений и озона. Концентрации оксида углерода слабо различаются в отдельных городах: наиболее высокие – в Гомеле, наиболее низкие – в Минске. Что касается летучих органических соединений, то самые высокие – в Минске, самые низкие – в Гомеле. А по уровню загрязнения оксидами азота оба названных города являются лидерами среди областных центров республики.

Образец цитирования:

Акимов АН, Людчик АМ, Мельник ЕА, Павленко ПН. Сезонный ход концентраций антропогенных загрязнений воздуха и приземного озона в городах Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;3:16–30.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-16-30>

For citation:

Akimov AN, Liudchik AM, Melnik EA, Paulenka PN. Seasonal course of anthropogenic air pollution and surface ozone concentrations in the cities of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;3:16–30. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-16-30>

Авторы:

Александр Николаевич Акимов – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник; заведующий лабораторией.

Александр Маркович Людчик – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий лабораторией.

Елена Александровна Мельник – ведущий инженер-химик службы экологической информации.

Павел Николаевич Павленко – старший преподаватель кафедры безопасности технологических процессов в производстве.

Authors:

Aleksandr N. Akimov, PhD (physics and mathematics); senior researcher; head of the laboratory.

alex_akimov@mail.ru

Alexander M. Liudchik, PhD (physics and mathematics), docent; head of the laboratory.

liudchikam@tut.by

Alena A. Melnik, lead chemical engineer at the department of environmental information.

kbb@rad.org.by

Pavel N. Paulenka, senior lecturer at the department of safety of technological processes in production.

pavlenko_pn@mail.ru

Ключевые слова: приземный озон; метеорологические условия; антропогенное загрязнение воздуха.

Благодарность. Авторы выражают благодарность сотрудникам Белгидромета, предоставившим информацию для анализа и активно участвовавшим в ее обсуждении.

SEASONAL COURSE OF ANTHROPOGENIC AIR POLLUTION AND SURFACE OZONE CONCENTRATIONS IN THE CITIES OF BELARUS

A. N. AKIMOV^a, A. M. LIUDCHIK^a, E. A. MELNIK^b, P. N. PAULENKA^c

^aNational Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University,
7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus

^bRepublican Center for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring,
110 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220114, Belarus

^cBelarusian National Technical University,

77 Partyzanski Avenue, Minsk 220107, Belarus

Corresponding author: A. N. Akimov (alex_akimov@mail.ru)

Based on the data of the National Environmental Monitoring System, the levels of anthropogenic air pollution and surface ozone in the regional cities of Belarus and the Berezinsky Biosphere Reserve are analyzed. The features of the diurnal course of pollution concentrations are discussed. Monthly average values of concentrations in different years for each observation site were calculated and their long-term averages for each observation site and average monthly pollution levels for cities with several observation sites were determined. Changes in air pollution levels over the years and differences in pollution levels in individual cities are analyzed. The observed differences is due not only to different sources of air pollution and their intensity, but also to differences in meteorological conditions. General conclusions can be drawn regarding the seasonal course of pollution concentrations: almost all of them are maximum in February, then fall towards the summer and increase in the autumn period until the following February. Only with volatile organic compounds, no clear recurring seasonal dependence was found at all observation points. The general decrease in pollution concentrations in summer is explained by a decrease in the vertical stability of the atmosphere, intensification of its vertical mixing, and dilution of pollution concentrations in the surface air layer. The revealed decrease in concentrations of anthropogenic pollution in cities in recent years also requires a more detailed analysis to determine its causes. Two possible reasons are a reduction in emissions from industrial enterprises and, after all, a changing climate, leading to an intensification of urban air purification. According to the results of the study, the cleanest air is in the Berezinsky Reserve. However, in Brest, Mogilev and Grodno, the concentrations of ground-level ozone in the spring-summer period are higher than in the Reserve, despite significantly higher concentrations of anthropogenic pollution in cities compared to the Reserve. The explanation should be sought in the difference in weather conditions and the transboundary transport of pollution and ozone. The concentrations of carbon monoxide vary slightly in individual cities, the highest – in Gomel, the lowest – in Minsk. As for volatile organic compounds, the highest are in Minsk, the lowest are in Gomel. And in terms of nitrogen oxide pollution, both of these cities are leaders among the regional centers of the Republic.

Keywords: surface ozone; meteorological conditions; anthropogenic air pollution.

Acknowledgments. The authors are grateful to the employees of Belhydromet, who provided information for analysis and actively participated in its discussion.

Введение

В современную эпоху антропогенное воздействие на атмосферу становится более интенсивным, масштабным и разнообразным. Это создает серьезную проблему в жизнедеятельности человека вследствие загрязнения воздуха.

Основные источники загрязнения воздуха, как правило, сосредоточены в крупных городах и промышленных центрах. Изначально самые загрязненные города были обнаружены на Американском континенте – Лос-Анджелес и Мехико [1] с высокой концентрацией приземного озона, генерируемого в условиях плотного городского смога. Озон – вторичный загрязнитель приземного воздуха, образующийся в присутствии высоких концентраций антропогенных загрязнений и солнечного излучения. Со временем «центр тяжести» загрязнения воздуха переместился через Тихий океан в Индию, Пакистан и Китай [2]. Частично это было обусловлено экологическими мероприятиями в Америке, но главную роль сыграло бурное развитие транспорта и промышленности на азиатском континенте.

Следует отметить, что в Европе не все благополучно с качеством воздуха, серьезные проблемы существуют в городах Италии, Германии и других стран. Например, в Польше 36 городов входят в список

50-ти самых загрязненных городов Европы [3]. В этом списке белорусский Новополоцк занимает шестое место¹. Причина состоит в большом количестве промышленных предприятий, расположенных в его окрестностях.

В Беларуси значительное внимание уделяется качеству воздуха. В большинстве крупных городов и промышленных центров Белгидрометом в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) проводятся наблюдения за содержанием ряда загрязняющих веществ в воздухе. В настоящее время такие наблюдения осуществляются на автоматических станциях, где ведутся непрерывные измерения концентраций некоторых загрязнений, и на пунктах с дискретным (ручным) режимом отбора проб, заметно расширяющих список определяемых веществ. Обобщенные сведения о результатах наблюдений НСМОС регулярно публикуются Белгидрометом в «Ежегодниках состояния атмосферного воздуха»².

Одну из лидирующих позиций в перечне антропогенных источников загрязнений атмосферы [4] занимает транспорт, выбрасывающий такие соединения, как диоксид серы, оксид углерода, оксиды азота, летучие органические соединения, а также твердые частицы (сажу, пыль). Сжигание материалов и топлива и различные технологические процессы в промышленности и энергетике также являются источниками выбросов NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) и CO , а сжигание материалов бытовыми потребителями – источником выбросов CO . Существенным источником антропогенного загрязнения воздуха является строительство и сельское хозяйство.

Роль отдельных источников в загрязнении атмосферы часто трудно оценить по результатам мониторинга качества воздуха из-за меняющихся метеоусловий. Наиболее важными факторами, влияющими на очищение приземного воздуха, считаются скорость и направление ветра, а также вертикальная устойчивость атмосферы. В Беларуси скорость ветра в зимнее время в среднем увеличивается, что способствует очищению городского воздуха, а вертикальное перемешивание существенно тормозится из-за уменьшения вертикального градиента температуры. Как показывают результаты наблюдений, второй фактор более сильно влияет на загрязненность городского воздуха в зимнее время, которая обычно возрастает [5].

В отличие от загрязнений антропогенного происхождения, в основном озон образуется в стратосфере и является естественной составляющей атмосферы. Находящийся в верхних слоях атмосферы озон защищает биосферу планеты от вредного солнечного ультрафиолетового излучения, однако в приземном слое способен нанести определенный вред живым организмам. На концентрацию озона в нижней тропосфере оказывают влияние ветер, переносящий озон в горизонтальном направлении, термическая конвекция, способствующая переносу в вертикальном направлении, скорость осаждения на подстилающую поверхность [6], а также химические реакции с другими составляющими атмосферы, приводящие к генерации или разрушению озона. Для генерации озона в приземном слое необходимым условием является наличие ультрафиолетового солнечного излучения.

В Беларуси антропогенное загрязнение воздуха обычно приводит к снижению концентрации приземного озона [7]. Поэтому в больших городах при сильном ветре, приносящем более чистый воздух из сельской местности, она обычно повышается. Этому также способствует конвективное и инициированное ветром турбулентное перемешивание с вышележащими слоями тропосферы, как правило, содержащими более высокие концентрации озона [8].

В данной публикации рассматривается поведение антропогенных загрязнений воздуха и приземного озона в областных городах Беларуси в сравнении с ситуацией в экологически чистом районе – Березинском биосферном заповеднике (далее – заповедник). Анализируется годовой ход концентраций загрязнений.

Материалы и методы исследования

Исследование базируется на наблюдениях за качеством воздуха автоматическими станциями Белгидромета, расположенными в областных городах и Березинском биосферном заповеднике и непрерывно измеряющими уровень загрязнения оксидом углерода, оксидом и диоксидом азота, озоном и летучими органическими веществами – бензолом, толуолом и ксилолом за 2012–2022 гг. При анализе имеющейся информации возникают отдельные проблемы, связанные в основном со значительными разрывами в рядах данных из-за сбоев в работе измерительного оборудования и недостаточного количества автоматических измерительных приборов.

Особенности суточного хода загрязнений воздуха. Суточный ход концентраций антропогенных загрязнений воздуха в городах Беларуси детально рассмотрен в [7; 9]. Установлено, что чаще всего их повышенные концентрации фиксируются в утреннее и вечернее время суток. При этом вечерний максимум

¹Национальный доклад о состоянии окружающей среды Республики Беларусь / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, РУП «БелНИЦ «Экология». Минск: БелНИЦ «Экология»; 2019. 191 с.

²Ежегодник состояния атмосферного воздуха. [Электронный ресурс]. URL: <https://rad.org.by/articles/vozduh/> (дата обращения: 12.01.2023).

сдвигается на более позднее время в весенне-летний сезон. Установлена причина такого сдвига: смещение во времени вечернего повышения вертикальной устойчивости пограничного слоя атмосферы. Помимо этого, анализ наблюдений подтверждает хорошо известный «эффект выходного дня» [10]: в выходные дни антропогенное загрязнение воздуха в городах уменьшается. Для подтверждения этого удобнее всего воспользоваться результатами статистической обработки наблюдений, как это делалось в [7; 9], поскольку существенное влияние на загрязнение воздуха оказывают метеорологические условия. В зависимости от них суточный ход концентраций загрязнений может существенно меняться, а ожидаемое их снижение в выходные дни маскироваться за счет меняющейся погоды. Более-менее удачный пример наблюдения реального снижения концентраций загрязнений в выходные дни в течение месяца представлен на рис. 1 для г. Гомеля.

В отличие от загрязнений антропогенной природы, концентрация приземного озона обычно растет в дневное время до максимума, наступающего после полудня, а затем начинает уменьшаться и падает до минимума ночью. Основной причиной такого поведения является фотохимическая генерация озона у поверхности земли в присутствии солнечного излучения, а также прекурсоров озона и его разрушение в ночное время суток. Этому способствует интенсификация вертикального перемешивания в дневное время, обеспечивающая приток повышенных концентраций озона из более высоких слоев атмосферы. В городах Беларуси дневному увеличению концентрации озона способствует усиление ветра, приносящего воздух из сельских районов, более чистый от антропогенных загрязнений и, следовательно, содержащий более высокие концентрации озона [7; 11].

Превышение предельно допустимых концентраций антропогенных загрязнений воздуха в областных центрах Беларуси обычно случается не часто и непродолжительное время в течение суток³.

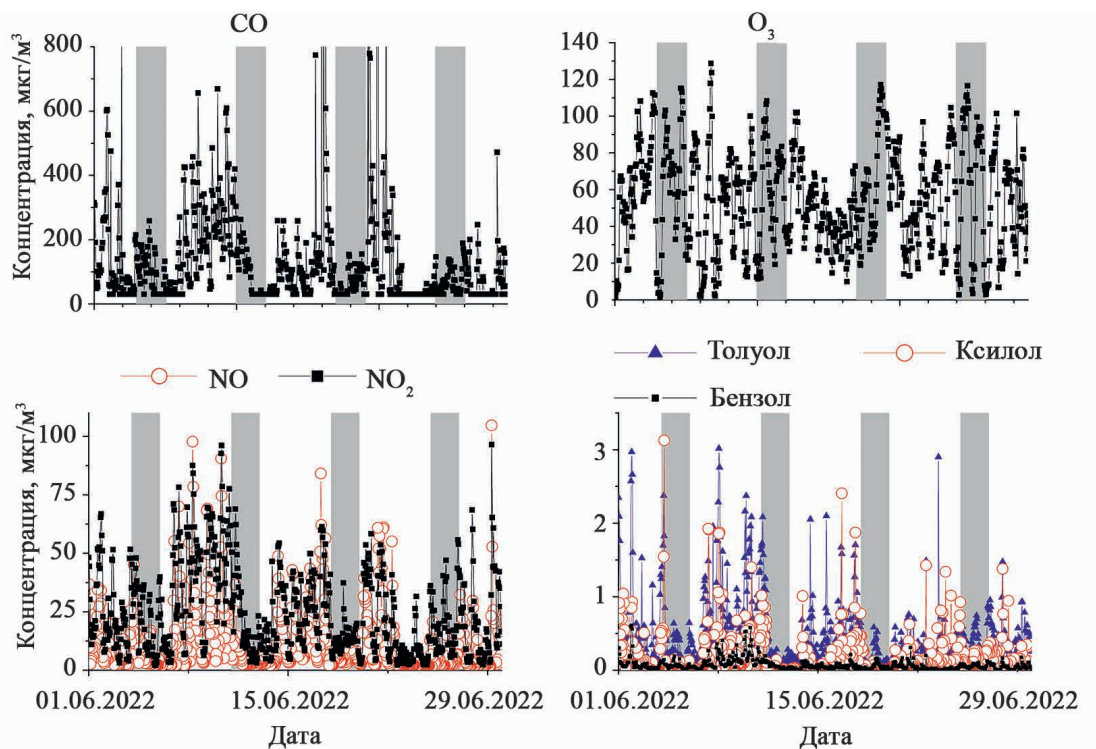


Рис. 1. Результаты измерений концентраций загрязнений воздуха в июне 2022 г. в Гомеле: в выходные дни (соответствующие периоды выделены серым цветом) концентрации антропогенных загрязнений обычно снижаются, а концентрация приземного озона повышается, при этом меняющиеся метеорологические условия маскируют этот эффект

Fig. 1. Results of measurements of air pollution concentrations in June 2022 in Gomel. It can be seen that on weekends (corresponding periods are highlighted in gray) the concentrations of anthropogenic pollution usually decrease, while the concentration of ground-level ozone increases. Changing meteorological conditions masks this effect

Среднемесячные концентрации загрязнений воздуха в разные годы. Среднемесячные значения концентраций на конкретном пункте наблюдений иногда существенно различаются в разные годы, и это вряд ли может быть связано с изменением климата. Климат, безусловно влияющий на уровень загрязнения городского воздуха, так быстро не меняется. К тому же, иногда наблюдаются тенденции разной направленности

³Ежегодник состояния атмосферного воздуха. [Электронный ресурс]. URL: <https://rad.org.by/articles/vozduh/> (дата обращения: 12.01.2023).

в изменении концентраций отдельных загрязнений на пунктах одного города и в разных городах. Очевидно, что такие эффекты не могут быть интерпретированы названной причиной.

Возможными причинами также могут являться изменения в номенклатуре и интенсивности источников загрязнений. И эта причина представляется основной. В последние десятилетия развитие автомобильного транспорта оказывает существенный вклад в загрязнение воздуха. Качественный состав и относительный вклад отдельных выбрасываемых транспортом загрязнений практически одинаков во всех городах, поэтому разница в процентном соотношении концентраций отдельных антропогенных загрязнений между разными городами определяется не связанными с транспортом источниками. Иначе мы наблюдали бы только изменение абсолютных уровней загрязнений при сохранении относительных вкладов отдельных составляющих. Иными словами, наблюдаемые отличия в качественном составе загрязнений обусловлены исключительно изменением списка и производительности промышленных предприятий, функционирующих в конкретном городе или его окрестностях.

Анализ результатов наблюдений за загрязнениями воздуха в городах Беларуси основывается на их среднемесячных концентрациях, определенных за весь анализируемый период. В [12; 13] анализировались только те месяцы, в течение которых можно было получить данные о концентрациях полного списка загрязнений, регистрируемых на конкретном автоматическом пункте НСМОС. И это обосновывалось необходимостью использования полученной информации для исследования поведения приземного озона в условиях антропогенного загрязнения воздуха. В настоящей работе мы отказались от такого ограничения, что позволило заметно увеличить объем данных в отношении каждого отдельного загрязнения или их группы. Здесь и далее используется нумерация автоматических пунктов наблюдений, принятая в Белгидромете. То, что в статье упоминаются только пункты 04 и 06 в Могилеве, не означает, что не рассмотрены данные с пунктов 01–03, 05 и т. д.: других автоматических станций в этом городе нет.

Далее представлены результаты обработки среднемесячных данных о следующих загрязнениях или их группах: приземный озон, оксид углерода, оксид и диоксид азота, летучие органические соединения (сумма концентраций бензола, толуола и ксилола) в единицах ppb.

Дополнительных пояснений требует процедура расчета средних. На первом этапе результаты наблюдений усредняются около метеорологических сроков (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 ч по Гринвичу). Процедура усреднения работает, если данных наблюдений в интервале (срок –1 ч) – (срок +1 ч) не менее 2-х. Иначе считается, что данные на заданный срок отсутствуют. Далее на основании данных, относящихся к суточным срокам, рассчитываются среднесуточные значения, если число сроков с данными превышает 6. Среднемесячные значения рассчитываются на основе среднесуточных, если получено не менее 20 среднесуточных значений, иначе среднемесячное значение не формируется. Такая процедура используется с целью обеспечения корректного учета суточного и сезонного хода концентраций загрязнений при расчете их среднемесячных значений.

Результаты, представленные на рис. 2–8, требуют краткого пояснения. Во-первых, среднемесячные значения концентрации конкретного загрязнения не всегда получены для каждого месяца заданного года. Поэтому многолетние месячные средние определены для каждого месяца на основании разного числа лет наблюдений. Иногда количество таких лет очень мало.

Во-вторых, на рисунках среднемесячных концентраций заметны существенные межгодовые различия. Одной из возможных причин таких различий являются меняющиеся метеорологические условия. Другой – меняющиеся источники загрязнения воздуха и их интенсивность. Третьей возможной причиной может быть низкое качество измерений.

На рис. 2–8 каждая кривая относится к отдельному году и обозначена уникальными символами и цветами в соответствии с табл. 1. На всех последующих рисунках концентрации приведены в единицах ppb. Это логично, поскольку эффективность участия в химических реакциях отдельных загрязнений в первую очередь зависит от количества их молекул в единице объема, а не от веса этих молекул. В нормальных условиях концентрации 1 мкг/м³ рассматриваемых веществ соответствует 0.86 ppb CO, 0.52 ppb NO₂, 0.8 ppb NO, 0.5 ppb O₃, 0.31 ppb бензола, 0.26 ppb толуола, 0.23 ppb ксилола. После перевода в единицы ppb суммарные концентрации бензола, толуола и ксилола обозначаются как ЛОС (летучие органические соединения).

В заповеднике (рис. 2) концентрации антропогенных загрязнений воздуха значительно ниже городских. Поэтому масштаб по осям ординат для антропогенных загрязнений на этом рисунке существенно увеличен. Заметное повышение концентрации оксида углерода в зимнее время объясняется интенсификацией печного отопления в деревнях на территории и в окрестностях заповедника, торможением термической конвекции и интенсификацией регионального переноса. Следует также обратить внимание на снижение концентраций оксидов азота и летучих органических соединений в последние годы. Сведения об оксиде углерода в заповеднике для начала рассматриваемого периода, к сожалению, отсутствуют. Слабая изменчивость сезонного хода концентраций оксида углерода и тенденции снижения с годами концентраций оксидов азота и ЛОС характерны также и для более высоких их концентраций в областных городах

(рис. 3–8). Концентрации приземного озона в заповеднике – одни из самых высоких из-за практически отсутствующих антропогенных загрязнений, способствующих разрушению озона в условиях Беларуси.

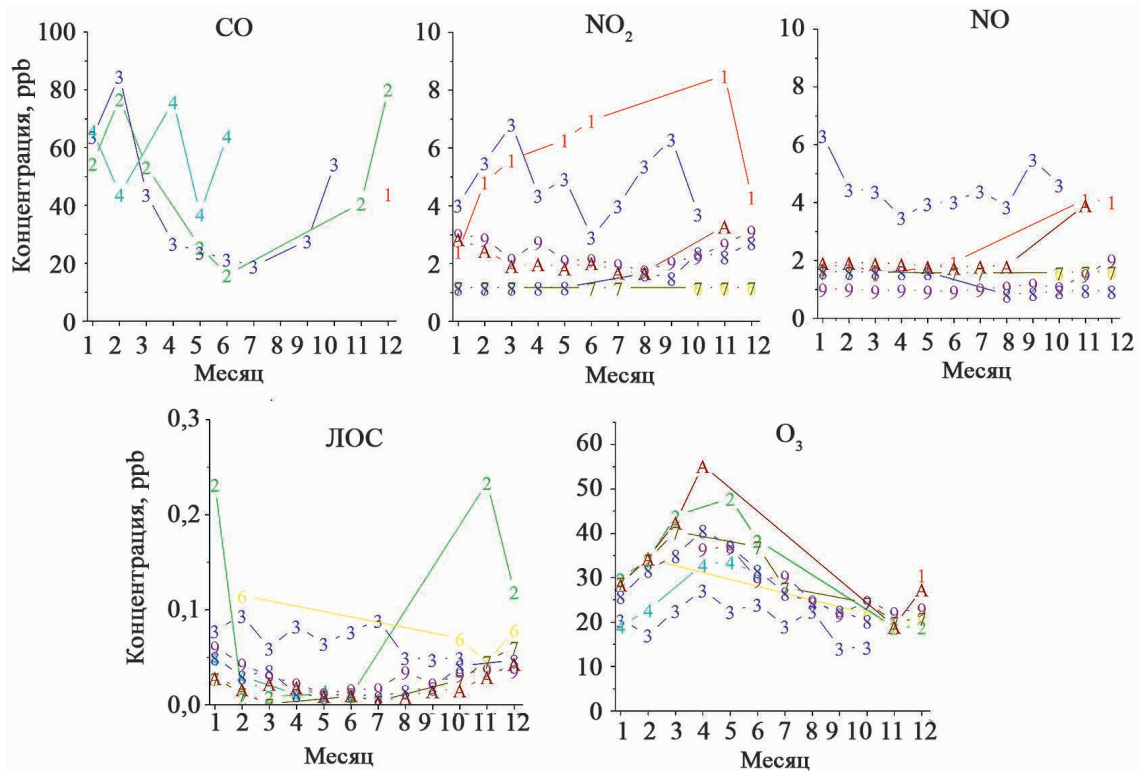


Рис. 2. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO₂) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O₃) в разные годы в Березинском биосферном заповеднике, пункт 01

Fig. 2. Monthly average concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC), and concentrations of ground-level ozone (O₃) in the Berezinsky Biosphere Reserve, site 01

Таблица 1

Соответствие между годом и обозначением кривых на рис. 2–8

Table 1

Correspondence between year and designation of curves in fig. 2–8

Год	Символ	Цвет
2012	0	Черный
2013	1	Красный
2014	2	Зеленый
2015	3	Синий
2016	4	Голубой
2017	5	Пурпурный
2018	6	Желтый
2019	7	Темно-желтый
2020	8	Темно-синий
2021	9	Фиолетовый
2022	A	Винный

В Бресте (рис. 3) концентрации антропогенных загрязнений существенно выше, чем в заповеднике. Среднемесячные концентрации оксида углерода не сильно меняются от года к году (2015 г. несколько выпадает из общей картины). Заметно некоторое снижение концентраций диоксида азота и летучих органических соединений в последние два года. Среднемесячные концентрации приземного озона слабо меняются с годами.

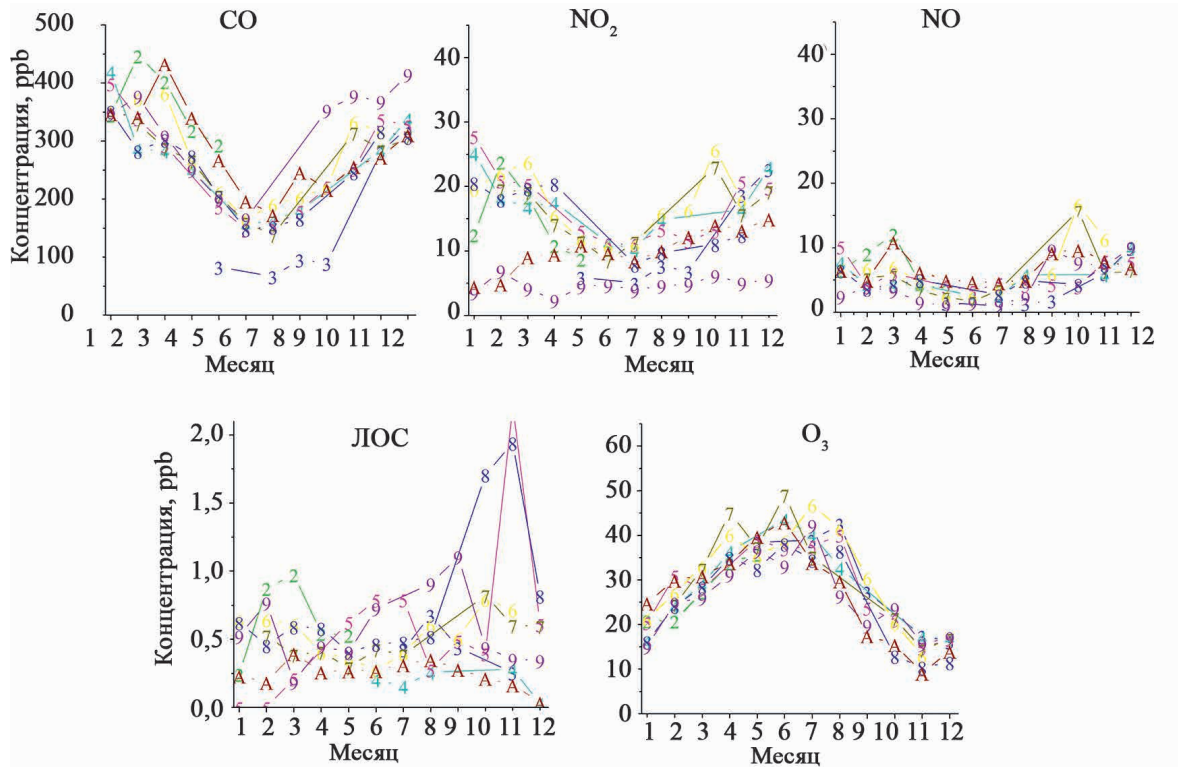


Рис. 3. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO₂) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛЮС) и приземного озона (O₃) в разные годы в Бресте, пункт 01

Fig. 3. Average monthly concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O₃) in different years in Brest, site 01

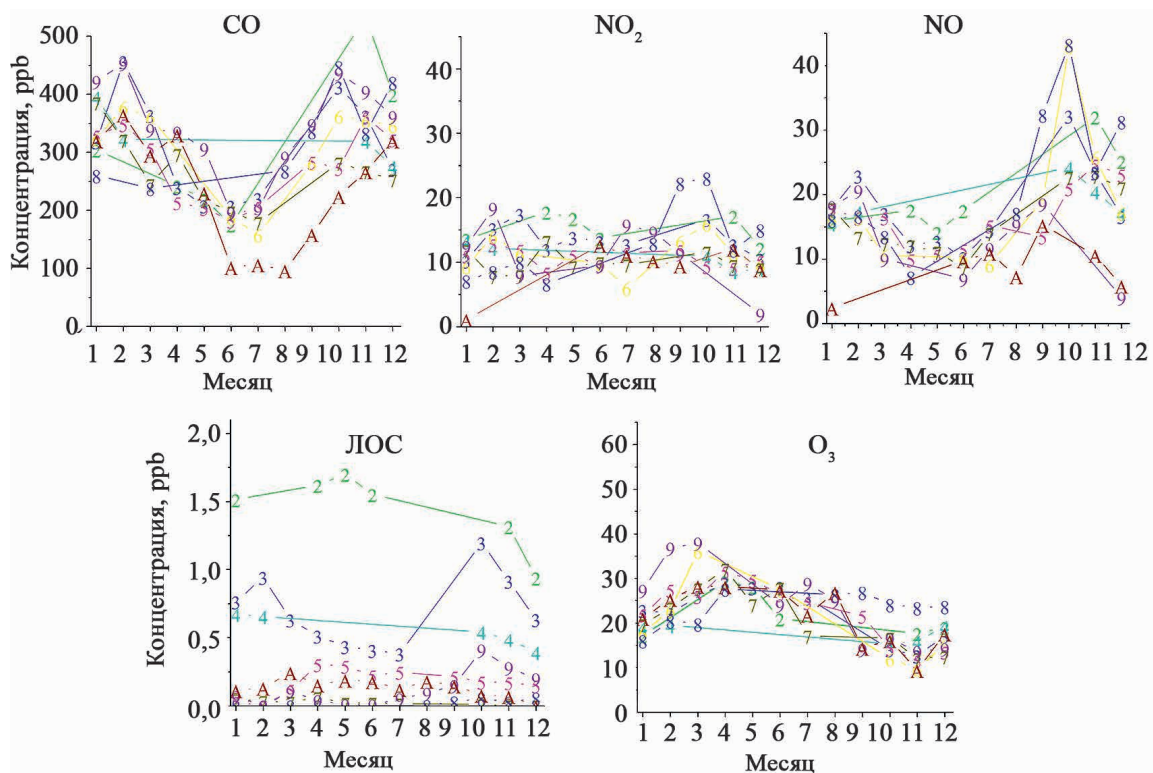


Рис. 4. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO₂) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛЮС) и приземного озона (O₃) в разные годы в Гомеле, пункт 14

Fig. 4. Average monthly concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O₃) in different years in Gomel, site 14

В Гомеле (рис. 4) в последние годы почти не выражен сезонный ход концентрации оксида азота и ЛОС (отсутствует летнее снижение), четко заметно снижение концентрации ЛОС с годами. Концентрации озона низки по сравнению с другими городами, и практически отсутствует весенне-летний максимум. Скорее всего, эти особенности обусловлены специфическими метеорологическими условиями в Гомельской обл. В качестве примера можно указать на повысившуюся частоту пыльных бурь в последние годы.

Среднемесячные концентрации антропогенных загрязнений в Гродно в разные годы приведены на рис. 5. Обращает на себя внимание заметное увеличение концентрации оксида углерода во второй половине 2021 г. и первой половине 2022 г., а также сильные флуктуации концентрации ЛОС в 2022 г. на фоне тенденции ее снижения с годами. Среднемесячные концентрации приземного озона в разные годы в основном слабо отличаются друг от друга.

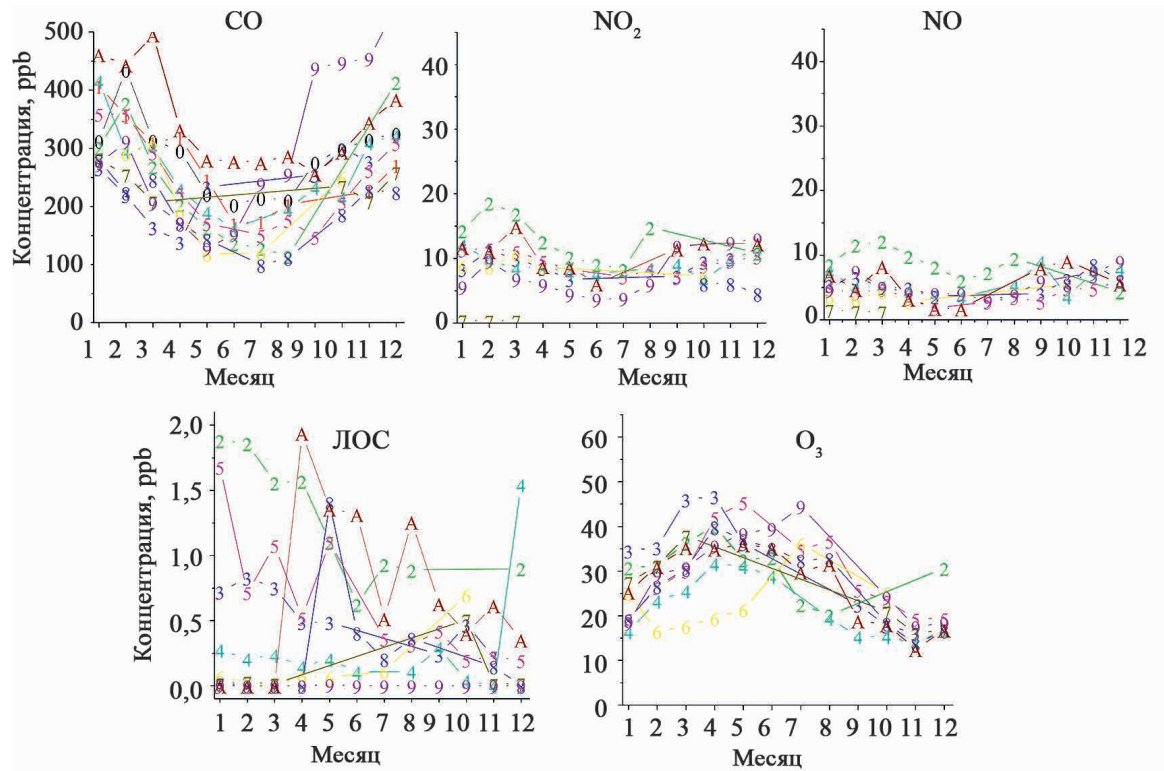


Рис. 5. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO₂) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O₃) в разные годы в Гродно, пункт 07

Fig. 5. Average monthly concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O₃) in different years in Grodno, site 07

В Могилеве на пункте 04 (рис. 6) заметно снижение концентраций всех загрязнений с годами за исключением оксида углерода: его концентрации незначительно изменяются от года к году. То же самое можно сказать и о концентрациях приземного озона за исключением 2013 г. Есть основания предполагать, что данные по озону за этот год не соответствуют действительности: во-первых, они резко отличаются от слабо меняющихся среднемесячных в другие годы, а во-вторых, они намного превышают значения 2013 г. в «чистом» районе города. Пункт 04 расположен в промышленном районе города, и там концентрации антропогенных загрязнений обычно выше, а приземного озона – ниже, чем на пункте 06, находящемся в «спальном» районе Могилева (рис. 6, 7).

Также не понятны причины «странного поведения» оксида углерода на пункте 06, концентрации которого в 2019 и 2020 г. выросли по сравнению с 2012, 2013 гг., а затем начали резко снижаться. Существенные изменения в концентрациях CO с годами на пункте 04 в промышленном районе можно было бы объяснить, сославшись на преобразования в производстве, однако для пункта в «спальном районе» они действительно выглядят странно.

В последние годы концентрации оксидов азота и летучих органических соединений на обоих пунктах наблюдений снизились и слабо меняются с годами. Концентрации приземного озона на пункте 06 заметно выше, чем на пункте 04, что является следствием меньшего уровня антропогенного загрязнения воздуха в этом районе.

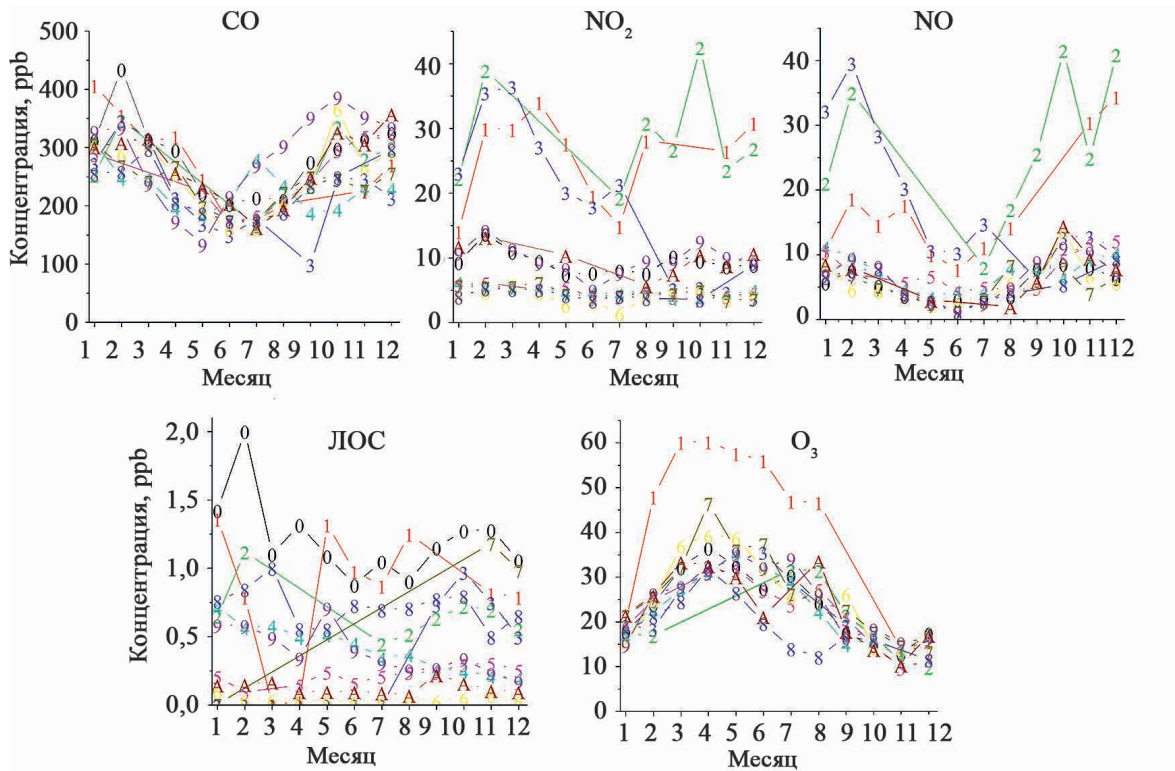


Рис. 6. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO₂) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O₃) в разные годы в Могилеве, пункт 04

Fig. 6. Monthly average concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O₃) in different years in Mogilev, site 04

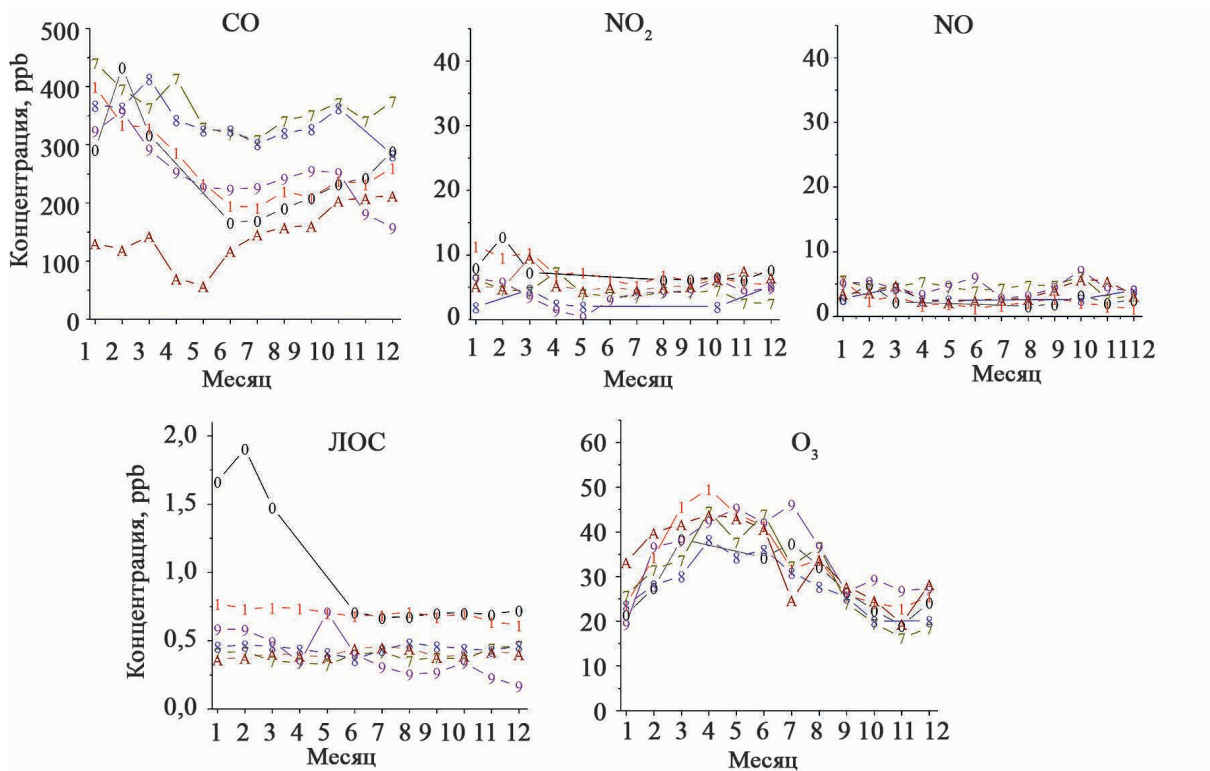


Рис. 7. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO₂) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O₃) в разные годы в Могилеве, пункт 06

Fig. 7. Monthly average concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O₃) in different years in Mogilev, site 06

В Витебске среднемесячные значения (рис. 8) определены для небольшого числа лет наблюдений, однако охватывают почти весь период 2012–2022 гг. Концентрации оксида углерода в течение этого периода слабо менялись. Наблюдается более существенный разброс в среднемесячных значениях за разные годы концентраций оксидов азота, и заметно снижение в последние годы концентраций ЛОС. Также заметно снизились концентрации приземного озона в последние годы.

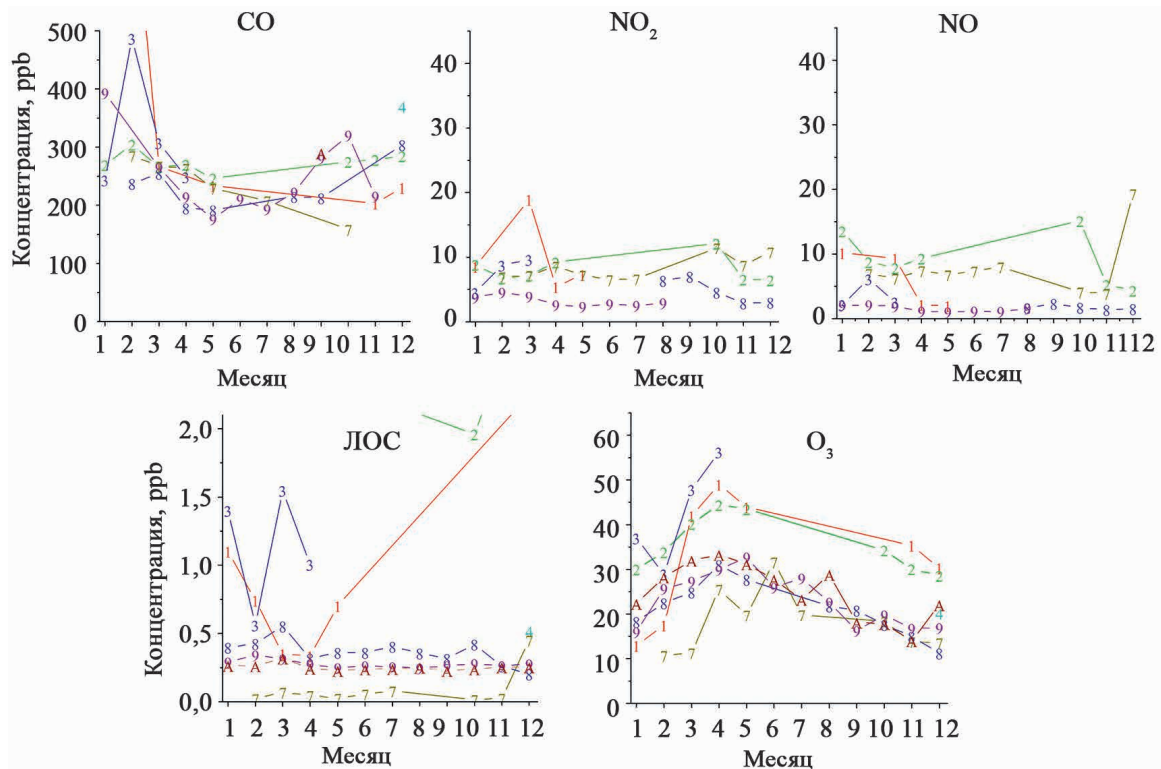


Рис. 8. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO₂) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O₃) в разные годы в Витебске, пункт 03

Fig. 8. Monthly average concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O₃) in different years in Vitebsk, site 03

В Минске функционируют 5 автоматических пунктов наблюдений за качеством воздуха, однако количество данных наблюдений мало, и поэтому рисунки со среднемесячными значениями за отдельные годы не приводятся. Больше всего наблюдений проведено на пункте 11, по которым можно судить о заметном снижении загрязнения воздуха оксидами углерода и азота за обсуждаемый период. О концентрациях летучих органических соединений такое сказать нельзя из-за ограниченного объема данных.

Многолетние средние месячных концентраций загрязнений. Полученные среднемесячные значения использованы для расчета многолетних средних для данного месяца и пункта наблюдений. В табл. 2 представлено количество лет, на основании которых было определено многолетнее среднее месячное значение концентрации каждого загрязнителя воздуха на каждом пункте наблюдений. В колонках, относящихся к отдельным загрязнителям, последовательно указаны количества лет, за которые удалось рассчитать многолетние средние их концентраций для каждого месяца года на конкретном пункте наблюдений. Можно заметить, что на некоторых пунктах наблюдений количество лет, использованных для расчета среднего, весьма невелико. Иногда встречаются и нулевые значения. А самые полные данные получены на пункте 04 г. Могилева.

На рис. 9, 10 приводятся многолетние средние месячные значения концентраций для городов, в которых имеются несколько пунктов наблюдений. Значения получены посредством усреднения месячных данных с разных пунктов наблюдений города и представляют усредненные характеристики загрязнения городского воздуха.

Из рис. 9 следует, что наиболее высокий уровень загрязнения воздуха оксидом углерода в Минске фиксируется на пунктах 04 (бывший Радиаторный завод) и 16 (Уручье), оксидами азота – на пунктах 04 и 11 (Курасовщина), а летучими органическими соединениями – на пунктах 11 и 13 (Дражня). Самые высокие концентрации приземного озона определяются на пункте 01 (Обсерватория), самом чистом в отношении почти всех исследуемых антропогенных загрязнений. Это еще раз подтверждает сказанное ранее о том, что специфика и уровень антропогенного загрязнения воздуха в городах Беларуси не способствуют генерации повышенных концентраций озона, а подавляют ее.

Таблица 2

Количество лет наблюдений, использованных для расчета многолетних средних месячных концентраций загрязнений воздуха на пунктах наблюдений (последовательно по месяцам года)

Table 2

Number of years of observations used to calculate long-term average monthly air pollution concentrations at observation sites (successively by months of the year)

Город, пункт	СО	NO ₂ , NO	ЛОС	O ₃
Заповедник 01	3,3,2,2,3,3,1,0,1,1,1,2	6,6,6,4,5,5,4,4,3,5,6,5	7,8,6,5,6,7,5,4,4,6,5,7	6,7,5,5,5,6,4,3,3,5,5,6
Брест 01	7,8,8,7,8,7,7,6,5,6,8,7	7,8,8,7,7,6,8,7,5,6,8,6	6,7,7,6,7,7,7,5,6,8,6	7,8,8,7,8,7,8,7,5,6,8,7
Гомель 14	9,7,7,6,6,7,6,3,5,7,9,9	9,7,6,5,4,7,6,3,5,6,8,9	9,8,7,7,6,7,6,3,5,8,9,9	9,8,7,6,4,7,5,3,4,8,9,9
Гродно 07	9,9,9,8,8,4,6,6,5,8,7,7	8,8,8,7,6,5,3,4,5,6,5,6	9,9,9,8,8,5,6,6,5,7,7,7	9,9,9,8,8,5,6,5,4,8,7,7
Могилев 04	11,10,9,9,10,10,11,10,10,10,10,11	11,11,8,9,10,9,10,10,9,10,10,11	11,10,8,9,9,9,10,9,9,11,11	11,11,9,10,10,10,10,10,10,10,10,11
Могилев 06	6,6,6,5,5,6,6,6,6,6,5,6	6,5,6,5,5,4,4,5,5,6,5,6	6,6,6,5,5,6,6,6,6,6,6,6	6,6,6,5,5,6,6,6,6,6,5,6
Витебск 03	4,5,6,5,5,1,2,2,3,3,3,4	4,4,5,4,3,2,2,2,1,3,3,3	6,7,7,6,4,4,3,3,5,5,7	6,7,7,6,3,3,3,3,4,5,6
Минск 01	3,2,3,1,1,0,1,2,2,2,2,1	1,1,1,1,2,1,1,2,1,1,0,1	3,3,3,2,2,1,1,2,1,2,2,2	5,5,4,3,3,2,2,2,2,4,3,4
Минск 04	1,2,3,4,5,1,1,1,2,2,2,2	1,2,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1	1,4,4,3,4,2,2,3,2,2,2,3	4,6,7,5,6,3,3,4,3,4,5,4
Минск 11	6,5,5,5,5,4,5,4,4,6,6,6	5,5,5,5,5,4,5,2,2,5,4,5	3,4,3,3,3,2,3,2,2,3,2,2	6,6,6,5,5,5,5,4,4,6,6,6
Минск 13	3,3,4,3,4,1,2,3,3,2,1,2	1,0,1,2,3,1,1,2,1,0,0,1	4,2,2,3,4,2,2,4,2,2,1,3	6,5,5,3,6,4,4,6,5,5,4,5
Минск 16	3,3,3,2,2,3,2,3,2,4,4,4	2,2,2,2,2,2,2,2,2,4,4,4	3,3,3,2,2,1,1,1,2,3,3,4	0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0

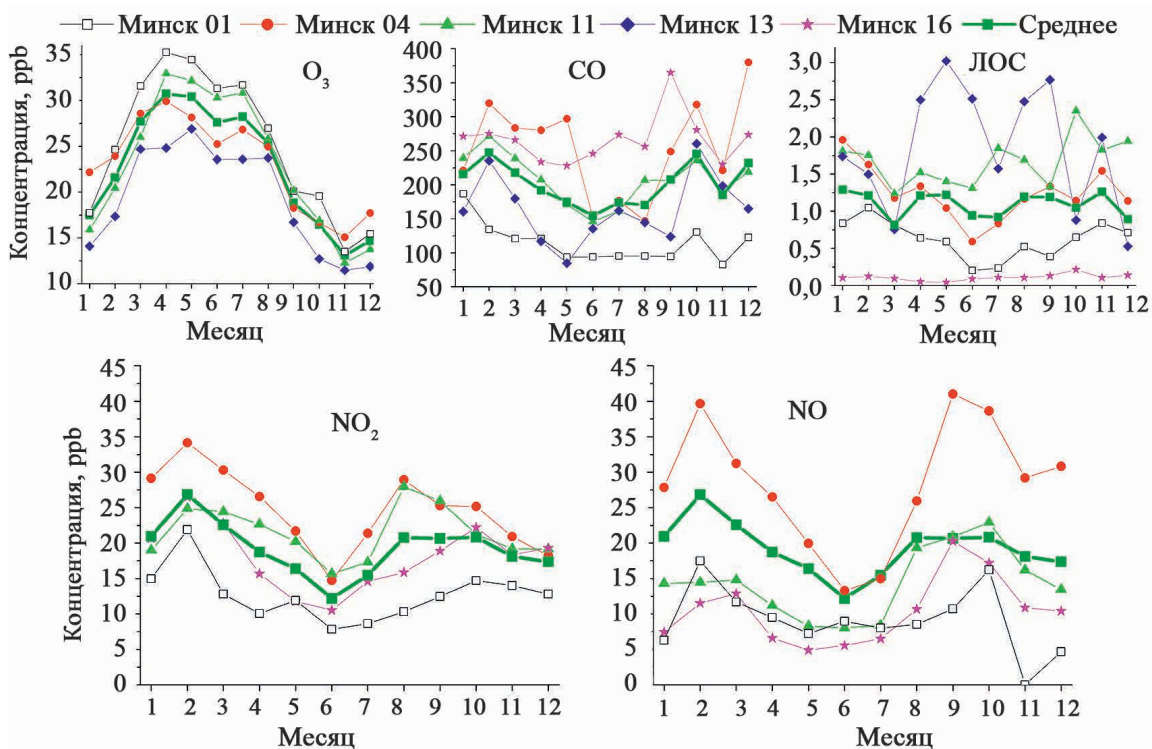


Рис. 9. Усредненные за годы наблюдений среднемесячные концентрации озона и антропогенных загрязнений воздуха на разных пунктах в г. Минске, а также результат усреднения по всем пунктам

Fig. 9. Monthly average concentrations of ozone and anthropogenic air pollution averaged over the years of observations at different sites in Minsk, as well as the result of averaging over all sites

Аналогичные результаты представлены и на рис. 10 для г. Могилева. В городе имеются 2 пункта наблюдений: один (04) расположен в промышленном районе, второй (06) – в «спальном». Среднемесячные концентрации CO и летучих органических соединений не сильно различаются, хотя более высокие концентрации оксида углерода зарегистрированы на «чистом» пункте. Концентрации оксидов азота в спальном районе оказываются значительно ниже, чем в промышленном. А концентрации приземного озона заметно выше.

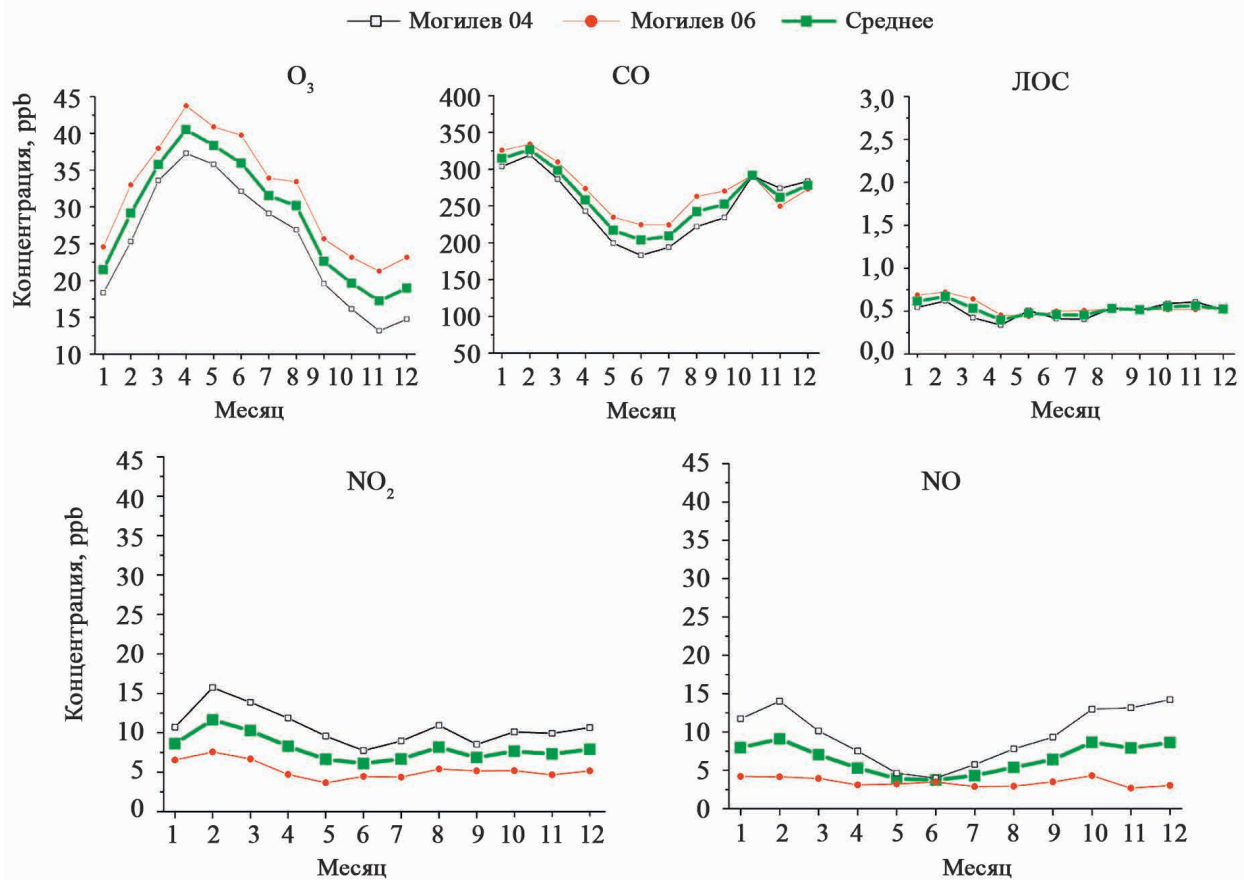


Рис. 10. Усредненные за годы наблюдений среднемесячные концентрации озона и антропогенных загрязнений воздуха на разных пунктах в г. Могилеве, а также результат усреднения по всем пунктам

Fig. 10. Monthly average concentrations of ozone and anthropogenic air pollution averaged over the years of observations at different sites in the city of Mogilev, as well as the result of averaging over all sites

На рис. 11 представлен осредненный за время наблюдений сезонный ход концентраций рассматриваемых антропогенных загрязнений воздуха и приземного озона в областных городах Беларуси и Березинском биосферном заповеднике. Осреднение проведено также и по пунктам наблюдений, если их в городе больше одного. Как и следовало ожидать, самый чистый воздух – в Березинском биосферном заповеднике. Однако можно заметить, что в Бресте, Могилеве и Гродно концентрации приземного озона в весенне-летний период оказываются выше, чем в заповеднике, несмотря на существенно более высокие концентрации антропогенных загрязнений в городах по сравнению с заповедником. Объяснение следует искать в различии метеоусловий и трансграничном переносе загрязнений и озона.

Концентрации оксида углерода слабо различаются в отдельных городах, наиболее высокие – в Гомеле, наиболее низкие – в Минске. Что касается летучих органических соединений, то здесь все наоборот: самые высокие – в Минске, самые низкие – в Гомеле. А по уровню загрязнения оксидами азота оба названных города являются лидерами среди областных центров республики.

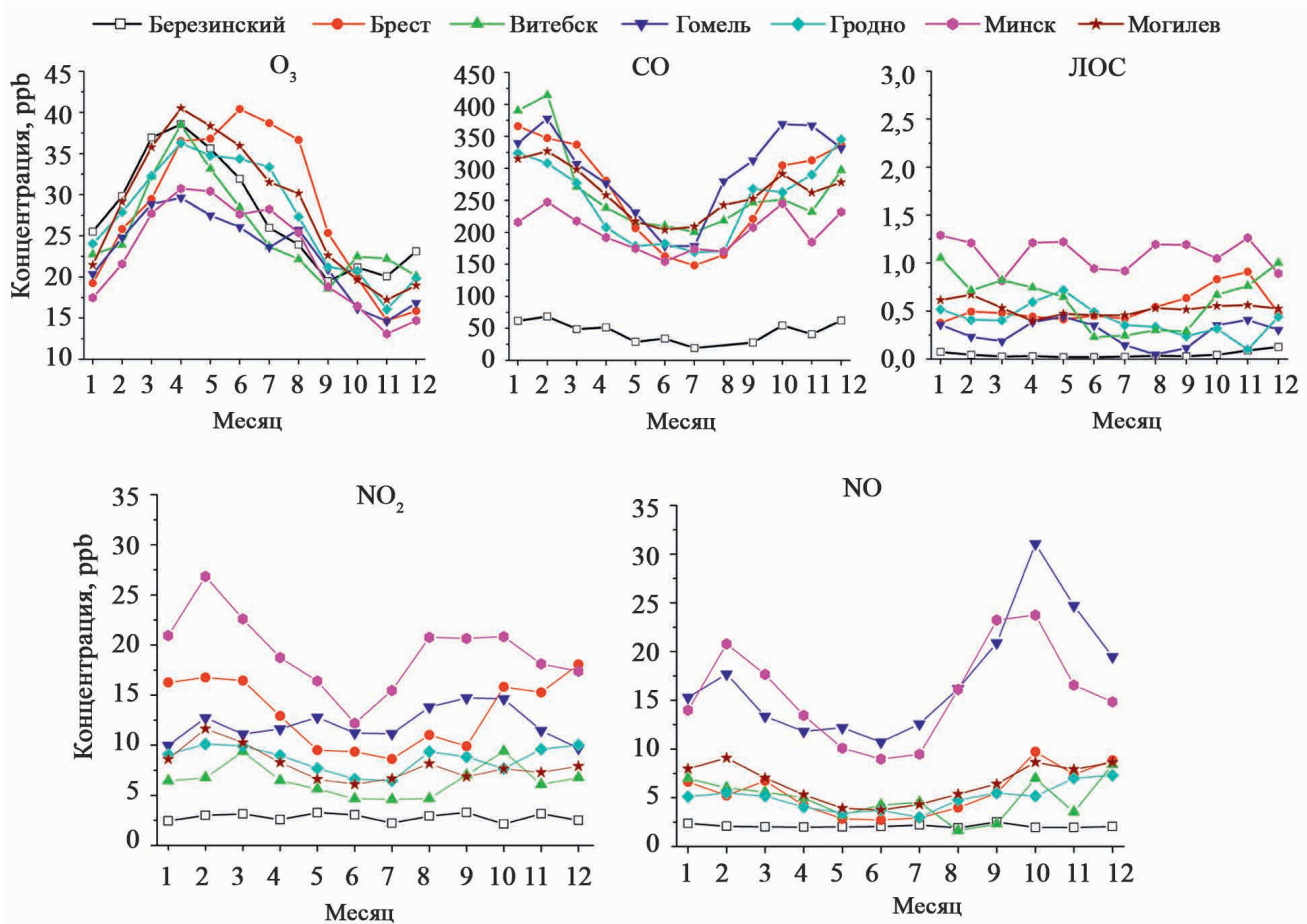


Рис. 11. Многолетние средние среднемесячных значений концентраций антропогенных загрязнений воздуха и приземного озона в областных городах Беларуси и Березинском биосферном заповеднике

Fig. 11. Long-term averages of average monthly values of concentrations of anthropogenic air pollution and ground-level ozone in the regional cities of Belarus and the Berezinsky Biosphere Reserve

Заключение

Основным недостатком проведенного анализа следует считать неполноту данных наблюдений о загрязнении воздуха (табл. 2). Это обусловлено нехваткой измерительных приборов, проблемами их калибровки, слабыми связями с международными институтами и программами, осуществляющими сбор и анализ данных мониторинга качества воздуха, регламентирующими вопросы аппаратного обеспечения мониторинга и аттестации приборов.

Общие выводы могут быть сделаны в отношении сезонного хода концентраций загрязнений: почти все из них максимальны в феврале, затем падают к лету и растут в осенний период до следующего февраля. Только с ЛОС четкой повторяющейся сезонной зависимости во всех пунктах наблюдений не выявлено. Общее снижение концентраций загрязнений в летнее время объясняется уменьшением вертикальной устойчивости атмосферы, интенсификацией ее вертикального перемешивания и разбавлением концентраций загрязнений в приземном слое воздуха.

Выявленное снижение в последние годы концентраций антропогенных загрязнений в городах также требует более детального анализа для выяснения его причин. Две возможные причины – уменьшение выбросов промышленными предприятиями и постоянно меняющийся климат, приводящий к интенсификации очищения городского воздуха.

Объяснению особенностей загрязнения воздуха в отдельных городах может помочь анализ информации об источниках загрязнений и их интенсивности. Если основной вклад в выбросы оксида углерода и оксидов азота вносит транспорт, то с летучими органическими соединениями ситуация более сложная, поскольку их мощными источниками могут быть и отдельные промышленные предприятия.

Альтернативный вариант заключается в разработке методики приведения результатов наблюдений за загрязнениями воздуха к одинаковым метеорологическим условиям. В таком случае их можно

непосредственно сравнивать для разных городов, отвлекаясь от возможных различий в метеорологических условиях. Это весьма перспективный подход, открывающий широкие возможности анализа экологической обстановки в городах Беларуси и выработки рекомендаций по ее улучшению. В этом направлении в НИИЦ МО в последние годы ведутся интенсивные исследования. В частности, построено уравнение регрессии, определяющее зависимость концентрации приземного озона от метеоусловий и антропогенных загрязнений [11; 14]. Уравнение позволяет объяснить более 60 % изменчивости озона. С его помощью была определена климатическая норма приземного озона в «условно чистой» от антропогенных загрязнений воздуха атмосфере на основании наблюдений в «грязных» городах [14; 15]. Безусловно, построенное уравнение требует улучшения. Однако такой подход по нивелированию влияния меняющихся метеоусловий на концентрации антропогенных загрязнений воздуха весьма перспективен и позволит объективно оценивать влияние источников загрязнения воздуха без скрупулезного мониторинга их производительности.

Библиографические ссылки

1. Sillman S. Tropospheric Ozone and Photochemical Smog. *Treatise on Geochemistry*; 2003;9:407–431.
2. Air quality and pollution city ranking (AQI) – IQAir [Internet, cited 2022 June 14]. Available from: <https://www.iqair.com/world-air-quality-ranking>.
3. Смог в Польше [Интернет, процитировано 14 июня 2022]. URL: <https://tsn.ua/ru/blogi/themes/world/cmog-v-polshe-1491591.html>.
4. Precursors and Indirect Emissions. In: Eggleston HS, et al, editors. IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1. General Guidance and Reporting. Hayama (Japan): Institute for Global Environmental Strategies (IGES); 2008.16 p.
5. Liudchik A, Pakatashkin V, Umreika S, Girgzdiene R. Role of Ozone Deposition in Occurrence of the Spring Maximum. *Atmosphere-Ocean*. 2013;53(1):42–49.
6. Zvyagintsev AM, Kuznetsova IN, Shalygina IY., Brusova NE, Arkhangelskaya AA, Lapchenko VA, Tereb NV, Lezina EA. Causes and factors of positive surface ozone anomalies in the Moscow region and on the southeastern coast of the Crimea. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2016; 29(6):551–560. <https://doi.org/10.1134/S1024856016060178>.
7. Божкова ВВ, Бурак РН, Козерук ББ, Людчик АМ, Мельник ЕА. Антропогенное загрязнение воздуха и приземный озон в городах Беларуси. *Природные ресурсы*. 2018;1:92–101.
8. Bozhkova VV, Liudchik AM, Umreika SD. Influence of meteorological conditions on urban air pollution. *Acta Geographica Silesiana*. 2020;14(4):5–21.
9. Brönnimann ST, Neu U. Weekend-weekday differences of near-surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions. *Atmospheric Environment*. 1997;31(8):1127–1135.
10. Людчик АМ, Мельник ЕА, Павленко ПН. Антропогенное загрязнение воздуха оксидом углерода и оксидами азота в городе Беларуси. В: *Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века. Часть 2*. Минск: ИВЦ Минфина; 2022. с. 155–158.
11. Людчик АМ, Мельник ЕА, Павленко ПН, Сычевский АО. Антропогенное загрязнение воздуха бензолом, толуолом и ксилолом в городах Беларуси. В: *Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века. Часть 2*. Минск: ИВЦ Минфина; 2022. с. 145–148.
12. Болотыко ЛМ, Людчик АМ, Покаташкин ВИ, Павленко ПН. Флуктуации поля концентрации приземного озона, обусловленные меняющимися метеоусловиями и степенью загрязнения воздуха. *Экологический вестник*. 2016;3:45–52.
13. Людчик АМ, Покаташкин ВИ, Болотыко ЛМ, Бурак РН, Павленко ПН, Умрейко СД. Статистическая оценка антропогенного воздействия на приземный озон. *Природные ресурсы*. 2015;1:95–105.
14. Божкова ВВ, Болотыко ЛМ, Людчик АМ, Павленко ПН, Умрейко СД. Климатическая норма приземного озона в чистой атмосфере Беларуси. *Природные ресурсы*. 2019;2:98–107.
15. Божкова ВВ, Людчик АМ, Мельник ЕА. Флуктуации поля приземного озона в Беларуси, обусловленные метеорологическими условиями и антропогенным загрязнением воздуха. *Природные ресурсы*. 2020;1:80–91.

References

1. Sillman S. Tropospheric Ozone and Photochemical Smog. *Treatise on Geochemistry*; 2003;9:407–431.
2. Air quality and pollution city ranking (AQI) – IQAir [Internet, cited 2022 June 14]. Available from: <https://www.iqair.com/world-air-quality-ranking>.
3. *Smog v Polshe* [Smog in Poland] [Internet, cited 2022 June 14]. Available from: <https://tsn.ua/ru/blogi/themes/world/cmog-v-polshe-1491591.html>. Russian.
4. Precursors and Indirect Emissions. In: Eggleston HS, et al, editors. IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1. General Guidance and Reporting. Hayama (Japan): Institute for Global Environmental Strategies (IGES); 2008.16 p.
5. Liudchik A, Pakatashkin V, Umreika S, Girgzdiene R. Role of Ozone Deposition in Occurrence of the Spring Maximum. *Atmosphere-Ocean*. 2013;53(1):42–49.
6. Zvyagintsev AM, Kuznetsova IN, Shalygina IY., Brusova NE, Arkhangelskaya AA, Lapchenko VA, Tereb NV, Lezina EA. Causes and factors of positive surface ozone anomalies in the Moscow region and on the southeastern coast of the Crimea. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2016; 29(6):551–560. <https://doi.org/10.1134/S1024856016060178>.
7. Bozhkova VV, Burak RN, Kozeruk BB, Lyudchik AM, Melnik EA. *Antropogennoye zagryazneniye vozdukha i prizemnyy ozon v gorodakh Belarusi* [Anthropogenic air pollution and ground-level ozone in the cities of Belarus]. *Prirodnyye resursy*. 2018;1:92–101. Russian.

8. Bozhkova VV, Liudchik AM, Umreika SD. Influence of meteorological conditions on urban air pollution. *Acta Geographica Silesiana*. 2020;14(4):5–21.
9. Brönnimann ST, Neu U. Weekend-weekday differences of near-surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions. *Atmospheric Environment*. 1997;31(8):1127–1135.
10. Liudchik AM, Melnik EA, Pavlenko PN. *Antropogennoe zagryaznenie vozduha oksidom ugleroda i oksidami azota v gorodah Belarusi* [Anthropogenic air pollution with carbon monoxide and nitrogen oxides in the cities of Belarus]. In: *Saharovskie chtenia 2022 goda: ekologicheskie problemy XXI veka. Chast 2*. Minsk: IVTs Minfina; 2022. p. 155–158. Russian.
11. Liudchik AM, Melnik EA, Pavlenko PN, Sychevskiy AO. *Antropogennoe zagryaznenie vozduha benzolom, toluolom i ksilolom v gorodah Belarusi* [Anthropogenic air pollution with benzene, toluene and xylene in the cities of Belarus]. In: *Saharovskie chtenia 2022 goda: ekologicheskie problemy XXI veka. Chast 2*. Minsk: IVTs Minfina; 2022. p. 145–148. Russian.
12. Bolotsko LM, Liudchik AM, Pokatashkin VI, Pavlenko PN. *Fluctuacii polya koncentracii prizemnogo ozona, obuslovlennye menyaschemisya meteoulovyami i stepeniu zagryaznenia vozduha* [Fluctuations in the ground-level ozone concentration field due to changing weather conditions and the degree of air pollution]. *Ekologicheski vestnik*. 2016;3:45–52. Russian.
13. Liudchik AM, Pokatashkin VI, Bolotsko LM, Burak RN, Pavlenko PN, Umreika SD. *Statisticheskaya ocenka antropogenno vozdzeistvia na prizemny ozon* [Statistical assessment of anthropogenic impact on ground-level ozone]. *Prirodnye resursy*. 2015;1:95–105. Russian.
14. Bozhkova VV, Bolotsko LM, Lyudchik AM, Pavlenko PN, Umreika SD. *Klimaticheskaya norma prizemnogo ozona v chistoi atmosphere Belarusi* [Climatic norm of ground-level ozone in the clean atmosphere of Belarus]. *Prirodnye resursy*. 2019;2:98–107. Russian.
15. Bozhkova VV, Liudchik AM, Melnik EA. *Fluctuacii polia prizemnogo ozona v Belarusi, obuslovlennye meteorologicheskimi uslovyami i antropogenym zagryazneniem vozduha* [Fluctuations in the ground-level ozone field in Belarus due to meteorological conditions and anthropogenic air pollution]. *Prirodnye resursy*. 2020;1:80–91. Russian.

Статья поступила в редколлегию 05.07.2023.
Received by editorial board 05.07.2023.

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 616-073.7+539.1.07:004

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ПРОЦЕДУРЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ РЕФЕРЕНТНЫХ УРОВНЕЙ

К. А. ВЕРЕНИЧ^{1),2)}, В. Ф. МИНЕНКО¹⁾

¹⁾Институт ядерных проблем, Белорусский государственный университет,
ул. Бобруйская, 11, 220006, г. Минск, Беларусь

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

Исследована входная доза на коже пациента при рентгенографии. Эта величина используется для определения диагностических референтных уровней (ДРУ). Данные уровни являются основным инструментом оптимизации радиационной защиты пациентов. Показаны возможности математического моделирования диагностического облучения для разработки ДРУ на примере стандартной рентгенографии органов грудной полости в переднезадней проекции. С этой целью использовался спектр излучения рентгеновской трубки, который рассчитывался с помощью компьютерной программы «СпекРу», а также применялся расчет переноса рентгеновского излучения методом Монте-Карло в воксельных антропоморфных фантомах. Фокальное пятно рентгеновской трубки моделировалось

Образец цитирования:

Веренич КА, Миненко ВФ. Применение математического моделирования рентгенодиагностической процедуры при разработке диагностических референтных уровней. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;3:31–40.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-31-40>

For citation:

Viarenich KA, Minenko VF. Application of mathematical simulation of X-ray radiography procedure to development of diagnostic reference levels. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;3:31–40. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-31-40>

Авторы:

Кирилл Андреевич Веренич – старший научный сотрудник лаборатории теоретической физики и моделирования ядерных процессов¹⁾; старший преподаватель кафедры ядерной физики физического факультета²⁾.

Виктор Федорович Миненко – кандидат биологических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической физики и моделирования ядерных процессов.

Authors:

Kiryl A. Viarenich, senior researcher at the laboratory of theoretical physics and simulation of nuclear processes^a; senior lecturer at the department of nuclear physics, faculty of physics^b.
Verenich@inp.bsu.by

Victor F. Minenko, PhD (biology), docent; lead researcher at the laboratory of theoretical physics and simulation of nuclear processes.
vminenko@list.ru

точечным источником. Прямоугольное поле пучка излучения формировалось с помощью свинцовых шторок. При этом рассчитаны входная доза на коже пациента, коэффициент обратного рассеяния и доза в плоскости приемника изображения для различных сочетаний параметров облучения (напряжения на рентгеновской трубке, расстояние от источника излучения до пациента, размер поля излучения, пол пациента). Установлена линейная зависимость входной дозы и радиационного выхода от квадрата анодного напряжения на рентгеновской трубке. Полученная зависимость позволяет рассчитывать эти величины при значениях анодного напряжения, отличных от того, при котором был измерен радиационный выход. Найдены оптимальные параметры облучения, при которых не будет превышено значение входной поверхностной дозы. Установлено, что входные дозы мало зависят от размера поля излучения при рентгенографии грудной клетки. Таким образом, подбор оптимальных условий облучения может осуществляться с опорой на диагностические референтные уровни до проведения облучения. Для этого может быть использована компьютерная программа с базой данных значений входной дозы, предварительно рассчитанных методом математического моделирования. Входная доза может определяться на основе коэффициента обратного рассеяния и измерений радиационного выхода.

Ключевые слова: входная доза; рентгеновское излучение; диагностическая рентгенография; метод Монте-Карло; вычислительный фантом.

Благодарность. Работа выполнена в рамках задания 3.1.04.9 ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии». Авторы выражают благодарность кандидату физико-математических наук А. А. Хрущинскому за помощь в создании воксельных фантомов.

APPLICATION OF MATHEMATICAL SIMULATION OF X-RAY RADIOGRAPHY PROCEDURE TO DEVELOPMENT OF DIAGNOSTIC REFERENCE LEVELS

K. A. VIARENICH^{a,b}, V. F. MINENKO^a

*^aInstitute for Nuclear Problems, Belarusian State University,
11 Babruiskaja Street, Minsk 220006, Belarus*

*^bBelarusian State University,
4 Niezaliežnasci Avenue, 4, Minsk 220030, Belarus
Corresponding author: K. A. Viarenich (verenich@inp.bsu.by)*

Entrance surface dose at patient skin during X-ray radiography was studied. This quantity is used for determination of diagnostic reference levels (DRLs). These levels are the main tool for optimisation of radiation protection of patients. Objective: show the possibility of computer simulation of diagnostic exposure for determination of DRLs for standard chest X-ray in anteroposterior projection. Materials and methods: X-ray spectrum was calculated using «SpekPy» computer software; X-ray transport was simulated using Monte-Carlo method and voxel anthropomorphic phantom. Focal spot of the X-ray tube was modelled with point source. Rectangular field of the radiation beam was formed by lead curtains. Results: entrance surface dose on the patient's skin, backscatter factor and dose on the surface of image receptor were calculated for various combinations of exposure parameters (X-ray tube voltage, focus-surface distance, field size). Linear dependence of entrance surface dose and X-ray tube output on square of X-ray tube anode voltage was found. The dependence, which we found, allows calculation of these quantities for anode voltage different from the value at which the X-ray tube output was measured. Optimal radiation parameters were found, under which the entrance surface dose would not be exceeded. It was also found that entrance surface doses do not have strong dependence on the radiation field size for chest X-ray. Conclusion: optimal settings of exposure can be made based on diagnostic reference levels before the exposure. It can be facilitated by using a computer program with a database of entrance surface dose values, which were calculated using computer simulation in advance. Entrance surface dose can be calculated based on backscatter factor and measurements of X-ray tube output.

Keywords: entrance surface dose; X-ray radiation; diagnostic radiography; Monte-Carlo method; computational phantom.

Acknowledgements. This work was performed under task 3.1.04.9 of State program of scientific research “Energy and nuclear processes and technologies”. The authors express their gratitude to PhD (physics and mathematics) A. A. Khrutchinsky for his help in creation of voxel phantoms.

Введение

Медицинское обучение, применяемое с целью визуализации внутренних органов и тканей, в настоящее время все шире используется не только для диагностики, но и для интервенционного лечения под визуальным контролем. При этом дозы могут достигать значений, при которых, наряду с вероятностью появления онкологических и наследственных заболеваний (стохастические эффекты), могут возникать вредные тканевые реакции (детерминированные эффекты), например, кожные реакции разной степени тяжести (эритема,

десквамация, эпидермит и др.). В такой ситуации величина эффективной дозы облучения, которая в определенной степени дает возможность определить ожидаемый стохастический эффект, не позволяет оценить возможность появления детерминированного эффекта. В частности, при выполнении большинства рентгенологических исследований максимальная дозовая нагрузка реализуется на входной поверхности кожи пациента, но при расчете величины эффективной дозы кожа дает вклад с весовым коэффициентом 0,01. Поэтому при приемлемом значении эффективной дозы можно получить переоблучение кожи пациента.

Поскольку возникновение и тяжесть детерминированных эффектов прямо (но не линейно) зависит от величины дозы облучения, для оценки возможности появления нежелательных тканевых эффектов должна использоваться измеряемая (или определяемая на основе измерения) дозовая характеристика. В качестве такой дозовой характеристики хорошо подходит входная доза пациента, которая для большинства диагностических процедур является показателем максимальной дозы для кожи в точке входа излучения на оси пучка. Входная доза на коже пациента создает максимальную дозовую нагрузку по сравнению с другими тканями и органами тела при выполнении рентгенографии, включая флюорографию, маммографию и томосинтез молочной железы.

Входная доза может быть непосредственно измерена на пациенте с помощью соответствующего дозиметра, определена через какую-то другую измеряемую величину (радиационный выход, произведение дозы на площадь и т. д.), а также через коэффициент обратного рассеяния излучения телом пациента [1]. Поэтому входная доза была принята в качестве одной из подходящих величин для использования в концепции диагностических референтных уровней (ДРУ) [2; 3].

Диагностические референтные уровни являются необходимым инструментом в процессе оптимизации медицинского облучения пациентов в диагностических и интервенционных процедурах. Концепция ДРУ была разработана для оптимизации радиационной нагрузки на пациентов при выполнении диагностических и интервенционных процедур, поскольку при медицинском облучении не устанавливаются ограничения на дозу облучения [2–4]. Суть концепции состоит в том, что на основе анализа практики конкретных диагностических исследований в медицинских учреждениях на типичном оборудовании в регионе или стране определяется такое разумно достижимое минимальное значение измеряемой дозиметрической величины, как 75 перцентиль медианных значений для медучреждений, обеспечивающих получение диагностической информации надлежащего качества для пациентов. Таким образом, числовое значение ДРУ привязано к определенным клиническим и техническим требованиям для выбранной задачи медицинской визуализации, выполняемой на выборке пациентов в пределах установленного весового диапазона. В Российской Федерации, Великобритании и странах Евросоюза в качестве такого диапазона выбран 70 ± 3 кг [5]. При появлении существенных изменений в технологии, новых протоколов визуализации, улучшении постобработки изображений или по мере улучшения аппаратного и программного обеспечения значения ДРУ должны обновляться. Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) рекомендует пересматривать ДРУ на регулярной основе через 3–5 лет или чаще [3].

Работа по введению новых или пересмотру действующих ДРУ для нового оборудования или вида исследований может продолжаться достаточно длительный промежуток времени в связи с набором соответствующей выборки пациентов. МКРЗ допускает для сокращения времени разработки ДРУ использование фантомов, но отмечает, что при этом не принимается во внимание влияние особенностей работы персонала при подготовке пациента непосредственно к процедуре обследования [3].

Вместе с тем использование референтного воксельного фантома МКРЗ, который по своим антропометрическим параметрам соответствует параметрам условного мужчины [6], для математического моделирования дозиметрических характеристик диагностической процедуры позволяет установить ДРУ. Наиболее надежные расчеты входной дозы обычно проводятся с помощью метода Монте-Карло [7], который реализован в ряде компьютерных программ [8]. Метод Монте-Карло путем разыгрывания траекторий отдельных частиц источника с последующим усреднением прямо моделирует стохастические процессы переноса и взаимодействия излучения со средой в условиях заданной геометрии облучения. Расчет величин, используемых для установления ДРУ, путем математического моделирования приобретает особую ценность при отсутствии результатов прямых измерений дозы.

Цель данной работы – показать возможность математического моделирования диагностического облучения для разработки ДРУ на примере стандартной рентгенографии органов грудной полости в переднезадней проекции.

Материалы и методы исследования

Компьютерные методы оценки дозовых нагрузок на пациента основаны на моделировании переноса излучения от источника к объекту облучения. В данной работе использована программа MCNP, которая, реализуя метод Монте-Карло, моделирует процессы взаимодействия фотонов и электронов в среде во всем диапазоне энергий, применяемых в медицине [9].

Моделирование рентгенодиагностической процедуры с использованием метода Монте-Карло, помимо модели переноса частиц, включает построение следующих:

- модель источника рентгеновского излучения с необходимыми техническими характеристиками рентгеновского аппарата;
- модель среды – соответствующая вычислительная модель (фантом) человека.

Модель источника излучения. В качестве источника излучения в данной работе выбран точечный источник рентгеновского излучения. Такое упрощение допустимо, поскольку для рассматриваемых процедур облучения расстояние от фокального пятна до тела пациента (60–80 см) более чем на два порядка величины превышает размеры фокального пятна (3–5 мм) рентгеновской трубки, и поэтому источник вполне можно считать точечным.

Спектр излучения рентгеновской трубки моделировался с помощью модели, которая реализована в компьютерной программе SpekPy [10]. Программа SpekPy, рассчитывающая спектр $\Phi(r, E)$, позволяет одновременно определять радиационный выход R_Y и интегральный флюенс частиц в точке r [10].

В процессе генерирования спектра излучения рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом следует учитывать влияние напряжения на аноде трубки, фильтрацию излучения и анодный угол [8]. Такая модель излучения рентгеновского аппарата, включающая спектр, не требовала моделирования внутреннего устройства и работы рентгеновской трубки, но учитывала следующие параметры:

- напряжение на аноде;
- расстояние «источник – приемник» изображения (РИП);
- размеры поля облучения на приемнике изображения;
- фильтрация излучения;
- пульсация анодного напряжения;
- расстояние «источник – устройство» формирования пучка излучения;
- характеристики формирующего устройства.

Программа MCNP позволяет моделировать источник, испускающий излучение в конус, но не в пирамиду. Поэтому модель была дополнена формирующим устройством в виде свинцовых шторок толщиной 5 мм для формирования прямоугольного пучка излучения. Просвет между шторками рассчитан так, чтобы на плоскости изображения формировалось прямоугольное поле нужных размеров. На рис. 1 показано компьютерное представление модели облучения органов грудной полости референтного фантома взрослого [6] в поперечной плоскости.

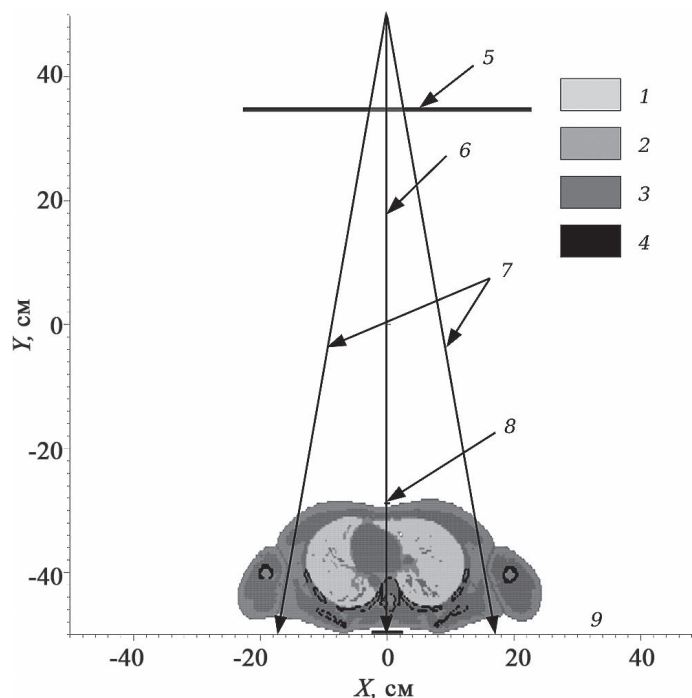


Рис. 1. Облучение органов грудной полости взрослого (изображение в компьютерной программе MCNP): 1 – легкое, 2 – жировая ткань, 3 – мышечная ткань, 4 – кортикальная кость, 5 – коллиматор, 6 – ось пучка, 7 – поле облучения, 8 – точка входа в тело центрального луча, 9 – плоскость изображения

Fig. 1. Exposure of chest of an adult (image in MCNP): 1 – lung, 2 – adipose tissue, 3 – muscular tissue, 4 – cortical bone, 5 – collimator, 6 – beam axis, 7 – radiation field, 8 – entrance point, 9 – image plane

Вычислительные фантомы. В целях унификации результатов, получаемых разными авторами, МКРЗ рекомендовала органные дозы людей от внешнего облучения рассчитывать с использованием вычислительных фантомов условного человека, разработанных на основе медицинских томографических изображений мужчины [6]. Антропометрические параметры фантомов подобраны таким образом, чтобы соответствовать показателям стандартного мужчины: рост – 176 см, а вес – 73 кг.

Условные вычислительные фантомы являются воксельными, состоящими как бы из набора кубиков. Они представляют собой трехмерные массивы индексов, относящихся к органам и тканям тела человека. Каждому вокселю ставится в соответствие индекс, характеризующий плотность и химический состав органа или ткани. Всего таких индексов 140. Визуализация вычислительного фантома в компьютерной программе MCNP показана на рис. 1.

Алгоритм расчета входной дозы. Обычно рентгенодиагностические процедуры проводятся без измерения входной дозы пациента с помощью дозиметра. Величина входной дозы пациента в таком случае может быть определена расчетным путем на основе известного значения радиационного выхода рентгеновского аппарата. Радиационный выход – это отношение мощности дозы в воздухе на оси первичного пучка рентгеновского излучения при заданном значении анодного напряжения, измеренной на фиксированном расстоянии (как правило, 1 м) от фокуса рентгеновской трубки, умноженной на квадрат этого расстояния, к силе анодного тока:

$$RY = \dot{D} \cdot I^{-1} r^2, \quad (1)$$

где RY – радиационный выход данной рентгеновской трубки, $\text{мГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{мА} \cdot \text{с})$, \dot{D} – мощность дозы в воздухе, мГр/с , I – сила тока, протекающего через анод рентгеновской трубки, мА ; r – расстояние от фокуса рентгеновской трубки до точки измерения радиационного выхода, м .

Радиационный выход каждой рентгеновской установки обычно определяется при периодической проверке основных параметров рентгеновского аппарата. Однако в случае отсутствия значения радиационного выхода для каких-либо условий облучения его можно рассчитать с помощью известного спектра излучения рентгеновской трубки. Если рентгеновская установка оснащена проходной камерой, вместо радиационного выхода может быть использована величина произведения дозы на площадь поля облучения.

Если напряжение, при котором измерен радиационный выход, равно напряжению, при котором проведено облучение пациента, то входная доза определяется следующим выражением [11]:

$$ESD = RY \cdot r^2 R^{-2} I \cdot t \cdot BSF, \quad (2)$$

где ESD – входная доза, мГр ; R – расстояние от фокуса рентгеновской трубки до кожи пациента (РИК), м ; t – длительность облучения, с ; BSF – коэффициент обратного рассеяния, отн. ед.

Величина BSF в нашей работе рассчитывалась на основе Монте-Карло вычислений как отношение

$$BSF = DE_{MC} \cdot (DI_{MC})^{-1}, \quad (3)$$

где DE_{MC} – входная доза, рассчитанная методом Монте-Карло в воздухе в точке входа центрального луча в тело, мГр/фотон ;

DI_{MC} – доза (воздушная керма) в воздухе, рассчитанная в той же точке, что и DE_{MC} , но в отсутствие пациента, мГр/фотон .

Если параметры, установленные на рентгеновском аппарате при измерении радиационного выхода, не соответствуют параметрам, при которых проведено облучение пациента, то радиационный выход может быть определен по следующему выражению:

$$RY(U) = a_0 + a_1 U + a_2 U^2 + a_3 U^3, \quad (4)$$

где U – напряжение на аноде рентгеновской трубки, при котором облучался пациент, кВ ; a_0, a_1, a_2 и a_3 – коэффициенты, определенные путем аппроксимации зависимости радиационного выхода от напряжения для каждого значения эквивалентной фильтрации рентгеновской трубки 0, 1, 2, 3, 4 и 5 мм Al [12].

Чтобы найти значение радиационного выхода, необходимо использовать коэффициенты a_0, a_1, a_2 и a_3 для ближайшего значения эквивалентной фильтрации, используемой в данном рентгеновском аппарате. Значения эквивалентной фильтрации, как правило, приведены в инструкции по эксплуатации рентгеновского аппарата или нанесены на корпусе рентгеновской трубки.

Рентгенографические параметры. Для расчета входных доз облучения нами использованы рентгенографические параметры, рекомендованные Минздравом РБ в инструкции по применению «Стандарты основных рентгенографических исследований» (далее – Инструкция)¹. В Инструкции при исследовании органов грудной полости в переднезадней проекции рекомендуются следующие параметры:

¹Стандарты основных рентгенографических исследований. Инструкция по применению № 178-1206. Утверждено первым заместителем Министра здравоохранения Республики Беларусь. Минск, 2007. 35 с.

1. Положение пациента: лежа (возможно сидя) лицом к рентгеновской трубке.
2. Способ рентгенографии: на столе или на вертикальной стойке, в зависимости от клинического состояния.
3. Размер фокусного пятна трубки: не более 1,2 мм.
4. Отсеивающая решетка: без решетки.
5. Чувствительность «экран – пленка»: класс 400.
6. РИП: 100–180 см.
7. Напряжение на трубке: 80–100 кВ.
8. Экспозиция: 1–3 мАс.
9. Автоматический экспонометр: не используется.
10. Диафрагмирование: по размерам кассеты.
11. Защитное экранирование: укрыть защитным средством брюшную полость по границе пучка излучения.

Рекомендуемая входная поверхностная доза для среднего взрослого – не более 200 мкГр. По Инструкции данная входная поверхностная доза фактически является рекомендуемым значением регионального диагностического референтного уровня.

Результаты исследования и их обсуждение

Расчеты входной дозы при рентгенографии грудной полости в переднезадней проекции были выполнены для референтного фантома мужчины МКРЗ. В вычислениях использована фильтрация 2,5 мм Al в соответствии с атласом рентгенологических укладок [13]. Диафрагмирование пучка рентгеновских лучей моделировалось согласно размерам пленок 35×35 см и 30×40 см. Вычисления выполнялись для экспозиции 1 мАс и значений напряжения на рентгеновской трубке 80 кВ, 90 кВ и 100 кВ. Экспозицией в данной работе названо произведение анодного тока I на время облучения t . Расчеты были выполнены для значений фокусного расстояния «источник – пленка» (РИП) от 100 до 180 см, для РИП = 100 см расстояние от фокуса до поверхности фантома взрослого мужчины составило 79 см.

В табл. 1 представлены результаты расчета входной и выходной дозы для названных режимов облучения при РИП = 100 см, а также показаны значения радиационного выхода и коэффициента обратного рассеяния для каждого варианта облучения. Радиационный выход рассчитывался согласно формуле (1) для $r = 100$ см. Для конкретного напряжения на трубке и РИП величина радиационного выхода не зависит от размеров поля облучения и величины экспозиции.

Таблица 1

Входная и отношение входной дозы к выходной при рентгенографии органов грудной полости

Table 1

Entrance surface dose and relation of entrance surface dose to dose at the image receptor plane during chest X-ray

U , кВ	Размер пленки, см	RY , мГр/мАс	Входная доза, мГр	Отношение	BSF
80	35×35	0,082	0,184	62,3	1,40
80	30×40	0,082	0,184	64,6	1,40
90	35×35	0,100	0,230	49,6	1,44
90	30×40	0,100	0,229	50,4	1,42
100	35×35	0,119	0,276	40,6	1,45
100	30×40	0,119	0,275	41,8	1,44

Значения входной дозы для другой экспозиции, например, $I \cdot t = 3$ мАс получаются простым умножением входной дозы на 3.

Выше было отмечено, что установленный в Инструкции региональный ДРУ для среднего взрослого составляет 200 мкГр. Как показывают результаты расчетов, в табл. 1 рекомендуемая входная доза 200 мкГр не будет превышена только для напряжения на трубке 80 кВ. Для того чтобы не было превышения для более высоких значений напряжения на трубке, нужно подбирать другие наборы допустимых значений фокусного расстояния и экспозиции. Математическое моделирование позволяет перед началом облучения

предложить соответствующий набор параметров облучения или оценить соответствие уже выбранного набора действующему ДРУ, основываясь на их связи со входной дозой.

Входная доза согласно формуле (3) линейно зависит от величины радиационного выхода RY , экспозиции $I \cdot t$ и коэффициента обратного рассеяния BSF , а также имеет обратную квадратичную зависимость от расстояния между фокусом трубки и поверхностью тела пациента R .

На рис. 2 показаны изменения значений дозы в воздухе (без учета обратного рассеяния) и входной дозы в зависимости от значения квадрата анодного напряжения для фантома взрослого мужчины в поле облучения 35×35 см². С помощью *Microsoft Office 365* проведена линейная аппроксимация обеих зависимостей. Обе величины практически линейно зависят от квадрата напряжения ($R^2 > 0,999$). Входная доза также, как и радиационный выход (равный дозе в воздухе, деленной на экспозицию), имеет практически квадратичную зависимость от напряжения на рентгеновской трубке. Немного более высокий коэффициент наклона для входной дозы по сравнению с радиационным выходом объясняется дополнительным вкладом в ее величину зависимости коэффициента обратного рассеяния от напряжения. В работе, посвященной моделированию радиационного выхода RY , было показано, что коэффициент наклона прямой RY изменяется в зависимости от того, какой частоты напряжение подается на рентгеновскую трубку (однофазное, трехфазное или высокочастотное) [14].

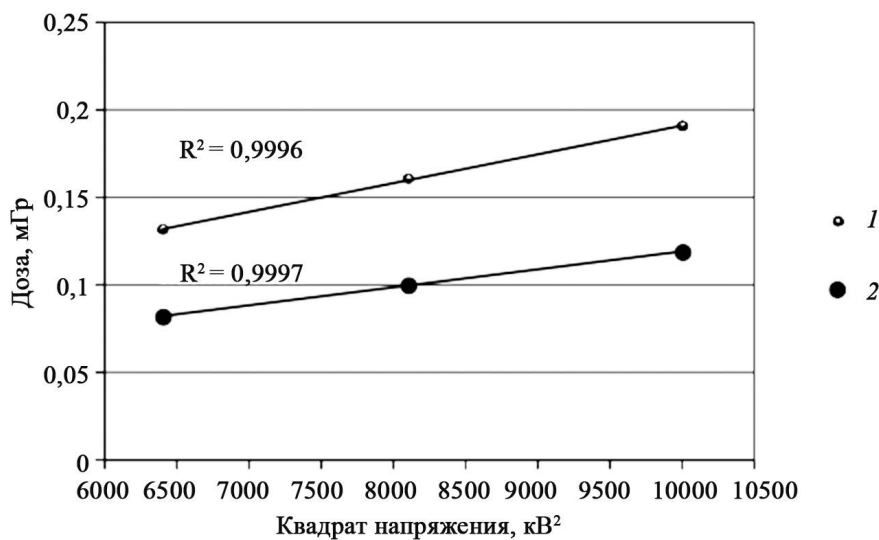


Рис. 2. Зависимости дозы на входной поверхности от квадрата напряжения на рентгеновской трубке: 1 – с учетом обратного рассеяния; 2 – без учета обратного рассеяния.

Fig. 2. Dependence of the entrance surface dose on the square of X-ray tube voltage: 1 – including backscatter, 2 – free-in-air.

Увеличение анодного напряжения с 80 до 100 кВ (на 25 %) в процедуре рентгенографии грудной полости в переднезадней проекции без изменения прочих параметров облучения приводит к увеличению входной дозы в 1,5 раза. При этом коэффициент обратного рассеяния изменяется только на 2 %. С ростом анодного напряжения спектр рентгеновского излучения становится более жестким. В табл. 1 на это указывает уменьшение отношения входной дозы к выходной с ростом напряжения.

Входная доза изменяется обратно пропорционально квадрату значения РИК согласно формуле (2). В табл. 2 показано изменение величины входной дозы в зависимости от РИК для референтного фантома взрослого мужчины при анодном напряжении 90 кВ и размера пленки 35×35 см.

Как следует из табл. 2, увеличение РИК в два раза (от 79 до 159 см) приводит к снижению входной дозы более чем в 4 раза (от 0,225 до 0,052 мкГр). При анодном напряжении 90 кВ и РИП = 180 см входная доза облучения для фантома мужчины не будет превышать рекомендованное значение 200 мкГр для любых значений экспозиции в диапазоне от 1 до 3 мАс. Для значений экспозиции не более 2 мАс и значениях РИП от 140 см и более входная доза также не будет превышать рекомендованного значения 200 мкГр.

Из данных табл. 1 и 2 следует, что величина BSF изменяется в зависимости от анодного напряжения (от энергии излучения) и толщины фантома. Однако зависимость эта не сильная. В научной литературе отмечается, что величина BSF также зависит от фильтрации, размера поля облучения и в значительной степени от материала облучаемой ткани, анодного угла и РИК [14; 15]. Из табл. 1 не видно зависимости BSF от размера поля облучения, поскольку отличие поля 30×40 см² от поля 35×35 см² по площади составляет всего 2 %. Данные табл. 2 свидетельствуют, что разница значений BSF для РИК = 79 см и РИК = 159 см составляет не более 4 %. На рис. 3 показана зависимость коэффициента BSF от толщины

эквивалентного фильтра, которая получена для фантома взрослого мужчины и тех же значений анодного напряжения (90 кВ) и поля облучения (35×35 см²), но для РИП = 100 см.

Таблица 2

Зависимость входной дозы от РИК для референтного фантома взрослого мужчины

Table 2

Dependence of entrance dose on focus-surface distance for reference adult male phantom

РИК, см	РИП, см	Входная доза, мГр	BSF
79	100	0,230	1,44
99	120	0,144	1,41
119	140	0,100	1,41
139	160	0,073	1,40
159	180	0,055	1,39

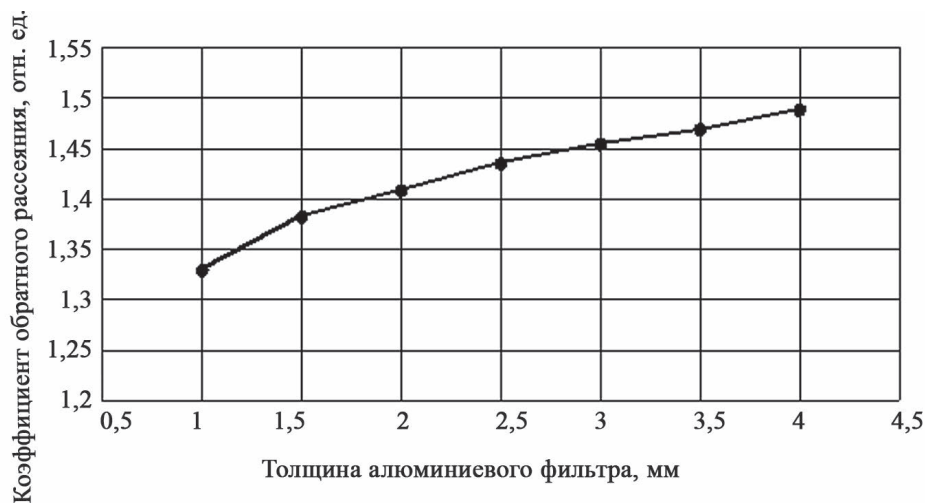


Рис. 3. Зависимость коэффициента обратного рассеяния от толщины эквивалентного фильтра.

Fig. 3. Dependence of backscatter factor on the thickness of equivalent filter.

Для практического применения коэффициент *BSF* может быть использован в расчетах с точностью до десятых долей без заметного увеличения погрешности вычисления входной дозы.

Изложенная методика определения входной дозы облучения реализуется в программном продукте «Оценка доз» [16]. Эта программа позволяет определять как входную дозу, так и вычислять эффективную дозу облучения (*E*) в соответствии с алгоритмом расчета, рекомендованным в Публикации № 103 МКРЗ [17]:

$$E = \sum_T w_T \cdot \left[\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right], \quad (5)$$

где w_T – взвешивающий коэффициент ткани *T*;

H_T^M – эквивалентная доза, оцененная для органа или ткани *T* условного мужчины;

H_T^F – эквивалентная доза, оцененная для органа или ткани *T* условной женщины.

Программный продукт «Оценка доз» может быть полезным для внедрения концепции ДРУ в клиническую практику, поскольку использованный в расчетах референтный фантом МКРЗ взрослого мужчины по своим антропометрическим параметрам соответствует человеку средних размеров. Данной программой можно воспользоваться бесплатно (программа поставляется на компакт-дисках или по согласованию с заказчиком). Программный продукт «Оценка доз» доступен всем организациям Республики Беларусь по запросу в НИИ ЯП БГУ.

Следует отметить, что данная программа может быть включена в систему управления рентгеновским аппаратом. С ее помощью можно использовать ДРУ в качестве индикатора соответствия входных параметров процедуры значениям, соответствующими оптимальной дозе облучения для данной процедуры. В частности, могут быть оценены величина экспозиции. В ряде рентгенодиагностических аппаратов возможно устанавливать только длительность облучения (если дополнительно к указанным параметрам будет задана сила тока, протекающего через анод). К таким параметрам также относится анодное напряжение.

Следовательно, ДРУ представляет собой индикатор разумно достижимого значения входной дозы на поверхности тела пациента. Проводя сравнение входной дозы в данном конкретном сеансе облучения с ДРУ можно судить о приемлемости параметров облучения. В случае систематического превышения ДРУ следует проводить мероприятия по оптимизации радиационной защиты, например, использовать более чувствительный приемник изображения.

Допустимая экспозиция, согласно формуле (2), определяется следующим образом:

$$I \cdot t = DRL \cdot R^2 \cdot (RY \cdot BSF \cdot r^2)^{-1}, \quad (6)$$

где DRL – рекомендованное значение ДРУ для заданной процедуры облучения; R – РИК для пациента; RY – фактический радиационный выход используемого рентгеновского аппарата для заданного анодного напряжения и фильтрации; BSF – коэффициент обратного рассеяния для данной процедуры облучения; r – расстояние от фокуса рентгеновской трубки до точки измерения радиационного выхода аппарата.

Для заданного анодного напряжения и экспозиции может быть определено допустимое значение РИП из следующего выражения:

$$\text{РИП} = \sqrt{\frac{RY \cdot BSF \cdot r^2 \cdot I \cdot t}{DRL}} + g, \quad (7)$$

где g – расстояние между точкой входа центрального луча в тело пациента и поверхностью пленки (приемника изображения).

Программа также может быть использована для разработки ДРУ на этапе определения средней или медианной величины приемлемой дозы для конкретного медучреждения. На этом этапе для типичных обследований когорты пациентов средних размеров собираются параметры процедуры облучения, благодаря которым обеспечивается наилучшее качество диагностической информации. Собранные параметры используются программой для расчета средней входной дозы облучения у человека средних размеров для конкретного рентгеновского аппарата:

$$\overline{ESD} = \frac{RY \cdot r^2}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{I_i \cdot t_i \cdot BSF_i}{R_i^2}, \quad (8)$$

где N – количество процедур облучения данного типа у пациентов, вошедших в исследуемую когорту.

Медиана будет соответствовать центральному значению в последовательном ряду всех полученных значений ESD_i .

В соответствии с концепцией ДРУ медианные значения соответствующих величин ESD при обследовании пациентов собираются в нескольких различных медицинских учреждениях. Затем значение 75-го перцентиля распределения медианных значений величин ДРУ в медицинских учреждениях по всей стране используется как национальный ДРУ.

Заключение

На примере стандартной рентгенографии органов грудной полости в переднезадней проекции в данной работе показана возможность применения компьютерной программы «Оценка доз», основанной на Монте-Карло-моделировании, для использования концепции ДРУ в практическом здравоохранении. Аналогичным образом может быть использована концепция ДРУ для других диагностических и интервенционных процедур. В рассмотренном примере в качестве базового параметра взят радиационный выход рентгеновского аппарата, поскольку он является его обязательной эксплуатационной характеристикой.

Библиографические ссылки

1. Patient Dosimetry for X Rays Used in Medical Imaging. *Journal of the ICRU*. 2005;5(2):1–113. Doi:10.1093/jicru_ndi016.
2. Valentin J. Radiation and your patient: A guide for medical practitioners: ICRP Supporting Guidance 2: Approved by ICRP Committee 3 in September 2001. *Annals of the ICRP*. 2001;31(4):1–52. Doi:10.1016/S0146-6453(02)00007-6.
3. Vañó E, Miller DL, Martin CJ, et al. ICRP Publication 135: Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. *Annals of the ICRP*. 2017;46(1):1–144. Doi:10.1177/01466453171717209.
4. Radiological protection and safety in medicine. *Annals of the ICRP*. 1996;26(2):1–31. Doi:10.1016/S0146-6453(00)89195-2.

5. Водоватов АВ. Практическая реализация концепции референтных диагностических уровней для оптимизации защиты пациентов при проведении стандартных рентгенографических исследований. *Радиационная гигиена*. 2017;10(1):47–55. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-47-55>.
6. Menzel HG, Clement C, DeLuca P. ICRP Publication 110. Realistic reference phantoms: an ICRP/ICRU joint effort. A report of adult reference computational phantoms. *Annals of the ICRP*. 2009;39(2):1–164. Doi:10.1016/j.icrp.2009.09.001.
7. Omrane LB, Verhaegen F, Chahed N, Mtimet S. An investigation of entrance surface dose calculations for diagnostic radiology using Monte Carlo simulations and radiotherapy dosimetry formalisms. *Physics in Medicine & Biology*. 2003;48(12):1809–24.
8. Kramer R, Khoury HJ, Vieira JW. CALDose_X – a software tool for the assessment of organ and tissue absorbed doses, effective dose and cancer risks in diagnostic radiology. *Physics in Medicine & Biology*. 2008;53(22):6437–59.
9. Miró R, Soler J, Gallardo S, Campayo JM, Diez S, Verdú G. MCNP simulation of a Theratron 780 radiotherapy unit. *Radiation Protection Dosimetry*. 2005;116(1–4):65–8.
10. Poludniowski G, Omar A, Bujila R, Andreo P. Technical Note: SpekPy v2.0—a software toolkit for modeling x-ray tube spectra. *Medical Physics*. 2021;48(7):3630–7.
11. Toivonen M. Patient Dosimetry Protocols in Digital and Interventional Radiology. *Radiation Protection Dosimetry*. 2001;94(1):105–8.
12. Boone JM, Seibert JA. An accurate method for computer-generating tungsten anode x-ray spectra from 30 to 140 kV. *Medical Physics*. 1997;24(11):1661–70.
13. Кишковский АН, Тютин ЛА, Есиновская ГН. *Атлас укладок при рентгенологических исследованиях*. Ленинград: Медицина; 1987. 519 с.
14. Kothan S, Tungjai M. An Estimation of X-Radiation Output using Mathematic Model. *American Journal of Applied Sciences* [Internet, cited 2023 February 6]. URL: <https://thescipub.com/abstract/ajassp.2011.923.926>
15. Petoussi-Hens N, Zankl M, Drexler G, Panzer W, Regulla D. Calculation of backscatter factors for diagnostic radiology using Monte Carlo methods. *Physics in Medicine & Biology*. 1998;43(8):2237–50.
16. Веренич К, Миненко В, Кутень С. Компьютерная программа для экспресс-оценки доз облучения пациентов при диагностической рентгенографии. *Здоровье и окружающая среда*. 2019;29:27–30.
17. Annex B and All references. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2–4):247–332. Doi:10.1016/j.icrp.2007.10.010.

References

1. Patient Dosimetry for X Rays Used in Medical Imaging. *Journal of the ICRU*. 2005;5(2):1–113. Doi:10.1093/jicru_ndi016.
2. Valentin J. Radiation and your patient: A guide for medical practitioners: ICRP Supporting Guidance 2: Approved by ICRP Committee 3 in September 2001. *Annals of the ICRP*. 2001;31(4):1–52. Doi:10.1016/S0146-6453(02)00007-6.
3. Vañó E, Miller DL, Martin CJ, et al. ICRP Publication 135: Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. *Annals of the ICRP*. 2017;46(1):1–144. Doi:10.1177/0146645317717209.
4. Radiological protection and safety in medicine. *Annals of the ICRP*. 1996;26(2):1–31. Doi:10.1016/S0146-6453(00)89195-2.
5. Vodovатов AV. Practical implementation of the diagnostic reference levels concept for the common radiographic examinations. *Radiacionnaja gigiena* [Radiation Hygiene]. 2017;10(1):47–55. Russian.
6. Menzel HG, Clement C, DeLuca P. ICRP Publication 110. Realistic reference phantoms: an ICRP/ICRU joint effort. A report of adult reference computational phantoms. *Annals of the ICRP*. 2009;39(2):1–164. Doi:10.1016/j.icrp.2009.09.001.
7. Omrane LB, Verhaegen F, Chahed N, Mtimet S. An investigation of entrance surface dose calculations for diagnostic radiology using Monte Carlo simulations and radiotherapy dosimetry formalisms. *Physics in Medicine & Biology*. 2003;48(12):1809–24.
8. Kramer R, Khoury HJ, Vieira JW. CALDose_X—a software tool for the assessment of organ and tissue absorbed doses, effective dose and cancer risks in diagnostic radiology. *Physics in Medicine & Biology*. 2008;53(22):6437–59.
9. Miró R, Soler J, Gallardo S, Campayo JM, Diez S, Verdú G. MCNP simulation of a Theratron 780 radiotherapy unit. *Radiation Protection Dosimetry*. 2005;116(1–4):65–8.
10. Poludniowski G, Omar A, Bujila R, Andreo P. Technical Note: SpekPy v2.0 – a software toolkit for modeling x-ray tube spectra. *Medical Physics*. 2021;48(7):3630–7.
11. Toivonen M. Patient Dosimetry Protocols in Digital and Interventional Radiology. *Radiation Protection Dosimetry*. 2001;94(1):105–8.
12. Boone JM, Seibert JA. An accurate method for computer-generating tungsten anode x-ray spectra from 30 to 140 kV. *Medical Physics*. 1997;24(11):1661–70.
13. Kishkovskii AN, Tyutin LA, Esinovskaya GN. *Atlas ukladok pri rentgenologicheskikh issledovaniyakh* [Atlas of placements during X-ray radiography examinations]. Leningrad: Meditsina; 1987. 519 p. Russian.
14. Kothan S, Tungjai M. An Estimation of X-Radiation Output using Mathematic Model. *American Journal of Applied Sciences* [Internet, cited 2023 February 6]. URL: <https://thescipub.com/abstract/ajassp.2011.923.926>
15. Petoussi-Hens N, Zankl M, Drexler G, Panzer W, Regulla D. Calculation of backscatter factors for diagnostic radiology using Monte Carlo methods. *Physics in Medicine & Biology*. 1998;43(8):2237–50.
16. Verenich KA, Minenko VF, Kuten SA. Computer program for rapid estimation of patients' radiation doses in diagnostic radiography. *Zdorov'e i okruzhayushhaya sreda* [Health and environment]. 2019;29: 27–30. Russian.
17. Annex B and All references. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2–4):247–332. Doi:10.1016/j.icrp.2007.10.010.

Статья поступила в редакцию 03.04.2023.
Received by editorial board 03.04.2023.

УДК 631.416.9(476)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ТЕССИЕРА И BCR ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВАНАДИЯ ПО ФОРМАМ НАХОЖДЕНИЯ В ПОЧВЕ

А. Н. НИКИТИН¹⁾, О. А. ШУРАНКОВА¹⁾, И. А. ЧЕШИК¹⁾, С. А. КАЛИНИЧЕНКО²⁾

¹⁾Институт радиобиологии, Национальная академия наук Беларуси,
ул. Федюнинского, 4, 246029, Гомель, Беларусь

²⁾Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,
ул. Терешковой, 7, 247618, г. Хойники, Гомельская обл., Беларусь

Исследовались методы последовательной экстракции форм ванадия из почвы для прогноза его биологической доступности и подвижности. Представлены данные о распределении ванадия в дерново-подзолистых почвах по формам с различной подвижностью и биологической доступностью. Сравнение двух схем последовательной экстракции (Тессьера и BCR) в отношении ванадия показывает относительную сопоставимость данных подходов для оценки распределения элемента по формам нахождения в почве. Значительные различия при использовании данных методов отмечены в доле формы ванадия, связанной с оксидами железа и марганца. Доля данной формы при выделении методом BCR более чем в 3 раза выше доли аналогичной формы, выделенной методом Тессьера. По степени биологической доступности, ванадий можно отнести к группе малодоступных тяжелых металлов. Ванадий, как правило, сосредоточен в неэкстрагируемой и фиксированной на почвенных минералах фракциях. Суммарная доля, приходящаяся на растворенную и обменную форму, ниже 2 %.

Ключевые слова: ванадий; формы нахождения; биодоступность; почва; последовательная экстракция.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE TESSIER AND BCR SEQUENTIAL EXTRACTION METHODS FOR THE EVALUATION OF VANADIUM SPECIATION IN THE SOIL

A. N. NIKITIN^a, O. A. SHURANKOVA^a, I. A. CHESHIK^a, S. A. KALINICHENKO^b

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

^bPolesye State Radiation-Ecological Reserve,
7 Tereshkovoy Street, Khoyniki 247618, Gomel region, Belarus
Corresponding author: O. A. Shurankova (shurankova@list.ru)

Образец цитирования:

Никитин АН, Шуранкова ОА, Чешик ИА, Калиниченко СА. Сравнительная оценка методов последовательной экстракции Тессьера и BCR для оценки распределения ванадия по формам нахождения в почве. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;3:41–49. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-41-49>

For citation:

Nikitin AN, Shurankova OA, Cheshik IA, Kalinichenko SA. Comparative assessment of the Tessier and BCR sequential extraction methods for the evaluation of vanadium speciation in the soil. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;3:41–49. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-41-49>

Авторы:

Александр Николаевич Никитин – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по научной работе.

Ольга Александровна Шуранкова – заместитель заведующего лабораторией радиоэкологии.

Игорь Анатольевич Чешик – кандидат медицинских наук, директор.

Сергей Александрович Калиниченко – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией спектрометрии и радиохимии.

Authors:

Aleksander N. Nikitin, PhD (agriculture); deputy director for research.

nikitinale@gmail.com

Olga A. Shurankova, deputy head of the laboratory of radioecology.

shurankova@list.ru

Ihar A. Cheshyk, PhD (medicine); director.

igor.cheshik@gmail.com

Sergey A. Kalinichenko, PhD (biology); head of the laboratory of spectrometry and radiochemistry.

s-a-k@list.ru

Tessier and BCR methods for fractionated extraction of forms of vanadium from soil were tested. The methods designed to predict pollutants bioavailability and behavior in the soil. Data on the vanadium speciation by forms with different mobility and biological availability in soddy-podzolic soils are presented. Comparison of two sequential extraction schemes regarding vanadium shows the relative comparability of approaches to assessing the distribution of the element according to the forms in the soil. Significant differences in the use of these methods were noted in the percentage of the vanadium associated with iron and manganese oxides. The proportion of this form according the BCR method is more than 3 times higher than the percentage of a similar form according the Tessier method. Vanadium can be attributed to the group of inaccessible heavy metals, it is hardly available to the root uptake of plants. Vanadium, as a rule, is concentrated in fractions that are not extractable and fixed on soil minerals. The total percentage in the water dissolved and ion-exchange forms is below 2 %.

Keywords: vanadium; speciation; bioavailability; soil; sequential extraction.

Введение

Тяжелые металлы в одном образце почвы одновременно находятся в различных физико-химических формах и входят в состав разных соединений. При этом они могут входить в состав ионов и нести положительный, выступая как катионы, либо отрицательный заряд, если являются анионами (хромовой, молибденовой, цинковой и др. кислот). Ионы амфотерных элементов, в зависимости от pH почвы, могут быть заряжены как положительно, так и отрицательно. Имеются в почве и нейтральные формы металлов, входящие в состав нерастворимых соединений или интегрированные в кристаллические решетки почвенных минералов.

Подвижность металлов в почве и биологическая доступность определяются формой их нахождения. Мигрируя в объеме почвы подвижные формы металлов легче поступают в ризосферу, накапливаются в растениях и могут включаться в пищевые цепочки, ведущие к человеку [1]. Наиболее доступны для корневого поглощения металлы, находящиеся в почвенном растворе и в почвенном поглощающем комплексе.

Для получения развернутой картины о формах нахождения металлов в почвах можно использовать последовательное фракционирование, заключающееся в последовательной экстракции металлов из одного образца почвы с использованием подобранных растворов. В зависимости от свойств экстрагирующего раствора в него переходят определенные формы тяжелого металла, например, ионообменная – преимущественно сорбированная в почвенном поглощающем комплексе, или сорбированная на несиликатных соединениях железа. Следует иметь в виду, что практически невозможно извлечь в вытяжку все количество элемента, содержащегося в той или иной форме. При разработке схемы последовательной экстракции приходится искать баланс между полнотой и селективностью извлечения той или иной формы металла.

Большинство методов последовательной экстракции построены на предположении, что в почве металлы находятся в следующих формах, извлекаемых последовательно: водорастворимые соединения, ионообменные катионы, специфически сорбированные на различных компонентах почвы катионы, связанные с органическими соединениями, оксидами и гидроксидами железа и марганца, соединения, интегрированные в кристаллические решетки почвенных минералов. Наиболее подвижными и доступными для корневого поглощения растениями являются водорастворимая и ионообменная формы тяжелых металлов. Специфически сорбированные формы менее подвижны, а формы, связанные с органическим веществом, оксидами и гидроксидами железа и марганца, практически не участвуют в миграции и не переходят в пищевые цепи.

Благодаря своим свойствам почва выступает мощным акцептором в отношении тяжелых металлов [2]. Поглотительная способность почв обусловлена наличием в них мелкодисперсной фракции различных минералов, органического вещества, минеральных и органических кислот, а также свободно живущих, ассоциативных и ризосферных микроорганизмов, эндо-микоризных грибов и т. д. Поглотительная способность в зависимости от того, чем она вызвана, подразделяется на физическую, химическую, биологическую и физико-химическую.

Физическая поглотительная способность почв в какой-то мере связана с величиной частиц минеральной фракции и быстро возрастает с уменьшением их размера, так как при этом увеличивается суммарная поверхность и адсорбирующая способность частиц. Однако характер поверхности имеет решающее значение для проявления поглотительных свойств последних. Глинистые или тяжелосуглинистые почвы, содержащие монтмориллонит, вермикулит и подобные им минералы, обладают большой поглотительной способностью. Почвы, имеющие одинаковый гранулометрический состав, могут существенно различаться емкостью катионного обмена. Так, глинистые почвы, минералогический состав которых представлен преимущественно каолинитом, могут обладать такой же поглотительной способностью, как супесчаные и песчаные почвы [3].

Одним из распространенных тяжелым металлов является ванадий (V). Содержание его в почве обусловлено как естественным, так и антропогенным происхождением. К природному источнику происхождения ванадия относится вулканическая активность и выветривание коренных пород [4]. Кларк ванадия в почвах Земли оценивается в 100 мг/кг [5]. По геологической классификации ванадий относят к сидерофилам [6]. Источниками антропогенного поступления ванадия в почву являются осадки городских сточных вод, а также применение удобрений и ископаемого топлива [7]. При выраженности подзолообразовательных процессов верхние горизонты почвы обедняются ванадием [8].

Высокие концентрации ванадия оказывают токсическое действие на биоту, однако в низких концентрациях в почве он стимулирует потребление калия и азота, а также важен для синтеза хлорофилла у растений [9].

Поведение ванадия в почвах изучено недостаточно. Наиболее распространены пятивалентные и четырехвалентные состояния его в почве [10]. Биодоступность ванадия зависит от степени окисления, наиболее мобильным является пятивалентное состояние V [11]. Данный элемент хорошо ассоциируется с органическим веществом, железосодержащими минералами. Ванадил-катион может образовывать комплексы с гуминовыми кислотами. Анионные формы ванадия наиболее мобильны в почвах и наиболее токсичны для почвенной биоты. Показано наличие прямой связи концентрации ванадия в почве с содержанием калия и марганца [12].

Актуальным является обоснование метода оценки распределения ванадия по формам с различной биологической доступностью и подвижностью в дерново-подзолистых почвах в природно-климатических условиях Республики Беларусь. Цель данной работы – экспериментальное сравнение схем Тессьера и BCR для последовательной экстракции ванадия из дерново-подзолистой почвы с одновременной оценкой распределения этого элемента по формам нахождения.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные участки заложены в Гомельском р-не с точной привязкой к географическим координатам. Пробы дерново-подзолистой почвы отбирали на глубине 20 см с помощью бура Малькова, имеющего внутренний диаметр 4 см согласно ГОСТ 17.4.3.01-83¹. Предварительная подготовка проб почвы осуществлялась согласно межгосударственному стандарту ГОСТ ISO 11464-2015².

Участки отбора проб:

1. Бардино – 59° 29' 20,8" с. ш., 30° 57' 47,3" в. д.
2. Урицкое-1 – 52° 28' 07,1" с. ш., 30° 48' 08,9" в. д.
3. Урицкое-2 – 52° 28' 06,3" с. ш., 30° 47' 54,3" в. д.
4. Красное – 52° 27' 51,1" с. ш., 30° 54' 53,1" в. д.
5. Пролетарий – 52° 28' 42,3" с. ш., 30° 56' 33,8" в. д.

Для определения форм нахождения ванадия в почвах была опробована трехстадийная процедура BCR³ последовательной экстракции и метод Тессьера, модифицированный и расширенный до семи стадий [13].

Экстракцию и последующее измерений содержания ванадия в каждой пробе проводилось в пятикратной повторности. Для определения влажности каждой партии образцов почвы высушили отдельно 1 г образца слоем миллиметровой толщины в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 105 ± 2 °С. Отсюда получали поправку на «абсолютно сухую массу», которую в дальнейшем применили ко всем полученным аналитическим значениям.

Метод BCR. Последовательную экстракцию физико-химических форм нахождения ванадия в почве осуществили, опираясь на метод BCR [14] с небольшими дополнениями. Для анализа использовали лабораторную посуду из боросиликатного стекла или полипропилена. Очищали посуду замачиванием в HNO₃ [4 моль/л] и неоднократно промывали дистиллированной водой перед использованием. На всех этапах использовали дистиллированную воду. Использовались следующие растворы.

Раствор А (0,11 моль/л уксусная кислота). Добавляли (в вытяжном шкафу) $25,0 \pm 0,1$ мл ледяной уксусной кислоты к приблизительно 0,5 л дистиллированной воды в литровой градуированной колбе из полипропилена, доводили до объема дистиллированной водой. Отбирали 250 мл этого раствора (уксусная кислота [0,43 моль/л]) и разбавляли до 1 л дистиллированной водой.

¹ГОСТ 17.4.3.01–83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб: введен РБ 17.12.92. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 1992. 8 с.

²ГОСТ ISO 11464-2015. Качество почвы. Предварительная подготовка проб для физико-химического анализа: введен РФ 01.07.16. Москва: Стандартинформ, 2015. 12 с.

³СТБ ISO 17294-1-2007. Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Ч. 1: введен РБ 23.10.07. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2007. 40 с.

Раствор В (0,5 моль/л гидроксиламмония хлорид). Брали 34,75 г гидроксиламмония хлорида и растворяли в 400 мл дистиллированной воды. Переливали раствор в литровую калиброванную колбу и добавили посредством калиброванной пипетки 25 мл HNO_3 [2 моль/л]. Доливали до литра дистиллированной водой. Готовили этот раствор в тот же день, когда проводили анализ.

Раствор С (8,8 моль/л перекись водорода). Использовали перекись водорода, поставляемую изготовителем, то есть стабилизированную кислотой до pH 2–3.

Раствор D (1,0 моль/л уксуснокислый аммоний). Растворяли 77,08 г уксуснокислого аммония в 900 мл дистиллированной воды. Доводили pH до $2,0 \pm 0,1$ концентрированной HNO_3 , и доливали до литра дистиллированной водой.

BCR-1 (шаг 1). Добавляли 40 мл раствора А к 1 г почвы в центрифужную пробирку на 100 мл, закрывали пробирку пробкой и встряхивали на вибросите (30 ± 10 об/мин) в течение 16 ч при 22 ± 5 °С, не допуская задержек между добавлением экстрагента и началом встряхивания. Затем отделяли экстракт от твердого остатка центрифугированием при 3000 g в течение 20 мин и декантировали надосадочную жидкость в пробирку из полиэтилена. Осадок промывали 20 мл дистиллированной воды, встряхивали в течение 15 мин на вибросите и центрифугировали в течение 20 мин при 3000 g. Декантированную надосадочную жидкость аккуратно сливали.

BCR-2 (шаг 2). Добавляли 40 мл свежеприготовленного раствора В к осадку от Шага 1 в центрифужной пробирке. Взбалтывали, а затем закрывали пробирку и встряхивали на вибросите (30 ± 10 об/мин) в течение 16 ч в 22 ± 5 °С. После добавления экстрагента и перед началом встряхивания не допускали задержек. Отделяли экстракт от твердого осадка центрифугированием и декантацией как в Шаге 1. Осадок промывали 20 мл дистиллированной воды с встряхиванием в течение 15 мин на вибросите, центрифугировали в течение 20 мин при 3000 g. Декантировали надосадочную жидкость и аккуратно вылили.

BCR-3 (шаг 3). Аккуратно добавляли 10 мл раствора С к осадку в центрифужной пробирке малыми порциями, чтобы избежать потерь из-за возможной бурной реакции. Свободно накрытую колпачком пробирку выдерживали при комнатной температуре в течение 1 ч, периодически встряхивая. Затем пробирку выдерживали в течение 1 ч на водяной бане при температуре 85 ± 2 °С. После этого колпачок снимали и добивались уменьшения объема до менее чем 3 мл дальнейшим нагреванием. Добавили 10 мл раствора С. Закрытую пробирку выдерживали на водяной бане 1 ч при 85 ± 2 °С. После этого объем жидкости уменьшали выпариванием приблизительно до 1 мл (не допуская полного высыхания). Добавляли 50 мл раствора D к остывшему влажному осадку и встряхивали в течении 16 ч при 22 ± 5 °С. После добавления экстрагента и перед началом встряхивания не допускали задержек. Отделяли экстракт от твердого осадка центрифугированием и декантацией, как в Шаге 1.

До анализа экстракты хранили в закрытых пробирках в холодильнике при температуре около 4 °С.

В качестве внутренней проверки, осадок после отделения *BCR-3* (*BCR-4*) растворяли в царской водке и общее количество извлеченного металла (то есть сумма *BCR-1* + *BCR-2* + *BCR-3* + *BCR-4*) сравнивали с полученным при растворении в царской водке отдельного (1 г) образца первоначального осадка.

Метод Тессьера. Оценка распределения тяжелых металлов по химическим формам, обладающим различной степенью биологической доступности, также осуществлялась методом последовательной экстракции по Тессьеру [16] с дополнениями.

Навеска почвы массой 5 г и помещалась в термостойкий стакан с последующей обработкой экстрагирующими растворами. На всех стадиях конечное соотношение проба : раствор составляло 1:10. Во всех фракциях, кроме финальной, определение ванадия осуществлялось в растворе после отделения осадка фильтрованием. Используются фильтры бумажные «синяя лента». После отделения каждой фракции осадок промывали дистиллированной водой – несколько раз небольшими объемами (3 раза по 20–30 мл).

T-1: обработка дистиллированной водой, pH=5–6, 24 ч при комнатной температуре и периодическом перемешивании (водорастворимая форма нахождения радионуклида);

T-2: обработка 1 моль/л аммонием уксуснокислым (NH_4Ac), pH=7, 2 ч при комнатной температуре (обменная форма нахождения радионуклида);

T-3: обработка 0,04 моль/л гидроксиламином солянокислым в 25 % уксусной кислоте (HAc), в течении 6 ч при 80 °С (форма, связанная с оксидами железа и марганца);

T-4: обработка 0,2 моль/л аммонием щавелевокислым + 0,1 моль/л щавелевой кислоты (раствор Тамма), pH=3–2, 1 ч при комнатной температуре (форма, связанная с полуторными оксидами железа и алюминия);

T-5: 30 % пероксид водорода + азотная кислота (2 капли), pH=2 в течение 6 ч при 80 °С (форма, связанная с органическим веществом почвы);

T-6: обработка 7 моль/л раствором азотной кислоты, в течение 6 ч при 80 °С (форма, прочно фиксированная на минеральных компонентах почвы);

T-7: остаток почвы после всех экстракций (неэкстрагируемая форма).

Измерение содержания V экстрактах. Содержание ванадия в экстрактах определяли с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой ELAN DRСe, согласно СТБ ISO 17294-2-2007⁴. Параметры работы масс-спектрометра оптимизировались перед серией измерений по стандартной процедуре. Для количественного определения ванадия в подготовленных растворах не использовалась реакционная ячейка. Ионизация атомов осуществлялась в кварцевой горелке под действием электромагнитного поля мощностью 1100 кВт. Детектор масс-спектрометра функционировал в импульсном режиме с напряжением 1050 В.

Для минимизации матричного эффекта, способного исказить результаты измерений, калибровочные растворы готовились методом стандартных добавок отдельно для каждой формы. Для приготовления калибровочных растворов использовался стандартный раствор *IV-ICPMS-71A* (Inorganic Ventures), содержащий ванадий и ряд других элементов в концентрации 10,0 мкг/л. В качестве холостых проб использовались растворы, полученные в соответствии с процедурами последовательной экстракции без добавления образца почвы на начальном этапе. Разбавления калибровочных растворов, холостой и измеряемых проб осуществлялось в 1 % растворе HNO₃, прошедшей процедуру очистки при субкритической температуре, с использованием деионизированной воды с проводимостью 18 МОм. Разбавления производились с весовым контролем на лабораторных весах с максимальной погрешностью 0,2 мг.

Концентрация ванадия определялась по изотопу с атомной массой 50,94. Для корректировки колебаний эффективности регистрации ионов V⁺ на детекторе масс-спектрометра использовался внутренний контроль по In, внесенному в раствор для разбавления. Возможная интерференция по массе-заряду ионов минимизирована за счет использования холостой пробы и калибровочных растворов с матрицей идентичной растворам с образцами. Регулярные измерения холостой пробы производились не реже одного раза в 30 мин (через каждый пять образцов) для минимизации влияния сдвига фона на результаты измерения.

Предварительный анализ спектров показал хорошую выраженность пиков в измеряемой области атомных масс и отсутствие перекрытия между ними (рис. 1), что делает ненужным введение корректировки на перекрытие спектров.

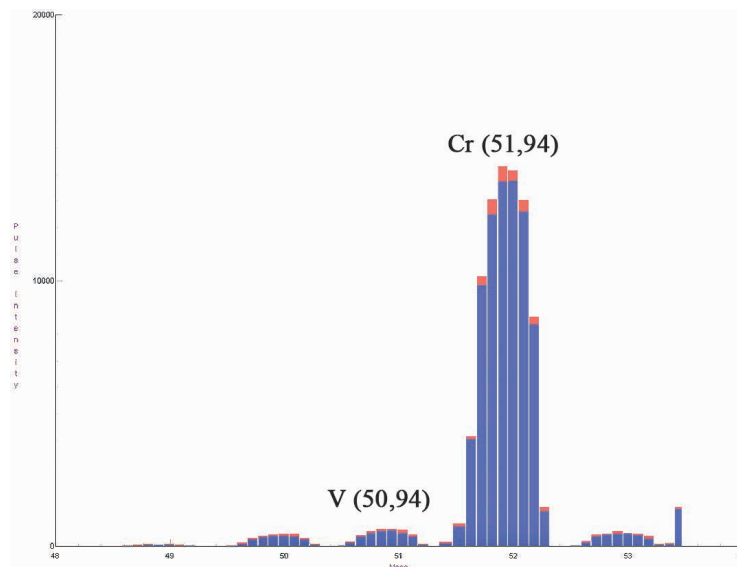


Рис. 1. Характерный спектр в области ионов ⁵¹V⁺, формируемый на детекторе масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Elan DRСe

Fig. 1. Typical spectrum in the area of ⁵¹V⁺ ions on the detector of ICP-MS Elan DRСe

Предел обнаружения ванадия составлял не менее 1 ppt (нг/л).

Полученные данные обрабатывались с использованием общепринятых методов параметрической статистики: определялось среднее арифметическое и стандартное отклонение в выборке.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ форм содержания ванадия в дерново-подзолистой почве с использованием метода последовательной экстракции BCR. Установлено незначительное количество ванадия (от 0,098 до 0,159 мкг/г) в ионообменной и водорастворимой формах, преимущественно связанных с карбонатами (табл. 1).

⁴СТБ ISO 17294-2-2007. Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Ч. 2: введен РБ 23.10.07. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2007. 21 с.

Содержание в почве ванадия, связанного с органическим веществом, варьировало в пределах от 0,92 до 1,67 мкг/г, а фракция ванадия, связанного с оксидами железа и марганца составила от 0,95 до 1,82 мкг/г. Большая часть ванадия содержалась в остаточной фракции, что характерно для почв, отобранных на всех площадках и варьировала в пределах от 2,33 до 5,33 мкг/г.

Таблица 1

Оценка распределения ванадия по формам нахождения в почве методом BCR, мкг/г

Table 1

Evaluation of the vanadium speciation by forms in soil using the BCR method, $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 10^{-6}$

Элемент	BCR-1	BCR-2	BCR-3	BCR-4
Площадка 1	0,098 ± 0,026	0,846 ± 0,126	1,658 ± 0,102	4,291
Площадка 2	0,138 ± 0,017	0,092 ± 0,031	0,950 ± 0,068	2,326
Площадка 3	0,090 ± 0,008	0,796 ± 0,086	1,224 ± 0,058	2,604
Площадка 4	0,138 ± 0,026	1,242 ± 0,055	1,646 ± 0,083	3,239
Площадка 5	0,159 ± 0,037	1,673 ± 0,195	1,822 ± 0,193	5,329

Для поглощения ванадия корневыми системами растений необходимо его присутствие в почвенном растворе. Исходя из полученных данных, только незначительная часть элемента в состоянии динамического равновесия может перейти в почвенный раствор, следовательно, результаты анализа подтверждают низкую доступность ванадия для корневого потребления растениями.

Была проведена внутренняя проверка процедуры путем сравнения суммарного количества ванадия трех шагов и остатка с псевдообщим количеством. Псевдообщую концентрацию ванадия получали путем растворения 1 г сухой почвы в царской водке, разбавлением в 15 раз и последующим измерением на масс-спектрометре. Для ванадия значение восстановления варьировало от 74 до 105 %. Большая часть значений восстановления соответствовала менее 100 %. Данные закономерности соответствуют научным данным [17], где показано, что значение восстановления ванадия изменяется в пределах 80–120 %.

Анализ распределения ванадия по формам нахождения в дерново-подзолистой почве методом Тессьера. Содержание ванадия в водорастворимой форме составило от 0,09 до 0,20 мкг/г (табл. 2). Незначительный переход ванадия в водную вытяжку, возможно, связан с его нахождением в составе таких труднорастворимых соединений, как карбонаты, гидроксиды и т. п., что соответствует произведениям растворимости этих веществ.

Таблица 2

Оценка распределения ванадия по формам нахождения в почве методом Тессьера, мкг/г

Table 2

Evaluation of the vanadium speciation by forms in soil using the Tessier method, $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 10^{-6}$

	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7
Площадка 1	0,08	0,02	1,16	2,21	1,94	2,17	12,87
Площадка 2	0,20	0,06	0,66	0,97	1,20	1,04	6,21
Площадка 3	0,17	0,05	0,62	0,90	1,31	0,90	6,65
Площадка 4	0,14	0,05	0,71	1,36	1,68	1,36	7,92
Площадка 5	0,09	0,04	1,12	0,80	3,04	4,08	8,01

Содержание ионообменной формы ванадия составило 0,02 мкг/г – 0,06 мкг/г. Выделение фракции ванадия, связанной с оксидами железа и марганца, соответствовало значениям от 0,062 до 1,16 мкг/г. Показатели фракции ванадия, связанной с полуторными окислами железа и алюминия, составили от 0,80 до 2,21 мкг/г.

Содержание в почве ванадия, связанного с органическим веществом, составило от 1,20 до 3,04 мкг/г. Содержание фракции ванадия прочно фиксированной на минеральных компонентах почвы варьировало в пределах от 0,90 до 4,08 мкг/г. Основная часть ванадия находилась в нерастворимой форме, значения которой варьировали в пределах от 6,21 до 12,87 мкг/г.

Сравнивая оба метода разделения ванадия по физико-химическим формам нахождения в почве, следует отметить, что фракция 1 метода BCR приблизительно соответствует первым двум фракциям метода Тессьера, фракция 2 метода BCR – третьей и четвертой фракции метода Тессьера, фракция 3 метода BCR – пятой метода Тессьера, остаток по методу BCR – шестой и седьмой фракциям метода Тессьера.

Сравнение двух схем выделения физико-химических форм ванадия из почвы показывает относительную сопоставимость результатов двух анализируемых методов в отношении наименее закрепленных на почвенных компонентах форм ванадия (табл. 3). Уксусная кислота в концентрации 0,11 моль/л (BCR-1) несколько полнее извлекает ванадий по сравнению с последовательным использованием дистиллированной воды и ацетата аммония в концентрации 1 моль/л (T1 + T2). Последовательное использование раствора гидроксилamina в концентрации 0,04 моль/л и раствора Тамма (T3 + T4) дает сопоставимые результаты с использованием раствора гидроксилamina в концентрации 0,5 моль/л (BCR-2). Лишь в отношении одного образца почвы метод BCR показал существенно более низкое содержание форм ванадия сорбированных окислами и гидроокислами железа, марганца и алюминия.

Таблица 3

Сравнительный анализ доли ванадия в формах нахождения в почве, определяемых согласно схем экстракции Тессьера и BCR, %

Table 3

Comparative analysis of the vanadium forms percentage, determined according to the Tessier and BCR extraction schemes, %

	T-1 + T-2	T-3 + T-4	T-5	T-6 + T-7
Площадка 1	0,5	16,5	9,5	73,5
Площадка 2	2,5	15,8	11,6	70,1
Площадка 3	2,1	14,3	12,4	71,2
Площадка 4	1,4	15,7	12,7	70,2
Площадка 5	0,8	11,2	17,7	70,4
	BCR-1	BCR-2	BCR-3	BCR-4
Площадка 1	1,4	12,3	24,1	62,3
Площадка 2	3,9	2,6	27,1	66,3
Площадка 3	1,9	16,9	26,0	55,2
Площадка 4	2,2	19,8	26,3	51,7
Площадка 5	1,8	18,6	20,3	59,3

Значительные различия отмечаются в отношении ванадия, связанного с органическим веществом. Метод Тессьера в большинстве случаев показывает относительное содержание данной формы в два раза ниже по сравнению с BCR. Экстракция ванадия, высвободившегося из органических соединений, с использованием ацетата аммония позволяет более полно извлечь данную форму элемента. Это обстоятельство влияет и на более низкое содержание ванадия в остаточной форме при использовании последовательной экстракции BCR.

Хотя метод Тессьера и дает более развернутую картину распределения элемента по соединениям с различной подвижностью и биологической доступностью, однако с более простой процедурой анализа при выполнении оценки биологической доступности ванадия в почве предлагается отдавать предпочтение методу BCR.

Обобщая собранные данные по степени биологической доступности, ванадий можно отнести к группе малодоступных тяжелых металлов. Как правило, он сосредоточен в неэкстрагируемой и прочно фиксированной на почвенных минералах фракциях (рис. 2). Суммарная доля, приходящаяся на растворенную и обменную форму, редко превышает 2 %.

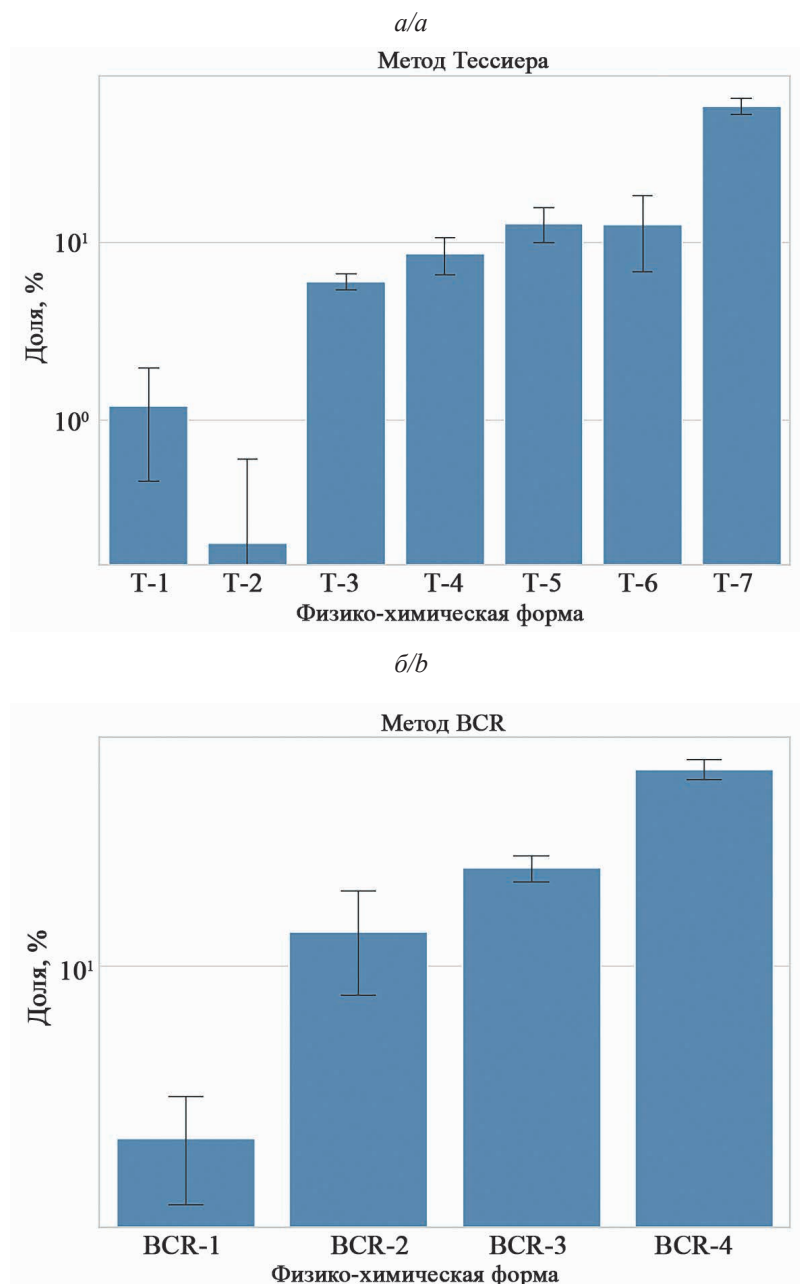


Рис. 2. Распределение ванадия по формам нахождения в почве с различной биологической доступностью (шкала логарифмическая): а – метод Тессьера, б – метод BCR

Fig. 2. Speciation of vanadium by forms with different bioavailability (logarithmic scale): a – Tessier’s method, b – BCR method

Заключение

Проведена адаптации методов BCR и Тессьера для оценки форм ванадия металлов в дерново-подзолистой почве для выполнения измерений на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой. В отношении форм нахождения ванадия в почве, обладающих наибольшей биологической доступностью, данные два метода дают сопоставимые результаты. Показано, что хотя метод Тессьера позволяет получить более развернутую характеристику распределения элемента по формам с различными химическими и физико-химическими свойствами, однако с точки зрения трудоемкости процесса предпочтительнее использование метода BCR, предоставляющего информацию в более сжатом виде, но в объеме достаточном для вывода о степени биологической доступности ванадия в почве и его потенциальной подвижности по вертикальному профилю.

В дерново-подзолистых почвах Гомельского р-на ванадий сосредоточен преимущественно в неэкстрагируемой и прочно фиксированной на почвенных минералах фракциях. Суммарная доля, приходящаяся

на растворенную и обменную форму, редко превышает 2 %, что делает элемент малодоступным для корневого поглощения растениями.

Библиографические ссылки

1. Бычинский ВА, Вашукевич НВ. *Экологическая геохимия: Тяжелые металлы в почвах в зоне влияния промышленного города*. Иркутск: Издательство Иркутского государственного университета; 2008. 189 с.
2. Алексеев ЮВ. *Тяжелые металлы в почвах и растениях*. Ленинград: Агропромиздат; 1987. 142 с.
3. Алексеев ЮВ. *Тяжелые металлы в агроландшафте*. Санкт-Петербург: Издательство ПИЯФ РАН; 2008. 216 с.
4. Yang J, Wang M, Jia Y, Gou M, Zeyer J. Toxicity of vanadium in soil on soybean at different growth stages. *Environmental pollution*. 2017;231(1):48–58.
5. Виноградов АП. *Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах*. Москва: Издательство АН СССР; 1957. 237 с.
6. Ферсман АЕ. *Геохимия*. Москва: Наука; 1955. 486 с.
7. Gan C, Chen T, Yang J. Remediation of vanadium contaminated soil by alfalfa (*Medicago sativa* L.) combined with vanadiumresistant bacterial strain. *Environmental Technology & Innovation*. 2020;20:101090.
8. Овчаренко ММ. *Тяжелые металлы в системе «почва – растение – удобрение»*. Москва: Пролетарский светоч; 1997. 290 с.
9. Ure AM, Davidson CM. *Chemical speciation in the environment*. Second edition. Wiley: [publisher unknown]; 2002. 452 p.
10. Mandiwana KL, Panichev N. The leaching of vanadium(V) in soil due to the presence of atmospheric carbon dioxide and ammonia. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;170:1260–1263.
11. Reijonen I, Metzler M, Hartikainen H. Impact of soil pH and organic matter on the chemical bioavailability of vanadium species: the underlying basis for risk assessment. *Environmental pollution*. 2016;210:371–379.
12. Кабата-Пендиас А, Пендиас Х. *Микроэлементы в почвах и растениях*. Москва: Мир; 1989. 439 с.
13. Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry*. 1979;51(7):844–851.
14. Davidson ChrM, Duncan AL, Littlejohn D, Ure AM, Garden LM. A critical evaluation of the three-stage BCR sequential extraction procedure to assess the potential mobility and toxicity of heavy metals in industrially-contaminated land. *Analytica Chimica Acta*. 1998;363:45–55.

References

1. Bychinsky VA, Vashukevich NV. *Ekologicheskaya geokhimiya: Tyazhelye metally v pochvakh v zone vliyaniya promyshlennogo goroda* [Ecological geochemistry: Heavy metals in soils in an industrial city]. Irkutsk: Publishing house of the Irkutsk state university; 2008. 189 p. Russian.
2. Alekseev YuV. *Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh* [Heavy metals in soils and plants]. Leningrad: Agropromizdat; 1987. 142 p. Russian.
3. Alekseev YuV. *Tyazhelye metally v agrolandshafte* [Heavy metals in the agricultural landscape]. Saint Petersburg: PNPI RAN; 2008. 216 p. Russian.
4. Yang J, Wang M, Jia Y, Gou M, Zeyer J. Toxicity of vanadium in soil on soybean at different growth stages. *Environmental pollution*. 2017;231(1):48–58.
5. Vinogradov AP. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and trace elements in soils]. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR; 1957. 237 p.
6. Fersman AE. *Geokhimiya* [Geochemistry]. Moscow: Nauka; 1955. 486 p.
7. Gan C, Chen T, Yang J. Remediation of vanadium contaminated soil by alfalfa (*Medicago sativa* L.) combined with vanadiumresistant bacterial strain. *Environmental Technology & Innovation*. 2020;20:101090.
8. Ovcharenko MM. *Tyazhelye metally v sisteme pochva–rastenie–udobrenie* [Heavy metals in the soil-plant-fertilizer system]. Moscow: Proletarian Light; 1997. 290 p. Russian.
9. Ure AM, Davidson CM. *Chemical speciation in the environment*. Second edition. Wiley: [publisher unknown]; 2002. 452 p.
10. Mandiwana KL, Panichev N. The leaching of vanadium(V) in soil due to the presence of atmospheric carbon dioxide and ammonia. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;170:1260–1263.
11. Reijonen I, Metzler M, Hartikainen H. Impact of soil pH and organic matter on the chemical bioavailability of vanadium species: the underlying basis for risk assessment. *Environmental pollution*. 2016;210:371–379.
12. Kabata-Pendias A, Pendias H. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plants]. Moscow: Mir; 1989. 439 p. Russian.
13. Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry*. 1979;51(7):844–851.
14. Davidson ChrM, Duncan AL, Littlejohn D, Ure AM, Garden LM. A critical evaluation of the three-stage BCR sequential extraction procedure to assess the potential mobility and toxicity of heavy metals in industrially-contaminated land. *Analytica Chimica Acta*. 1998;363:45–55.

УДК 612.342.6

ВНЕШНЯЯ И ВНУТРЕННЯЯ СЕКРЕЦИЯ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ПАНКРЕАТИТЕ

Л. С. КУЧКАРОВА¹⁾, Х. Ю. КАЮМОВ¹⁾, Ш. О. РОХИМОВА²⁾, А. Г. СЫСА³⁾

¹⁾Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека,
ул. Вузгородок дом, 4, 100174, г. Ташкент, Узбекистан

²⁾Ургенчский филиал Ташкентской медицинской академии,
ул. Ал-Хоразми, 25, 220100, г. Ургенч, Узбекистан

³⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

Острый панкреатит – это наиболее широко распространенное заболевание органов пищеварения, риск подверженности которому по всему миру прогрессивно увеличивается. Триггером патогенеза острого панкреатита, вызванного перевязкой панкреатического протока, введением церулина или аминокислот, является оксидативный стресс, который вызывает увеличение таких опасных метаболитов, как активные формы кислорода и азота.

Образец цитирования:

Кучкарова ЛС, Каюмов ХЮ, Рохимова ШО, Сыса АГ. Внешняя и внутренняя секреция поджелудочной железы при экспериментальном панкреатите. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;3:50–56.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-50-56>

For citation:

Kuchkarova LS, Kayumov XYu, Rokhimova ShO, Sysa AG. External and internal secretion of the pancreas in experimental pancreatitis. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;3:50–56. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-50-56>

Авторы:

Любовь Салижановна Кучкарова – доктор биологических наук, профессор кафедры физиологии человека и животных, факультет биологии.

Хасан Юсуф угли Каюмов – докторант кафедры физиологии человека и животных, факультет биологии.

Ширин Олланазаровна Рохимова – кандидат биологических наук; старший преподаватель кафедры естественных наук.

Алексей Григорьевич Сыса – кандидат химических наук, доцент; декан факультета экологической медицины.

Authors:

Lyubov S. Kuchkarova, doctor of science (biology), professor at the department of human and animals physiology, faculty of biology.

Lyubakuchkarova@yahoo.com

Hasan Yu. ugli Kayumov, doctoral student at the department of human and animals physiology, faculty of biology.

qayumovhasan642@gmail.com

Shirin O. Rokhimova, PhD (biology); senior lecturer at the department of natural sciences.

Shirin2111@mail.ru

Aliaksei G. Sysa, PhD (chemistry), docent; dean of environmental medicine faculty.

aliaksei.sysa@iseu.by

Цель исследования: в модельном эксперименте на лабораторных животных охарактеризовать изменения диагностически значимых показателей экзо- и эндосекреции поджелудочной железы при остром экспериментальном панкреатите, вызванным L-аргинином. Исследование выполнено на белых беспородных крысах самцах. Модель острого панкреатита вызвали внутрибрюшинным введением L-аргинина двукратно с интервалом в 2 ч. Оценивали активность α -амилазы в ткани поджелудочной железы и кишечном химусе, содержание глюкозы, C-пептида и активность α -амилазы в сыворотке крови животных при экспериментальном панкреатите, а также гистоструктуру поджелудочной железы. Установлено, что в ткани поджелудочной железы животных под действием L-аргинина отмечались вакуолярная дистрофия, а также отек межацинарной и междольковой соединительной ткани, некроз экзокриноцитов с нарушением структуры ацинусов. Панкреатические островки хотя и сохраняли свою структуру, однако заметно уменьшались в размерах. Показано статистически значимое (в 1,8 раза) увеличение специфической активности панкреатической α -амилазы в ткани поджелудочной железы у крыс с острым панкреатитом по сравнению с контрольными животными. Содержание глюкозы в сыворотке крови животных опытной группы также статистически значимо увеличилось (на 38,5 %) по сравнению с контрольными животными. Содержание C-пептида в крови крыс с вызванным экспериментальным панкреатитом уменьшилось на 68,5 %. Полученные в настоящем исследовании данные позволяют предположить, что при панкреатите наряду с дисфункцией экзокринного аппарата развиваются симптомы сахарного диабета, что необходимо учитывать при терапии патологий поджелудочной железы.

Ключевые слова: белые крысы; экспериментальный панкреатит; поджелудочная железа; α -амилаза; глюкоза; C-пептид.

EXTERNAL AND INTERNAL SECRETION OF THE PANCREAS IN EXPERIMENTAL PANCREATITIS

L. S. KUCHKAROVA^a, X. Yu. KAYUMOV^a, Sh. O. ROKHIMOVA^b, A. G. SYSA^c

^aNational University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek,
4 Vuzhorodok dom Street, Tashkent 100174, Uzbekistan

^bUrgench branch of the Tashkent Medical Academy,
25 Al-Khwarizmi Street, Urgench 220100, Uzbekistan

^cInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daiŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

Corresponding author: A. G. Sysa (aliaksei.sysa@iseu.by)

Acute pancreatitis is the most widespread disease of the digestive system, the risk of exposure to which is progressively increasing worldwide. The trigger for the pathogenesis of acute pancreatitis caused by ligation of the pancreatic duct, administration of cerulin or amino acids is oxidative stress, which causes an increase in such dangerous metabolites as reactive oxygen and nitrogen species. The purpose of the study was to characterize changes in diagnostically significant indicators of pancreatic exo- and endocrine secretion in experimental acute pancreatitis caused by L-arginine in a model experiment on laboratory animals. The study was performed on outbred male rats. A model of acute pancreatitis was induced by intraperitoneal administration of L-arginine twice with an interval of 2 hours. The activity of α -amylase in the pancreatic tissue and intestinal chyme, the content of glucose, C-peptide and α -amylase activity in the blood serum of animals with experimental pancreatitis, as well as the histostucture of the pancreas were evaluated. It was established that vacuolar dystrophy, as well as edema of interacinar and interlobular connective tissue, necrosis of exocrinocytes with a violation of the structure of acini, were noted in the pancreatic tissue of animals under the influence of L-arginine. Although pancreatic islets retained their structure, however, they noticeably decreased in size. A statistically significant (1.8 times) increase in the specific activity of pancreatic α -amylase in pancreatic tissue in rats with acute pancreatitis was shown compared to control animals. The content of glucose in the blood serum of the animals of the experimental group also increased statistically significantly (by 38.5 %) compared to the control animals. The content of C-peptide in the blood of rats with induced experimental pancreatitis decreased by 68.5 %. The data obtained in this study suggest that in pancreatitis, along with dysfunction of the exocrine apparatus, symptoms of diabetes mellitus develop, which must be taken into account in the treatment of pancreatic pathologies.

Keywords: white rats; experimental pancreatitis; pancreas; α -amylase; glucose; C-peptide.

Введение

Известно, что основными функциями поджелудочной железы являются экзокринная и эндокринная секреция. Внешнесекреторная функция заключается в образовании панкреатического сока и выделении его в полость 12-перстной кишки в нужном объеме для переваривания полимеров пищи. Широкий спектр

ферментов поджелудочной железы, участвующих в начальных стадиях пищеварения, одновременно является триггером и регулятором последующих стадий пищеварения и всасывания [1].

Эндокринная функция поджелудочной железы связана с тем, что в ней синтезируется и инкретируется целый ряд гормонов: инсулин, глюкагон, соматостатин, панкреатический полипептид, вазоактивный интестинальный пептид, гастроинтестинальный полипептид, гастрин и др. [2].

Для обеспечения такой многосторонней функциональной нагрузки и бесперебойной продукции большого количества жизненно необходимых веществ поджелудочная железа имеет очень сложное строение и тесные структурные внутриорганные и межорганные связи [3]. Предположительно, такая связь должна отражаться и в функциях внешней и внутренней секреции самого органа при различных патологиях.

Среди патологий поджелудочной железы наиболее широко распространёнными являются различные разновидности панкреатитов и диабетов. Проблема острого панкреатита (ОП) – одна из наиболее сложных и актуальных. Так, в последнее десятилетие отмечается неуклонная тенденция роста частоты ОП в структуре хирургической патологии органов брюшной полости и увеличение тяжёлых его форм. Несмотря на достигнутые значительные успехи в совершенствовании методов инструментальной диагностики, принципов интенсивной терапии, применения современных высокотехнологичных методов оперативного лечения, результаты не удовлетворяют, так как летальность при ОП, по разным статистическим данным, составляет от 5 до 21 %, при деструктивных формах от 50 до 85 %, а среди выживших пациентов у 73 % возникает стойкая утрата трудоспособности. Дальнейшее выявление новых звеньев патогенеза ОП с последующей разработкой патогенетически обоснованного воздействия на них, остается актуальным и перспективным направлением в решении данной проблемы [5]. Другим опасным заболеванием поджелудочной железы является сахарный диабет, зачастую связанный с деструкцией эндокринного аппарата органа. В 2014 г. во всем мире диабетом страдали 422 млн взрослых, что почти в 4 раза больше по сравнению с 108 млн в 1980 г. [6]. Будучи неинфекционными патологиями, они входят в перечень летальных.

Исходя из близкой локализации структурных компонентов внешней и внутренней секреции поджелудочной железы, цель настоящей работы – выявить изменения в экзо- и эндосекреции поджелудочной железы при остром экспериментальном панкреатите.

Материалы и методы исследования

Опыты были проведены на белых беспородных крысах (сорок пять взрослых самцов в возрасте 8–10 недель и весом 160–210 г). Модель острого панкреатита вызывали внутрибрюшинным введением L-аргинина в дозе 100 мг/100 г веса крысам двукратно с интервалом в 2 ч [7].

L-аргинин (Merck, K40829187) вводили в виде 20%-ного раствора, приготовленного на фосфатном буфере (рН 6.8). Признаки панкреатита (поведенческая реакция животного на боль, повышение активности α -амилазы в крови) наблюдалась через 48 ч.

Крыс выводили из эксперимента на 3-й день после введения L-аргинина. После декапитации животных собранная в пробирку кровь отстаивалась при комнатной температуре в течение 30 мин. Затем пробы центрифугировали со скоростью 5000 об/мин в течение 15 мин. Осторожно отбирали супернатант, который использовался для биохимического анализа. В полученной сыворотке крови определяли активность α -амилазы (1,4- α -D-глюкан-глюкогидролаза, КФ – 3.2.1.1), уровень глюкозы и С-пептида. Определение глюкозы и С-пептида в крови проводили с применением набора стандартных реактивов «Глюкоза (GOD-PAF)» и «HUMATEX CRP» (Human GmbH, Германия) соответственно. Активность α -амилазы во всех биологических пробах определяли по А. М. Уголеву (1969) [8]. Этот метод основан на фотоколориметрическом определении убыли крахмала с применением йодного реактива. Активность фермента выражали в граммах расщепленного за 1 мин крахмала.

Из брюшной полости извлекали поджелудочную железу и отсекали хвостовую часть органа для проведения гистологических анализов. Образцы фиксировали в 10%-ном растворе формалина в течение 3-х дней. После стандартной проводки по спиртам образцы высушивали и заливали парафином. Из парафиновых блоков готовили срезы толщиной 5–6 мкм, которые окрашивали гематоксилин-эозином. Препараты были сфотографированы световым цифровым микроскопом фирмы Лейка (DN-300M, Германия).

Для приготовления биологически активных препаратов поджелудочной железы извлеченный орган разрезали на мелкие кусочки, гомогенизировали в течение минуты тефлоновым пестиком при скорости 400 об /мин. Полученный гомогенат помещали в центрифужные пробирки и центрифугировали при 1500 об/мин в течение 15 мин. Супернатант отбирали для определения активности α -амилазы.

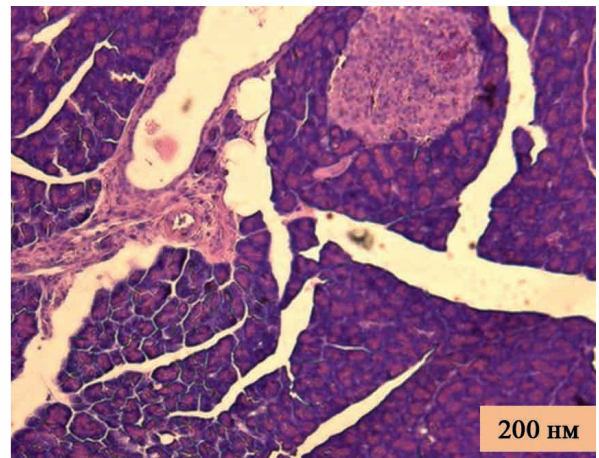
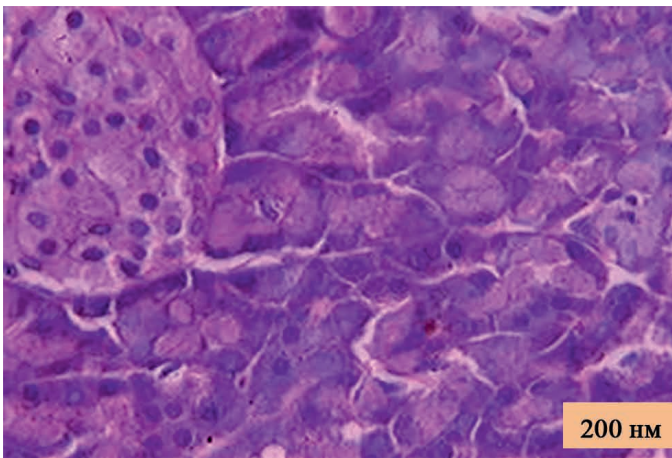
Активность фермента определяли в сыворотке в крови, ткани поджелудочной железы и химусе тонкой кишки и выражали в миллиграммах расщепленного за 1 мин крахмала при ферментативном гидролизе по изменению окраски йод-крахмальных компонентов.

В качестве критерия проверки гипотезы о нормальном законе распределения данных использовали критерий согласия Пирсона χ^2 (Хи-квадрат). Полученные результаты были обработаны с применением t-критерия Стьюдента. Вычисляли среднюю арифметическую величину (M), ошибку средней (стандартная ошибка – *m*) и показатель статистической значимости (P). Отличия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании полученных данных можно заключить, что масса тела у контрольной группы крыс составляла $200,30 \pm 8,11$ г, а у крыс с острым панкреатитом $171,12 \pm 9,03$ г ($p < 0,01$). Масса поджелудочной железы у контрольной группы животных составляла $688,48 \pm 23,55$ мг, а у опытной группы крыс масса органа была $849,54 \pm 44,22$ мг ($p < 0,01$).

В контрольной группе в гистоструктуре поджелудочной железы ацинусы хорошо визуализировались зимогенные гранулы, как это показано на рисунке, в экзокриноцитах просматривались, эндокринный островок был достаточно выражен.



Вид гистологических срезов поджелудочной железы крыс при L-аргининовом панкреатите. Окраска гематоксилин-эозин; увеличение $\times 400$

Histological sections of the pancreas of rats with L-arginine pancreatitis. Hematoxylin-eosin stain; magnification $\times 400$

В ткани железы животных под действием L-аргинина отмечались вакуольная дистрофия, а также отек межацинарной и междольковой соединительной ткани, некроз экзокриноцитов с нарушением структуры ацинусов. Панкреатические островки хотя и сохраняли свою структуру, однако заметно уменьшались в размерах.

При экспериментальном панкреатите увеличение массы органа у крыс опытной группы сопровождалось увеличением специфической активности панкреатической α -амилазы в ткани органа. Специфическая активность фермента статистически значимо увеличилась (в 1,8 раза) в ткани поджелудочной железы у крыс с острым панкреатитом по сравнению с контрольными животными ($p < 0,001$) (таблица). Разрушение структурной целостности поджелудочной железы провоцировало возрастание активности фермента и в гемоциркуляции. Активность панкреатической α -амилазы в сыворотке крови у крыс с вызванной патологией по сравнению с контрольными крысами была в 3,5 раз больше.

Биохимические показатели в сыворотке и ткани поджелудочной железы у крыс исследуемых групп

Biochemical parameters in serum and pancreatic tissue in rats of the studied groups

Оцениваемый показатель	Контрольная группа	Опытная группа
Активность панкреатической α -амилазы, г/мин/г ткани	$113,1 \pm 0,61$	$199,72 \pm 12,61^{**}$
Содержание глюкозы, Ммоль/л	$4,81 \pm 0,31$	$6,65 \pm 0,51^*$
Содержание С-пептида, нг/л	$0,73 \pm 0,02$	$0,23 \pm 0,02^*$

Примечание. Уровень статистической значимости * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,001$.

Содержание глюкозы в крови у крыс контрольной и опытных групп составило $4,81 \pm 0,31$ и $6,65 \pm 0,51$ Ммоль/л соответственно. Количество глюкозы в сыворотке крови увеличивалось на 38,5 % у крыс с острым панкреатитом по сравнению с контрольными животными.

В контрольной группе крыс содержание С-пептида, который является показателем секреции инсулина и применяется для диагностики сахарного диабета, составляло $0,73 \pm 0,02$ нг/л, а у крыс с вызванным экспериментальным панкреатитом – $0,23 \pm 0,02$ нг/л.

Общепринятым подходом для создания экспериментального панкреатита у крыс, мышей и кроликов является использование L-аргинина [9], что было сделано и в настоящей работе. В исследованиях разных авторов [9] установлено, что использование этого вещества в дозе 2,5 г/кг вызывает воспалительные и некротические изменения поджелудочной железы, которые являются частично обратимыми в течение 3 сут. Более существенные изменения происходят при применении доз 4,5 и 5 г/кг. S. Tani, et al. [10] продемонстрировали, что инъекция L-аргинина (5 г/кг) вызывает биологические и морфологические изменения, характерные для острого некротического панкреатита. Морфологические исследования выявили дегенеративные изменения интрацеллюлярных органелл и ядер ацинарных клеток. Степень некротических изменений экзокринной ткани поджелудочной железы с инфильтрацией нейтрофилами максимальна на 72-й час после инъекции. Регенерация панкреатических клеток отмечается на 7-е сутки, практически полное восстановление морфологии железы — через 14 дней после инъекции аргинина. При применении аргинина изменения в поджелудочной железе варьируют от интерстициального отека, воспалительно-клеточной инфильтрации, ацинарной дегрануляции до массивного некроза (дозы 2,5 и 5,0 г/кг). Использование аргинина с целью экспериментального панкреатита обосновано тем, что он обладает минимальным эффектом на другие ткани, в том числе на островки Лангерганса. Перипанкреатическая жировая ткань также претерпевает изменения в виде жирового некроза. Инфильтрация полиморфнонуклеарными лейкоцитами наблюдается на периферии некротических участков. При обследовании печени выявляется незначительная вакуолярная дегенерация, но жирового перерождения не наблюдается. При инъекции аргинина в дозе 600 мг/100 г массы тела практически все мыши погибают.

Таким образом, инъекция L-аргинина экспериментальным животным сопровождается увеличением уровня амилазы в плазме по сравнению с контрольной группой, что свидетельствует о повреждении ацинарных клеток. Незначительное повышение уровня амилазы в плазме наблюдается через 24 ч после инъекции аргинина, значительное повышение — через 48 ч, такой уровень сохранялся до 72 ч. Данный показатель возвращался к норме к 96-му часу. Достоверно увеличенный уровень трипсина наблюдали через 24 ч, что подтверждает данные о влиянии высоких доз аргинина на поджелудочную железу. Наблюдаемый эффект может быть связан с повышенным уровнем NO, образующегося из L-аргинина под воздействием NO-синтазы. При низких концентрациях обеспечиваются процессы клеточной и межклеточной сигнализации. Такие концентрации не вредят клеткам, поскольку организм постоянно испытывает действие этих концентраций и, несомненно, к ним адаптирован. К тому же высокий уровень активности супероксид дисмутазы (СОД) препятствует образованию пероксинитрита. При повышении концентрации NO до 50 мкмоль/л (через 24 ч после введения L-аргинина), способность СОД конкурировать с NO за супероксиданион резко снижается, и синтез пероксинитрита увеличивается, что сопровождается активацией процессов перекисного окисления липидов, снижением активности СОД, каталазы, а также морфологически подтвержденными признаками воспаления ткани поджелудочной железы [11].

Итак, экспериментальный панкреатит вызывает заметные изменения в экзокреции поджелудочной железы, что проявляется в структурном разрушении ацинусов и протоков, уменьшении активности фермента в химусе и увеличении активности α -амилазы в самом органе и гемоциркуляции. Наряду с вышеотмеченными признаками имеют место нарушения эндосекреции, что выражается в гипотрофии эндокринных островков, наряду с повышением содержания глюкозы и снижением уровня С-пептида в сыворотке крови.

Полученные в настоящем исследовании данные позволяют предположить, что вызванные при экспериментальном панкреатите нарушения в оттоке панкреатического сока в 12-перстную кишку, приводят к накоплению избытка панкреатических ферментов в ацинусах и стимулируют аутофагию органа. Нарушение барьерных структур ткани вызывает поступление панкреатических ферментов в гемоциркуляцию. В наших наблюдениях это проявляется в увеличении активности α -амилазы в сыворотке крови. Считается, что аутофагия и деструктурированность ацинусов, нарушая капиллярное кровообращение органа, вызывает гипотрофию островков Лангенгарса, то есть является причиной развития панкреатогенного преддиабетического состояния или сахарного диабета.

Эти данные ассоциируют с данными других авторов о том, что причиной эндокринной недостаточности поджелудочной железы при панкреатите является вторичное воспалительное поражение панкреатического островкового аппарата [12]. Этиогенез сахарного диабета в этом случае целесообразно связывать со взаимовлиянием морфофизиологических нарушений внешне- и внутрисекреторного аппарата поджелудочной железы. Следовательно, при диагностике и терапии панкреатита и, возможно, других патологий поджелудочной железы следует иметь в виду вероятность развития панкреатогенного сахарного диабета. Существует настоятельная необходимость дальнейших исследований в этом направлении с целью оптимизации и повышения эффективности диагностики и терапии панкреатогенного сахарного диабета. Ввиду комплексных нарушений эндокринной и экзокринной функции в терапии целесообразно использовать корригирующие вещества с позитивными полифункциональными свойствами.

Заключение

В работе изучены сдвиги в экзо- и эндосекреции поджелудочной железы при остром экспериментальном панкреатите. Показано, что 1) вызванный введением L-аргинина экспериментальный панкреатит приводит к структурным и функциональным нарушениям поджелудочной железы; 2) структурные отклонения выражались в отеке межацинарной и междольковой соединительной ткани, некрозе экзокриноцитов и гипотрофии островкового аппарата; 3) функциональные сдвиги при экспериментальном панкреатите проявлялись в резком возрастании активности α -амилазы в ткани органа и сыворотке крови, равно как и в увеличении содержания глюкозы и уменьшении уровня С-пептида в сыворотке крови.

Результаты работы свидетельствуют, что при панкреатите наряду с дисфункцией экзокринного аппарата развиваются симптомы сахарного диабета, что необходимо учитывать при терапии патологий поджелудочной железы.

Библиографические ссылки

1. Коротко ГФ. *Секреция поджелудочной железы*. Краснодар: Издательство Кубанского медицинского университета; 2005. 312 с.
2. Mastracci TL, Sussel L, The Endocrine Pancreas: insights into development, differentiation and diabetes. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Membrane Transport and Signaling*. 2012;1(5):609–628. PMID: DOI: 10.1002/wdev.44/PMC3420142.
3. Горбачева АМ, Зайцева НВ. Сахарный диабет, хронический панкреатит и первичный парагипертиреоз. Есть ли связь? *Сахарный диабет*. 2019;22(4):392–398. <https://doi.org/10.14341/DM9952>.
4. Sayed SA, Mukherjee S. *Physiology, Pancreas*. [Place unknown]: StatPearls Publishing; 2021. 235 p.
5. Колешко СВ, Лис РЕ. Моделирование патологических процессов в поджелудочной железе, максимально приближенных к клинической практике. *Журнал ГрГМУ*. 2009;2(26):159–162.
6. CC BY-NC-SA 3.0 IGO, лицензия. Глобальный доклад по диабету. Женева: Всемирная организация здравоохранения; 2018. 88 с.
7. Концевая СЮ. Патологические аспекты развития аллоксанового сахарного диабета у крыс в эксперименте. *Современные проблемы науки и образования*. 2015;5:12–15.
8. Уголев АМ, Тимофеева НН. Определение амилалитической активности. В: *Исследование пищеварительного аппарата у человека*. Ленинград: Наука; 1969. с. 187–192.
9. Ломакина ЕЮ, Таратина ОВ, Белоусова ЕА. Хронический панкреатит и сахарный диабет: обзор литературы. *Сахарный диабет*. 2019;22(4):525–534.
10. Tani S, Hiroshi Itoh, Yoshinori Okabayashi, et al. New model of acute necrotizing pancreatitis induced by excessive doses of arginine in rats. *Digestive Diseases and Sciences*. 2006;35(3):367–374.
11. Дмитренко НП, Кишко ТО, Шандренко С. Аргинин: биологическое действие, влияние на синтез оксида азота. *Украинский химиотерапевтический журнал*. 2008;1–2(22).
12. Dawra R, Sharif R, Phillips Ph, et al. Development of a new mouse model of acute pancreatitis induced by administration of Larginine. *American Journal of PhysiologyGastrointestinal and Liver Physiology*. 2006;292:G1009–G1018.

References

1. Korotko GF. *Sekretsiya podzheludochnoi zhelezy* [Pancreatic secretion]. Krasnodar: Izdatelstvo Kubanskogo meditsinskogo universiteta; 2005. 312 p. Russian.
2. Mastracci TL, Sussel L, The Endocrine Pancreas: insights into development, differentiation and diabetes. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Membrane Transport and Signaling*. 2012;1(5):609–628. PMID: DOI: 10.1002/wdev.44/PMC3420142.
3. Gorbacheva AM, Zaitseva NV. *Sakharnyi diabet, khronicheskii pankreatit i pervichnyi paragipertireoz. Est' li svyaz'?* [Diabetes mellitus, chronic pancreatitis and primary parahyperthyroidism. Is there a connection?] *Diabetes*. 2019;22(4):392–398. <https://doi.org/10.14341/DM9952>. Russian.

4. Sayed SA, Mukherjee S. Physiology, Pancreas. [Place unknown]: StatPearls Publishing; 2021. 235 p.
5. Koleshko SV, Lis RE. *Modelirovanie patologicheskikh protsessov v podzheludochnoi zheleze, maksimal'no priblizhennykh k klinicheskoi praktike* [Modeling of pathological processes in the pancreas, as close as possible to clinical practice]. *Journal of GrSMU*. 2009;2(26):159–162. Russian.
6. CC BY-NC-SA 3.0 IGO, license. Global Diabetes Report. Geneva: World Health Organization; 2018. 88 p. Russian.
7. Kontsevaya SYu. *Patofiziologicheskie aspekty razvitiya alloksanovogo sakharnogo diabeta u krys v eksperimente* [Pathophysiological aspects of the development of alloxan diabetes mellitus in rats in the experiment]. *Modern problems of science and education*. 2015;5:12–15. Russian.
8. Ugolev AM, Timofeeva NN. *Opredelenie amiloliticheskoi aktivnosti* [Determination of amylolytic activity]. In: Research of the digestive apparatus in humans. Leningrad: Science; 1969. p. 187–192. Russian.
9. Lomakina EYu, Taratina OV, Belousova EA. *Khronicheskii pankreatit i sakharnyi diabet: obzor literatury* [Chronic pancreatitis and diabetes mellitus: a literature review]. *Diabetes mellitus*. 2019;22(4):525–534. Russian.
10. Tani S, Hiroshi Itoh, Yoshinori Okabayashi, et al. New model of acute necrotizing pancreatitis induced by excessive doses of arginine in rats. *Digestive Diseases and Sciences*. 2006;35(3):367–374.
11. Dmitrenko NP, Kishko TO, Shandrenko SG. *Arginin: biologicheskoe deistvie, vliyanie na sintez oksida azota* [Arginine: biological action, influence on the synthesis of nitric oxide]. *Ukraine chemotherapy journal*. 2008;1–2(22). Russian.
12. Dawra R, Sharif R, Phillips Ph, et al. Development of a new mouse model of acute pancreatitis induced by administration of Larginine. *American Journal of PhysiologyGastrointestinal and Liver Physiology*. 2006;292:G1009–G1018.

Статья поступила в редколлегию 21.08.2023.
Received by editorial board 21.08.2023.

УДК 618.33-06:614.876.06:314.14(450)

ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ ЖИТЕЛЕЙ БЕЛАРУСИ, ОБЛУЧЕННЫХ I-131 ВО ВРЕМЯ ВНУТРИУТРОБНОГО РАЗВИТИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

А. Н. СТОЖАРОВ¹⁾, В. В. ХРУСТАЛЁВ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный медицинский университет,
пр. Дзержинского 83, 220116, г. Минск, Беларусь

При анализе когорты индивидуумов, проживающих в Столинском р-не Брестской обл., которые получили облучение при внутриутробном развитии за счет накопления I-131 в щитовидной железе, было обнаружено, что как общая заболеваемость, так и заболеваемость нервной, сердечно-сосудистой, мочеполовой систем, а также желудочно-кишечного тракта повышена и отличается в значительной степени от заболеваемости индивидуумов, идентичных по ряду параметров, которые не подвергались *in utero* воздействию радиоактивного йода. В исследуемой выборке преобладали относительно небольшие дозы, не превышающие 30 мГр. И лишь у 10 % облученных дозы составляли около 100 мГр. В группе облученных I-131 *in utero* детей в последующие годы наблюдается линейная частота заболеваемости психическим расстройством и расстройством поведения (класс V по МКБ-10), которая почти в три раза больше, чем в группе необлученных индивидуумов. Примерно такую же зависимость можно наблюдать по группе заболеваний нервной системы (класс VI). Частота сердечно-сосудистой патологии в основной группе была примерно в 2,5 раза больше, чем в контрольной. В выборке детей, которые подвергались действию I-131 во внутриутробном состоянии, заболеваемость болезнями мочеполовой системы (класс XIV) регистрировалась на протяжении всего периода наблюдения, то есть до 2017 г. и была повышенной примерно в 4 раза. Появление патологии носило отсроченный характер, проявляющееся спустя 10 лет после аварии на ЧАЭС. В большинстве случаев заболеваемость в группе необлученных лиц имело сигмоидную зависимость и выходило на плато, в дальнейшем не увеличиваясь. Напротив, в группе облученных пострадавших заболеваемость имела тенденцию к росту. Наблюдаемые данные могут быть вызваны вариабельной чувствительностью определенных генов ткани щитовидной железы, которые получают лабильность, что приводит к измененному гормональному фону тиреоидных гормонов, которые воздействуют на все без исключения системы организма, приводя впоследствии к появлению патологии.

Ключевые слова: радиоактивный йод, I-131; заболеваемость; нервная система; сердечно-сосудистая система; мочеполовая система; желудочно-кишечный тракт; щитовидная железа; тиреоидные гормоны.

ANALYSIS OF THE MORBIDITY OF RESIDENTS OF BELARUS WHO RECEIVED THYROID EXPOSURE DUE TO THE ACCUMULATION OF I-131 DURING FETAL DEVELOPMENT AS A RESULT OF THE ACCIDENT AT THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT

A. N. STOJAROV^a, V. V. KHRUSTALEV^a

^aBelarusian State Medical University,
83 Dziarzhynskaya Avenue, Minsk 220116, Belarus
Corresponding author: A. N. Stojarov (stojarov@mail.ru)

Образец цитирования:

Стожаров АН, Хрусталёв ВВ. Заболеваемость жителей Беларуси, облученных I-131 во время внутриутробного развития в результате аварии на Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;3:57–64 (на англ.).
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-57-64>

For citation:

Stojarov AN, Khrustalev VV. Analysis of the morbidity of residents of Belarus who received thyroid exposure due to the accumulation of I-131 during fetal development as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;3:57–64.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-57-64>

Авторы:

Александр Николаевич Стожаров – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры радиационной медицины и экологии.
Владислав Викторович Хрусталёв – доктор биологических наук, доцент; заведующий кафедрой общей химии.

Authors:

Alexander N. Stojarov, doctor of science (biology), full professor; professor at the department of radiation medicine and ecology. stojarov@mail.ru
Vladislav V. Khrustalev, doctor of science (biology), docent; head at the department of general chemistry. vvkhrustalev@mail.ru

Analysis of the cohort of individuals living in the Stolín district of the Brest region, who received exposure during prenatal development due to the accumulation of I-131 in the thyroid gland, has shown that both the general morbidity and the morbidity of the nervous, cardiovascular, genitourinary systems, and also of the gastrointestinal tract, are increased and differs from the incidence in individuals, identical in a number of parameters, who were not exposed to radioactive iodine *in utero*. The study cohort was dominated by relatively small doses to the thyroid gland, not exceeding 30 mGy. And only 10 % of the irradiated doses were about 100 mGy. In the group of children irradiated *in utero* with I-131 in subsequent years, a linear incidence rate for mental and behavioral disorders (Chapter V according to ICD-10) is observed, which is almost three times higher than in the group of non-irradiated individuals. Approximately the same dependence can be observed in the group of diseases of the nervous system (Chapter VI). The frequency of diseases of the circulatory system (Chapter IX) in the main group was approximately 2.5 times higher than in the control group. In a cohort of children who were exposed to I-131 *in utero*, the incidence of diseases of the genitourinary system (Chapter XIV) was noted throughout the entire observation period, i.e. until 2017 and was increased by about 4 times. The appearance of the pathology was delayed, and it has started to manifest 10 years after the Chernobyl accident. In most cases, the incidence in the group of non-exposed persons had a sigmoid dependence and reached a plateau without further increase. In contrast, in the group of exposed victims, the incidence tends to increase. The observed data may be explained by the variable sensitivity of certain genes of the thyroid tissue to radiation. They might become up- or downregulated and lead to an altered thyroid hormone background, which affected all body systems without exception, subsequently causing the appearance of multiple pathology.

Keywords: I-131; morbidity; incidence; nervous system; cardiovascular system; genitourinary systems; gastrointestinal tract; thyroid.

Introduction

It is known that radiation accidents at nuclear fuel cycle enterprises are accompanied by the release of uranium fission products, including iodine isotopes, into the environment. I-131 is dominant among them. This product accumulates mainly in the thyroid gland (TG), which leads to its exposure. Earlier, we studied a cohort of women living in the Stolín district of the Brest region, who at various stages of pregnancy at the end of April 1986 fell under a radioactive cloud containing iodine isotopes because of the accident at the Chernobyl nuclear power plant (ChNPP). The incidence of their pathology was studied over the next 30 years [1]. It was found that after a rather long period of time they had an increased incidence of cardiovascular pathology and pathology of the respiratory system, compared with the control group, who were pregnant later, after the breakdown of I-131 [2]. Cardiovascular pathology was represented mainly by primary hypertension [3]. At the same time, both essential hypertension and respiratory diseases were characterized by the dependence on the absorbed dose by the thyroid gland of women.

The analysis of the state of health of children born by those women is of an undoubted interest. The fact is that in addition to the neuro-hormonal and other relationships between the body of a woman and the fetus, one should consider the incorporation of radioactive iodine in the fetal thyroid gland because of its accumulation due to the passing of the transplacental barrier [4]. This accumulation led to the formation of a determined absorbed dose. It is known that the thyroid gland performs very important functions, regulating, among other things, the basic metabolism in the body and so the development of the organism itself. In this regard, it is of interest to analyze the health status of individuals who have received exposure to I-131 *in utero*.

We have been able to trace the relationship of women exposed as a result of the accident at the ChNPP with the children they gave birth to for three decades. Accordingly, the aim of the present study was to analyze the incidence of different pathologies in persons exposed during fetal development in comparison with a cohort of individuals who were born later, when I-131 had practically completely decayed.

Materials and methods

As the main group of individuals, residents of the Stolín district of the Brest region were taken, who were born by women who lived there in late April-early May 1986 and were affected by a radioactive cloud that passed through this region of Belarus. The cloud contained iodine radionuclides, including I-131. It entered the body of women by inhalation, orally with food, and also through the skin. Once inside the body, it was distributed, accumulated in the thyroid gland and entered the fetal body through the transplacental barrier, concentrating in its thyroid gland. The main cohort included 123 individuals, including 62 women and 61 men. Dates of birth were in the range of 06/03/1986-02/06/1987. The average value of the absorbed dose by the thyroid gland was 32.2 ± 3.31 , median 22 mGy, in males – 35.4 ± 5.4 , median 23 mGy, in females – 29.1 ± 3.9 , median 22 mGy.

When analyzing the effects of radiation on certain segments of the population, it is always necessary to have a comparison group consisting of individuals who have not received exposure. In this study, the comparison group also included residents of the Stolín district of the Brest region, but they were born later. In other words, mothers of persons from the control group did not receive radioactive «iodine shock». Control group included 113 individuals from the same region, identical not only in terms of residence, but also in social status: 57 of them were males and 56 of them were females. Their dates of birth were in the range of 01/03/1988–12/31/1988. The comparison group was selected taking into account the half-life of

I-131, which is about 8 days. For 10 half-lives, i. e. after 80 days, only trace activities of radioactive iodine remained in the medium and, consequently, the mothers of these children did not receive thyroid exposure during pregnancy.

Verified data on the state of health of exposed and non-exposed individuals were obtained from the State Register of Persons Affected by the Chernobyl Accident. Only primary morbidity was taken into account in the work.

Absorbed doses by the thyroid gland due to I-131 incorporation were calculated by the head of the laboratory for the reconstruction of exposure doses to the population of the State Scientific Center of the Federal Medical Biophysical Center A.I. named after Burnazyan FMBA of Russia, Doctor of Technical Sciences, S. M. Shinkarev. Doses were calculated using a semi-empirical model from the 2004 year iteration.

Statistical data processing was carried out using Statistics 10.0 (StatSoft. Inc., USA) and SigmaPlot 12.5 (Systat Software Inc., Germany).

This study was approved by the Ethics Commission of the Belarusian Association of Physicians (10.12.2020).

Results and discussion

First of all, it is necessary to assess the impact of radiation on children exposed in utero. Figure 1 shows a diagram of the distribution of absorbed doses on the thyroid gland of the mentioned children. Obviously, relatively small doses, that do not exceed 30 mGy, dominate there. And only 10 % of those doses were about 100 mGy.

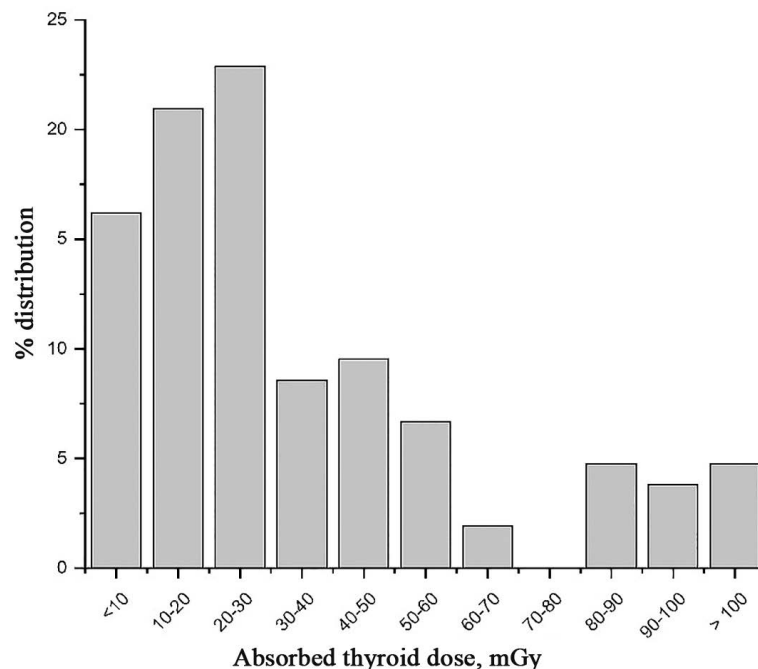


Fig. 1. Distribution of absorbed doses on the thyroid gland of children irradiated *in utero*

Fig. 2 shows the total cumulative incidence of pathology for exposed and non-exposed individuals. According to the search for mathematical dependencies and coefficients of determination (COD), the incidence in both cases is described by a sigmoid curve. It is clearly seen that the dynamics of the general morbidity in irradiated individuals differs from that characteristic of individuals who were not irradiated in 1986. For the first of them, the cumulative curve grows more or less evenly upwards. While in non-irradiated females and males, it reaches a plateau after 2000. Surprisingly, the sharper increase in incidence in the group of non-exposed individuals in 1996–2000 has been observed. An analysis of this phenomenon revealed that this rise is due to a large contribution of respiratory organs pathology to the common incidence (32 % vs. 13 % non-exposed). In other words, this rise was caused by a pathology of an infectious nature (flu, acute respiratory infections). Paradoxically, individuals irradiated in utero appeared to be more resistant to these diseases.

Consideration of gender differences in general morbidity showed that in the group of residents of the Stolin district exposed in utero, the nature of the manifestation differs in females and males. If in the group of girls exposed in utero, the incidence is characterized by a linear dependence, then in boys there is a sigmoid curve with a gradual decrease in the frequency of the pathology (Fig. 3). The cumulative morbidity of non-irradiated children of both sexes repeats the relationship shown in Fig. 2. The sigmoid curves are characterized by a sharp rise in the 1986–2000 period and they are almost overlapped with each other (Fig. 4). The sharp rise in incidence in this group has already been discussed. It is caused by a pathology of respiratory system of the infectious

nature. However, the cumulative incidence in the main group in 2016 is significantly higher than in the cohort of unexposed individuals.

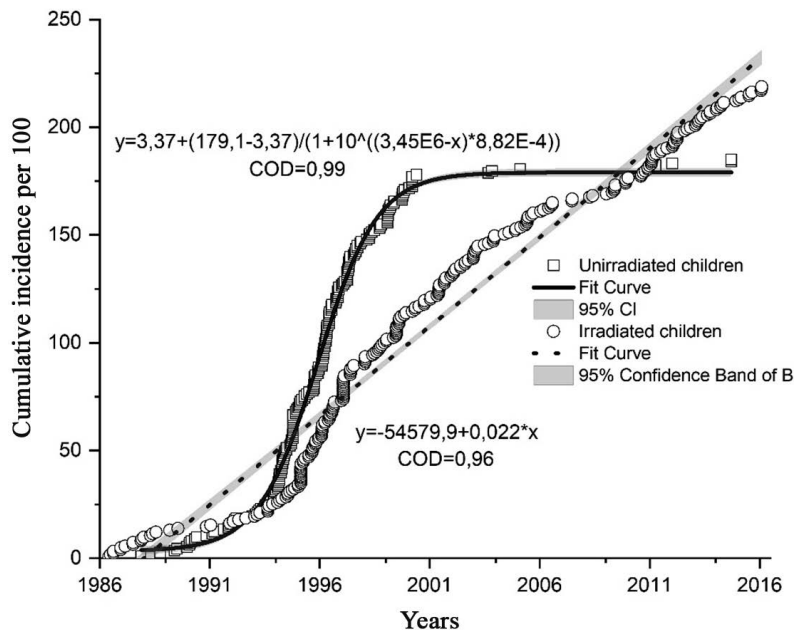


Fig. 2. Cumulative incidence for all classes of pathology in irradiated and non-irradiated individuals

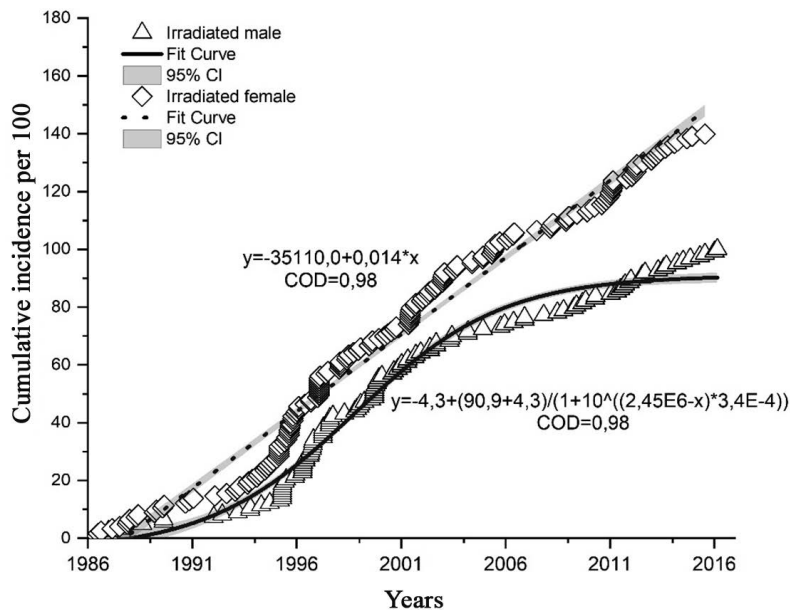


Fig. 3. Cumulative incidence in females and males who received thyroid expose *in utero*

Even more striking results were found after the analysis of different classes of diseases in the two study groups. This is especially noticeable when comparing the incidence of mental and behavioral disorders (Chapter V according ICD-10) (Fig. 5).

In the group of children irradiated in utero with I-131, in subsequent years a linear incidence rate is observed, which is almost three times higher than in the group of non-irradiated individuals. Moreover, in the latter, the incidence rate after 2001 year tends to form a plateau.

Approximately the same dependence can be observed in the group of diseases of the nervous system (Chapter VI) (Fig. 6). The incidence in the main group was significantly higher, and in the control group it tended to stabilize.

A similar character of the curves was noted in the group of diseases of the circulatory system (Chapter IX) (Fig. 7). In both cases, the approximation curves had an S-shaped character, but they reached a plateau at different time intervals: the cumulative morbidity curve in the group of those exposed in utero seems to stabilize after 2006,

while the morbidity curve in the control group reached a plateau after the year of 1993. The incidence rate in the main group was approximately 2.5 times higher than in the control group.

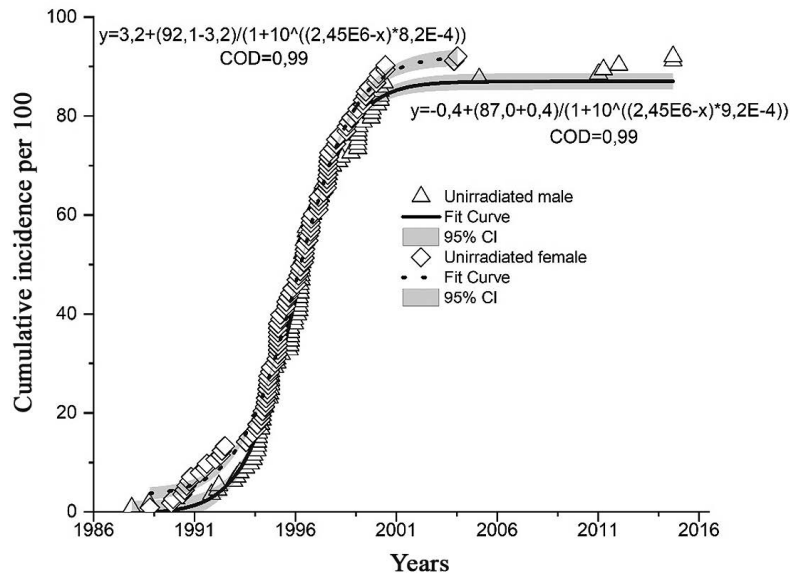


Fig. 4. Cumulative incidence in females and males who were not exposed to radioactive iodine

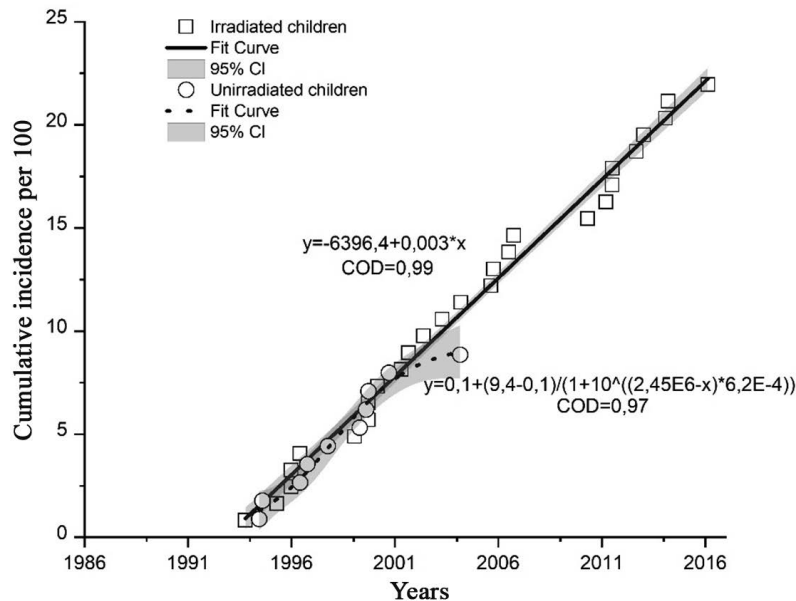


Fig. 5. Cumulative incidence of mental and behavioral disorders (Chapter V) in the group of exposed and non-exposed individuals

Interesting results were obtained after the analysis of morbidity in both cohorts for the group of diseases of the digestive system (Chapter XI) (Fig. 8). Morbidity in the group of residents of the Stolin region who were not exposed to irradiation of thyroid glands increased dramatically between 1995 and 2000. The morbidity curve of those exposed in utero was flatter and was characterized by a lower level of registration of this pathology. Among the latter, diseases of the stomach (gastritis), duodenum (duodenitis) and pathology of the biliary tract were recorded. It is rather difficult to explain this phenomenon.

The incidence of diseases of the genitourinary system (Chapter XIV) is shown in Fig. 9. Obviously, in the group of non-irradiated individuals, cases of this pathology were registered at the end of the 90s of the previous century. Later cases of morbidity were not recorded. On the other hand, in a cohort of children who were exposed to I-131 in utero, the incidence was recorded throughout the entire observation period (i.e. until 2017) and increased about 4 times.

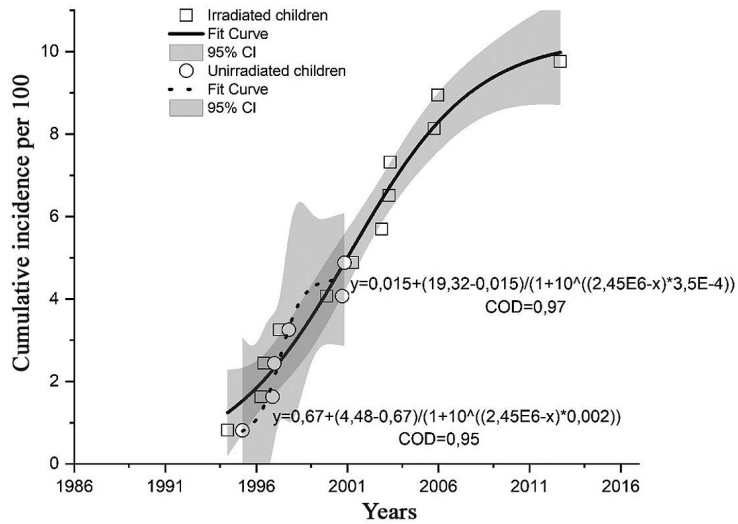


Fig. 6. Cumulative incidence of diseases of the nervous system (Chapter VI) in a group of exposed and non-exposed individuals

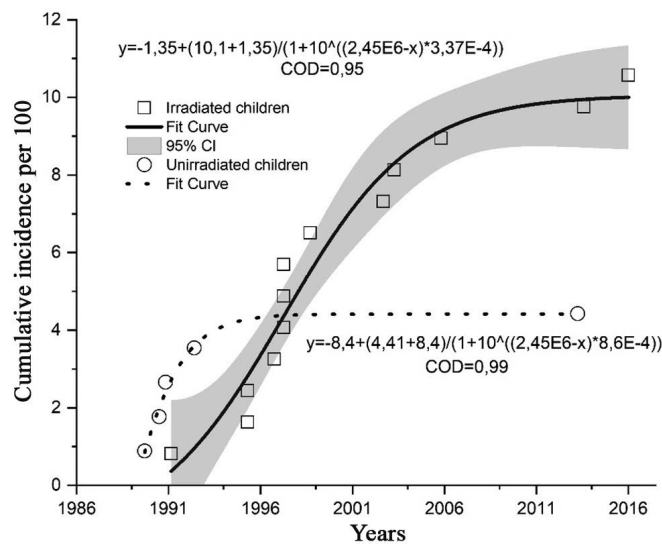


Fig. 7. Cumulative incidence of diseases of the circulatory system (Chapter IX) in the group of exposed and non-exposed individuals

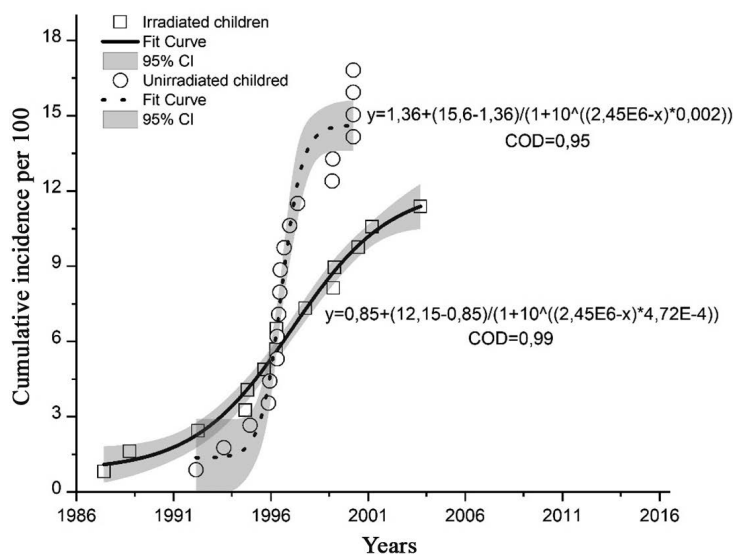


Fig. 8. Cumulative incidence of diseases of the digestive system (Chapter XI) in the group of exposed and non-exposed individuals

After the analysis of the presented results it became obvious that intrauterine irradiation of the thyroid gland with radioactive iodine, without any doubt, changed the morbidity of affected individuals in the future. This applies both to general morbidity and pathology of the nervous, cardiovascular, digestive and urinary-genital systems. Previously, we have already described changes in the incidence of primary hypertension in women who, during pregnancy, were exposed to I-131 released during the Chernobyl accident. The phenomenon was dose-dependent and did not appear immediately, but 15 or even 28 years after exposure. We explained this fact by the variable activity of genes under the action of radioactive iodine [3], their subsequent instability, and the close relationship between thyroid hormonal activity and the function of the cardiovascular system.

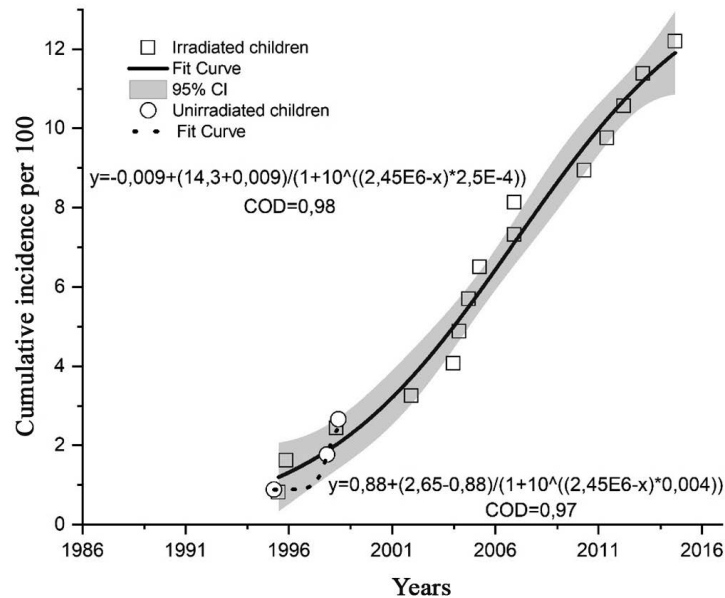


Fig. 9. Cumulative incidence of diseases of the genitourinary system (Chapter XIV) in the group of exposed and non-exposed individuals

Approximately the same data with morbidity maxima were found in relation to cerebrovascular pathology in victims who received radiation from radioactive iodine [5]. The maximum of this pathology was recorded in approximately the same range (12-21 years), but as a result of exposure to large absorbed doses.

The explanation of changes in morbidity in relation to the pathology of the nervous, digestive and genitourinary systems is more difficult. Thyroid hormones (3',5',3,5-L-tetraiodothyronine (T4), 3',5,3-L-triiodothyronine (T3), 3',5', 3-L-triiodothyronine (rT3) and 3',5',-L-diothyronine (3,5-T2) are involved in the development and functioning of the most of organs and systems of the body [6]. It is known that during the first trimester of pregnancy, the developing fetus needs maternal thyroid hormones (thyroxine, triiodothyronine) [7] Moreover, thyroid hormones have been shown to play an important role in the prenatal and postnatal development of the nervous system and are involved in several processes such as neurogenesis, gliogenesis, myelination, synaptogenesis, etc. [8]. Decrease in thyroxine level in the mother in the first trimester of pregnancy, regardless of whether it is accompanied by an increase in the level of thyroid-stimulating hormone, can lead to irreversible mental and psychomotor disorders. It has already been pointed out that certain thyroid genes can respond differently to radiation exposure due to the incorporation of I-131 [9]. It is quite possible that this mechanism may be responsible for the increased incidence in the main group in relation to diseases of the nervous system, as well as mental and behavioral disorders. In other words, the decrease in thyroxin during the in utero development may be associated with the subsequent appearance of mental pathologies, which we observe.

Interpretation of changes in the incidence of the digestive system pathology is quite difficult due to the paucity and contradictive nature of publications on the effect of the thyroid gland pathology on the development of gastrointestinal tract diseases. Thyroid hormones play an important role in the development of the gastrointestinal tract [10; 11; 12]. There is the evidence of the effect of a deficiency or excess of thyroid hormone production on intestinal motility, as well as on microscopic lesions of its epithelial layer [13; 14]. Thyroid hormones play an important role in the functioning of the liver [15]. Changes in their production level, from our point of view, can serve as the basis for the development of pathology in the long term.

There is much more research on the relationship between thyroid gland pathology and diseases of the genitourinary system. It has been established that thyroid hormones affect both the development and function of the kidneys [16; 17] causing changes in both glomerular filtration and mineral metabolism [18]. Thyroid dysfunction causes marked changes in glomerular and tubular functions, electrolyte and water homeostasis [19]. Therefore, the

instability of the genome occurred after radiation exposure, as well as the variability of thyroid genes expression after the accumulation of I-131 in it, can explain the data described above. The altered function of the TG may be the cause of the change in morbidity in the group of individuals affected in 1986.

Conclusion

The incidence of pathology, both the general one and for individual organs and systems (nervous, cardiovascular, digestive tract, genitourinary systems), is significantly increased in the group of individuals who, during fetal development, received thyroid irradiation due to transplacental intake of radioactive iodine from their mothers because of the accident at the ChNPP. Their incidence of pathology is progressive, in contrast to the incidence for non-irradiated persons, which stabilized over time. This may be due to the effect of I-131 on the genome of thyrocytes, leading to altered thyroid regulation of various organs and systems of the body.

References

1. Stojarov AN., Khrustalev VV, Odinzova-Stojarova DA. Non-Cancer Morbidity of Women Irradiated During Pregnancy Due to the Incorporation of I-131 as a Result of the Chernobyl Accident. *International Journal of Clinical Studies & Medical Case Reports*. 2021;10:1–3. DOI: 10.46998/IJCMCR.2021.10.000233.
2. Stojarov AN, Khrustalev VV. Delayed Consequences of The Radioactive Iodine Intake by Pregnant Women from The Side of Respiratory System. *American Journal of Biomedical Science & Research*. 2022;15(2):210–216. DOI: 10.34297/AJBSR.2022.15.002092.
3. Stojarov AN, Khrustalev VV, Adzintsova-Stazharava DA. Cardiovascular Pathology in Women Who Received Radioactive Iodine Exposure During Pregnancy as a Result of the Chernobyl Accident. *Biomedical Journal of Scientific and Technical Research*. 2021;37(2):29320–29328. DOI:10.26717/BJSTR.2021.37.005984.
4. Sally RJ, Jayne AF, Kilby MD. Placental transport of thyroid hormone. *Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism*. 2007;21(2):253–264. DOI:org/10.1016/j.beem.2007.03.001.
5. Buzunov VO, Kapustynska OA. Epidemiological studies of cerebrovascular disease of the population evacuated from the 30/km zone of the ChNPP at the age of 18/60 years. Analysis of influence of internal ionizing radiation on the thyroid gland I-131. *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*. 2018;23:96–106. DOI: 10.33145/2304-8336-2018-23-96-106.
6. Harper, ME, Seifert, EL Thyroid Hormone Effects on Mitochondrial Energetics. *Thyroid*. 2008;18(2):145–156. DOI: 10.1089/thy.2007.0250.
7. Morreale de Escobar G. The role of thyroid hormone in fetal neurodevelopment. *Journal Pediatric Endocrinology and Metabolism*. 2001;14(6):1453–1462.
8. Carreón-Rodríguez A, Pérez-Martínez L. Clinical implications of thyroid hormones effects on nervous system development. *Pediatric Endocrinology Reviews*. 2012;9(3):644–649.
9. Rudqvist N. Radiobiological effects of the thyroid gland. Gothenburg: University of Gothenburg; 2015. 69 p.
10. Koldovský O, Dobiášová M, Hahn P, Kolínská J, Kraml J, Pácha J. Development of gastrointestinal functions. *Physiological Research*. 1995;44(6):341–348.
11. Lebenthal A, Lebenthal E. The Ontogeny of the Small Intestinal Epithelium. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*. 1999;23(55):S3–S6.
12. Brown A, Simmen R, Simmen F. The Role of Thyroid Hormone Signaling in the Prevention of Digestive System Cancers. *International Journal of Molecular Sciences*. 2013;14(8):16240–16257. DOI: org/10.3390/ijms140816240.
13. Gregory CH, Gregory RF, Gregor R. Effect of endocrine glands on function of the gastrointestinal tract. *The American Journal of Surgery*. 1969;117(6):893–906. DOI: 10.1016/0002-9610(69)90079-8.
14. Ebert EC. The Thyroid and the Gut. *Journal of Clinical Gastroenterology*. 2010;44(6):402–406. DOI:10.1097/MCG.0b013e3181d6bc3e.
15. Malik R. The relationship between the thyroid gland and the liver. *An International Journal of Medicine*. 2002;95(9):559–569. DOI:org/10.1093/qjmed/95.9.559.
16. Iglesias P, Díez JJ. Thyroid dysfunction and kidney disease. *European Journal of Endocrinology*. 2009;160(4):503–515. DOI: org/10.1530/EJE-08-0837.
17. Mansourian AR. A Review of Literatures on the Adverse Effects of Thyroid Abnormalities and Liver Disorders: An Overview on Liver Dysfunction and Hypothyroidism. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 2013;16(23):1641–1652.
18. Katz AI, Emmanouel DS, Lindheimer MD. Thyroid Hormone and the Kidney. *Nephron*. 1975;15(3–5):223–249. DOI: 10.1159/000180514.
19. Iglesias P, Bajo MA, Selgas R, Díez JJ. 2017. Thyroid dysfunction and kidney disease: An update. *Reviews Endocrine and Metabolic Disorders*. 2017;18:131–144.

Статья поступила в редакцию 29.06.2023.
Received by editorial board 29.06.2023.

МЕТАБОЛИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СУБПОПУЛЯЦИЙ ДЕНДРИТНЫХ КЛЕТОК

А. С. ТАЛАНКИНА¹⁾, А. Е. ГОНЧАРОВ¹⁾

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

Метаболизм представляет собой важный механизм, обеспечивающий жизненную активность клеток и являющийся неотъемлемой функцией всех живых организмов. Недавние исследования обнаружили уникальные аспекты метаболизма в дендритных клетках, профессиональных антиген-представляющих клетках. Ранее считалось, что ДК относительно пассивны в обмене веществ, однако последние исследования демонстрируют их сложную метаболическую активность, включающую энергетический обмен и синтез биохимических молекул. Метаболические процессы в дендритных клетках имеют непосредственное влияние на их функциональные свойства и взаимодействие с другими клетками. Они также оказывают влияние на функции иммунитета и противоопухолевого ответа, так как дендритные клетки играют важную роль в представлении антигенов и активации иммунной системы. Сегодня значительное внимание уделяется роли дендритных клеток в контексте онкологических заболеваний, которые представляют собой группу наиболее опасных патологий, среди которых злокачественные новообразования выделяются своей агрессивностью и способностью уходить от иммунного контроля. Особенности метаболизма дендритных клеток в новообразованиях включают активацию гликолиза, усиленную потребность в аминокислотах и измененные метаболические пути. Изучение метаболических особенностей ДК предоставляет возможность разработки стратегий метаболической манипуляции для модулирования иммунного и противоопухолевого ответа. Кроме того, открываются новые перспективы для развития инновационных иммунотерапевтических стратегий, нацеленных на улучшение эффективности лечения рака и повышение выживаемости пациентов. Это важное направление исследований, которое может привести к разработке новых терапевтических подходов и персонализированного лечения онкологических заболеваний. В статье рассматриваются последние исследования, посвященные особенностям метаболизма различных субпопуляций дендритных клеток в контексте онкологических заболеваний, а также обсуждается влияние метаболических изменений на иммунные реакции и возможные стратегии использования этих сведений в разработке новых методов лечения новообразований.

Ключевые слова: дендритные клетки; метаболизм; гликолиз; окислительное фосфорилирование; цикл Кребса; окисление жирных кислот.

METABOLIC FEATURES OF DENDRITIC CELL SUBPOPULATIONS

A. S. TALANKINA^a, A. E. GONCHAROV^a

^aInstitute of Biophysics and Cell Engineering, National Academy of Sciences of Belarus
27 Akademichnaja Street, Minsk 220072, Belarus
Corresponding author: A. S. Talankina (atalankinaa@gmail.com)

Metabolism is an important mechanism that ensures the vital activity of cells and is an integral function of all living organisms. Recent studies have uncovered unique aspects of metabolism in dendritic cells, professional antigen-presenting cells.

Образец цитирования:

Таланкина АС, Гончаров АЕ. Метаболические особенности субпопуляций дендритных клеток. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;3:65–77.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-65-77>

For citation:

Talankina AS, Goncharov AE. Metabolic features of dendritic cell subpopulations. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;3:65–77. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-65-77>

Авторы:

Анна Сергеевна Таланкина – аспирант, лаборатория иммунологии и вирусологии.
Андрей Евгеньевич Гончаров – кандидат медицинских наук, доцент; директор.

Authors:

Anna S. Talankina, postgraduate student, laboratory of immunology and virology.
atalankinaa@gmail.com
Andrey E. Goncharov, PhD (medicine), docent; director.
andrei.hancharou@gmail.com

It was previously believed that DCs were relatively passive in metabolism, however, recent studies demonstrate their complex metabolic activity, including energy metabolism and the synthesis of biochemical molecules. Metabolic processes in dendritic cells have a direct impact on their functional properties and interaction with other cells. They also influence immune function and antitumor response, as dendritic cells play an important role in antigen presentation and immune system activation. Today, considerable attention is paid to the role of dendritic cells in the context of oncological diseases, which represent a group of the most dangerous pathologies, among which malignant neoplasms stand out for their aggressiveness and ability to evade immune control. Features of dendritic cell metabolism in neoplasms include glycolysis activation, increased amino acid requirements, and altered metabolic pathways. The study of the metabolic features of DC provides an opportunity to develop strategies for metabolic manipulation to modulate the immune and antitumor response. In addition, new prospects are opening up for the development of innovative immunotherapeutic strategies aimed at improving the effectiveness of cancer treatment and improving patient survival. This is an important area of research that could lead to the development of new therapeutic approaches and personalized cancer treatment. This article reviews the latest research on the characteristics of the metabolism of various subpopulations of dendritic cells in the context of oncological diseases and discusses the impact of metabolic changes on immune responses and possible strategies for using this information in the development of new treatments for neoplasms.

Keywords: dendritic cells; metabolism; glycolysis; oxidative phosphorylation; Krebs cycle; fatty acid oxidation.

Введение

Дендритные клетки (ДК) играют важную роль в иммунной системе, действуя как часовые, которые захватывают и обрабатывают антигены, чтобы инициировать адаптивные иммунные ответы. ДК уникальны среди иммунных клеток по своей способности обрабатывать и представлять антигены Т-клеткам, которые необходимы для инициации и направления адаптивных иммунных ответов. Кроме того, ДК высоко специализированы в своих метаболических процессах, которые тесно связаны с их функциями презентации антигена и иммунной регуляции [1; 2].

Метаболизм в ДК стал ключевым регулятором их функций и способности вызывать эффективные иммунные ответы. Недавние исследования показали, что эти клетки демонстрируют различные метаболические профили, которые имеют решающее значение для их созревания, миграции и презентации антигена. Показано, что такие метаболические пути, как гликолиз, окислительное фосфорилирование и окисление жирных кислот, играют решающую роль в регуляции функций ДК [3; 4].

Понимание метаболических путей, которые регулируют функции ДК, необходимо для разработки новых терапевтических стратегий для модуляции иммунных ответов. Исследование нацелено на обзор текущего состояния научных знаний о метаболических путях, регулирующих функции ДК, и их роли в иммунной регуляции. Уделено внимание интеграции этих путей с сигнальными путями, которые контролируют созревание, миграцию и презентацию антигена ДК, а также изучение потенциала нацеливания на эти пути для иммунотерапии.

Подмножества и локализация дендритных клеток. ДК представляют собой гетерогенную популяцию клеток, которые можно разделить на отдельные подмножества в зависимости от их местоположения, фенотипа и функции [1]. Например, классические ДК (кДК) можно найти в лимфоидных и нелимфоидных тканях, где они специализируются на презентации антигена наивным Т-клеткам. И наоборот, плазмоцитоподобные ДК (пДК) преимущественно обнаруживаются в лимфоидных тканях и известны своей способностью продуцировать интерфероны типа I в ответ на вирусные инфекции. Другие подмножества ДК, такие как моноцитарные ДК (моДК), макрофагоподобные ДК (мДК), клетки Лангерганса, дермальные ДК и мигрирующие ДК, также были описаны и играют важную роль в различных аспектах иммунной регуляции [6; 8].

Классические ДК представляют собой тип иммунных клеток, играющих критическую роль в инициации иммунных ответов. В подмножестве кДК есть две основные популяции: кДК1 и кДК2. Эти две популяции имеют разное происхождение, поверхностные маркеры и функциональные свойства. В указанной группе клеток выделяют две основные линии: CD141+кДК1 и CD1c+кДК2 [9]. Классические дендритные клетки 1 типа характеризуются экспрессией фактора транскрипции *Batf3* и таких поверхностных маркеров, как CD141, CD8a, XCR1 и *Slec9a*. Они участвуют в презентации экзогенных антигенов на молекулах МНС класса I и перекрестной презентации экзогенных антигенов на молекулах МНС класса II. Этот тип клеток важен для индукции ответов CD8+ Т-клеток и образования цитотоксических Т-лимфоцитов против вирусных инфекций и опухолей. Они также продуцируют интерфероны типа I (IFN) и IL-12, которые важны для активации NK-клеток и стимулирования иммунных ответов Th1-типа [10–12]. Классические дендритные клетки 2 типа характеризуются экспрессией фактора транскрипции *IRF4* и таких поверхностных маркеров, как CD1c, CD11b, CD172a и *Sirpa*. Они участвуют в презентации экзогенных антигенов на молекулах МНС класса II и активации ответов CD4+ Т-клеток. Также кДК2 важны для индукции иммунных

ответов Th2 и Th17-типа и стимулирования гуморального иммунитета. Они продуцируют ИЛ-10, обладающий иммунодепрессивным действием и помогающий ограничить чрезмерные иммунные реакции [12; 13].

Как кДК1, так и кДК2 играют важную роль в иммунной системе и участвуют в индукции различных типов иммунных ответов. Понимание различных функций этих двух популяций важно для разработки таргетной терапии различных заболеваний (онкологических и аутоиммунных заболеваний) [6].

Плазмацитоидные ДК характеризуются экспрессией фактора транскрипции IRF7 и таких поверхностных маркеров, как CD123 и BDCA2. пДК уникальны среди ДК по своей способности продуцировать большое количество IFN типа I, которые важны для противовирусных активации врожденных и адаптивных иммунных ответов. Они достигают этого, распознавая вирусные нуклеиновые кислоты через Toll-подобный рецептор (TLR) 7 и TLR9, который активирует фактор транскрипции IRF7 и приводит к продукции IFN I типа. Этот тип клеток в том числе способен продуцировать такие регуляторные цитокины, как IL-10 и TGF- β [6; 14].

В дополнение к их роли в вирусных инфекциях, пДК также участвуют в патогенезе аутоиммунных заболеваний – волчанка и псориаз, поскольку они могут продуцировать аутоантитела и активировать аутореактивные Т-клетки. Однако пДК также играют регулируемую роль в иммунной системе, поскольку они могут продуцировать иммунодепрессивные цитокины и индуцировать толерантность [14; 15]. Клиническое значение присутствия пДК в микроокружении опухоли (ТМЕ) все еще неоднозначно, но ясно, что данный типа клеток обладает способностью модулировать опухолеспецифические Т-клеточные ответы и направлять цитотоксические функции.

Работа Villani, et. al. продемонстрировала, что в мононуклеарных клетках периферической крови (PBMC) можно выделить по крайней мере шесть кластеров ДК и четыре моноцита, используя профилирование одноклеточной РНК. Один из этих кластеров, названный AXL+SIGLEC6+DC (AS DC), составляет около 2–3 % всех ДК в крови и характеризуется уникальными маркерами, такими как AXL и SIGLEC6. Однако этот подтип не связан функционально с пДК, не распознает патогены и не вырабатывает IFN I типа, что отличает их от традиционных функций пДК [16].

В целом, пДК являются важным подмножеством ДК, которые играют критическую роль в регуляции иммунных ответов и защите от вирусных инфекций. Дальнейшие исследования функции и регуляции пДК могут привести к новым методам лечения инфекционных и аутоиммунных заболеваний.

Моноцитарные дендритные клетки (моДК) характеризуются экспрессией фактора транскрипции IRF4 и поверхностных маркеров, таких как CD1c, CD11c и HLA-DR. Они образуются из моноцитов в ответ на действие таких цитокинов, как GM-CSF и IL-4, которые способствуют их дифференцировке в ДК [17]. Это подмножество ДК известно своей способностью активировать ответы Т-клеток и способствовать дифференцировке наивных Т-клеток в эффекторные Т-клетки. Такое действие достигается представлением антигенов на своей поверхности и предоставлением костимулирующих сигналов Т-клеткам, что приводит к их активации и пролиферации [12; 18]. Моноцитарные ДК также участвуют в регуляции иммунных ответов, поскольку они могут продуцировать такие иммуносупрессивные цитокины, как IL-10 и TGF- β [19]. Это помогает ограничить чрезмерные иммунные реакции и предотвратить повреждение тканей. Они генерируются в ответ на воспаление и могут быть обнаружены в различных условиях (инфекционные, аутоиммунные и онкологические заболевания). Их способность активировать ответы Т-клеток и регулировать иммунные ответы делает их перспективной мишенью для иммунотерапии, особенно в контексте иммунотерапии онкозаболеваний [17].

Итак, моДК представляют собой важную подгруппу ДК, которые играют критическую роль в регуляции иммунных ответов и активации ответов Т-клеток. Дальнейшие исследования функции и регуляции этого подвида ДК могут привести к новым методам лечения инфекционных и аутоиммунных заболеваний, а также злокачественных новообразований.

ДК отличаются высокой пластичностью и способностью приспосабливаться к различным средам. Один из способов, которым они достигают этой пластичности, – это модулирование их метаболических процессов. Как и другим клеткам, ДК требуются энергия и питательные вещества для поддержания своих функций (поглощение, процессинг и презентация антигена, продукция цитокинов и миграция в лимфоидные ткани). Однако эти клетки имеют уникальные метаболические потребности, которые отличаются от других иммунных клеток, таких как макрофаги или Т-клетки [20; 21].

Недавние исследования сообщают, что ДК подвергаются метаболической перестройке во время их активации и дифференцировки [22–24]. Например, незрелые ДК полагаются на окислительное фосфорилирование и окисление жирных кислот для производства энергии, тогда как зрелые ДК активируют гликолиз и снижают окислительное фосфорилирование. Этот сдвиг в метаболическом профиле имеет решающее значение для зрелых ДК, чтобы удовлетворить высокие энергетические потребности презентации антигена и продукции цитокинов. Более того, ДК также могут модулировать свои метаболические пути, чтобы

реагировать на различные сигналы окружающей среды: гипоксию, доступность питательных веществ или инфекцию [25].

Стоит подчеркнуть важность метаболических путей в регуляции функций ДК и их роль в формировании иммунных ответов. Например, ингибирование гликолиза или окисления жирных кислот может нарушать созревание ДК и представление антигена, тогда как активация этих путей может усиливать функции ДК. Кроме того, было показано, что метаболические пути регулируют другие аспекты биологии ДК: миграцию, продукцию цитокинов и иммуномодуляцию [26; 27].

В исследовании рассматриваются метаболические пути, которые регулируют функции ДК и их интеграцию с сигнальными путями, которые контролируют активацию и дифференцировку ДК. Затронется тема, как перестройка метаболизма может повлиять на функции ДК в различных контекстах, таких как инфекция, воспаление или злокачественные новообразования. В качестве исследовательской задачи было определено потенциальное нацеливание на метаболические пути для иммунотерапии, а также проблемы и возможности этого подхода. В целом, понимание сложного взаимодействия между метаболизмом и иммунитетом при ДК имеет решающее значение для разработки новых методов лечения нарушений, связанных с иммунитетом.

Метаболические характеристики дендритных клеток. Метаболизм клеток считается консервативной регуляторной цепью, которая регулирует функцию и выживание иммунных клеток. ДК играют решающую роль в иницировании и регуляции иммунных реакций и полагаются на жестко регулируемый метаболизм для запуска иммунного ответа или повышения толерантности. Вследствие недостатка исследований *in vitro* и дефицита ДК в доступных тканях, в понимании метаболизма ДК есть пробелы, которые еще предстоит заполнить [23].

Существует пять основных метаболических путей в ДК:

1. Гликолиз. Метаболический путь, который расщепляет глюкозу до пирувата для производства энергии в форме АТФ. ДК в значительной степени зависят от гликолиза для удовлетворения своих энергетических потребностей, особенно в процессе их активации и созревания.

2. Окислительное фосфорилирование. Представляет собой метаболический путь, который происходит в митохондриях и генерирует АТФ через цепь переноса электронов. ДК имеют высокое содержание митохондрий и используют окислительное фосфорилирование для производства энергии в обычных условиях.

3. Цикл трикарбоновых кислот (ТСА). Известный как цикл лимонной кислоты или Кребса и является центральным метаболическим путем, который генерирует АТФ, а также обеспечивает промежуточные продукты для других метаболических путей. ДК используют цикл ТСА для производства энергии, биосинтетических предшественников и для регуляции иммунных реакций.

4. Окисление жирных кислот. ДК также могут использовать жирные кислоты в качестве источника энергии посредством процесса, называемого окислением жирных кислот. Этот метаболический путь важен для клеток, которые находятся в состоянии покоя и имеют низкую потребность в энергии.

5. Метаболизм аминокислот. ДК могут метаболизировать аминокислоты для производства энергии, но они также используют их для удовлетворения своих биосинтетических потребностей. Аминокислоты являются важными предшественниками для производства белков, нуклеотидов и других необходимых молекул.

Эти метаболические пути жестко регулируются в ДК и играют важную роль в поддержании таких функций, как презентация антигена, продукция цитокинов и иммунная регуляция.

Гликолиз в дендритных клетках. Гликолиз – это центральный метаболический путь, который превращает одну молекулу глюкозы в две молекулы пирувата, генерируя в процессе АТФ и НАДН. У этого пути есть ответвления, в том числе пентозофосфатный путь (ППП), который позволяет производить НАДФН, кофактор, важный для синтеза нуклеотидов и синтеза жирных кислот. Было показано, что гликолиз играет критическую роль в регуляции функций ДК, особенно в процессе их активации и созревания. При активации ДК усиливается гликолиз и подавляется окислительное фосфорилирование, что приводит к изменению их метаболического профиля [25; 28].

Гликолиз регулируется рядом ферментов, катализирующих последовательные реакции, включая гексокиназу, фосфофруктокиназу и пируваткиназу. Данные ферменты контролируются несколькими сигнальными путями, такими как ось PI3K-Akt-mTOR, путь AMPK и путь HIF-1 α . Эти пути активируются в ответ на различные сигналы окружающей среды: факторы роста, цитокины или гипоксия [24; 29].

Некоторые исследования показали, что гликолиз необходим для созревания ДК и презентации антигена [30]. Ингибирование гликолиза 2-дезоксиглюкозой (2-DG) или другими ингибиторами гликолиза нарушает созревание ДК и представление антигена Т-клеткам [30; 31]. Напротив, стимуляция гликолиза глюкозой или другими гликолитическими активаторами усиливает созревание ДК и презентацию антигена [23]. Эти эффекты опосредованы различными механизмами: регуляция продукции цитокинов, поверхностная экспрессия костимулирующих молекул или лизосомальная функция.

Кроме того, было показано, что гликолиз регулирует другие аспекты биологии ДК: миграцию и иммуномодуляцию. Ингибирование гликолиза 2-DG или другими ингибиторами гликолиза ухудшает миграцию ДК в лимфоидные ткани, тогда как активация гликолиза усиливает миграцию ДК. Этот эффект опосредован регуляцией хемокиновых рецепторов и динамикой актинового цитоскелета [31]. Кроме того, было показано, что гликолиз регулирует выработку ДК иммуномодулирующих молекул, таких как индоламин-2,3-диоксигеназа (IDO) или IL-10, которые могут влиять на исход иммунных реакций [32; 33].

Цель работы, представленной в журнале «Nature Communications», – изучение влияния глюкозы на активацию ДК и ответы на Т-клетки. В ходе исследования было обнаружено, что высокие концентрации глюкозы в окружающей среде существенно подавляют способность ДК активировать Т-клетки и их продукцию цитокинов. Этот эффект происходит через подавление гликолиза и связанных с ним метаболических процессов в ДК. Выводы исследования указывают на значимость гликолиза в функционировании ДК и подчеркивают важность контроля уровня глюкозы в окружающей среде для эффективности иммунных ответов [34].

Shirai и его коллеги описали в своей статье роль РКМ2 – одного из четырех изомеров тканеспецифической пируваткиназы – в развитии коронарной болезни сердца (КБС) и его связь с метаболическими и воспалительными нарушениями. В ходе исследования было показано, что РКМ2 играет важную роль в регуляции метаболизма и воспалительного ответа в клетках сердечной мышцы. Высокие уровни этого фермента были обнаружены в макрофагах, а также в крови и тканях пациентов с КБС. Увеличение уровней РКМ2 сопровождалось повышенной продукцией цитокинов и метаболической дисфункцией в макрофагах и мышечных клетках сердца. Результаты указывают на важность регуляции уровней РКМ2 в контроле метаболических и воспалительных процессов в КБС [35].

Исследование, представленное Adamik, et. al., сообщает об изучении метаболических состояний, которые регулируют развитие воспалительных и толерогенных ДК. Авторы проводили сравнительный анализ метаболических путей в ДК, обладающих разными функциональными свойствами. В итоге было показано, что воспалительные ДК имеют высокий уровень гликолиза и окисления жирных кислот, в то время как толерогенные ДК используют окислительный фосфорилирующий путь энергопроизводства [36].

Следовательно, гликолиз играет критическую роль в регуляции функций ДК и их способности вызывать эффективные иммунные ответы. Понимание регуляции гликолиза в ДК и его интеграции с другими сигнальными путями необходимо для разработки новых методов лечения, нацеленных на ДК для иммунотерапии.

Окислительное фосфорилирование в дендритных клетках. Окислительное фосфорилирование (ОХРНOS) представляет собой метаболический путь, необходимый для производства анденозинтрифосфата в клетках. Выработка АТФ происходит за счет использования энергии, высвобождаемой при окислении питательных веществ (глюкозы, жирных кислот и аминокислот). Процесс происходит в митохондриях и включает перенос электронов от доноров электронов к акцепторам электронов, что приводит к формированию протонного градиента через внутреннюю мембрану митохондрий. Затем он используется АТФ-синтазой для производства АТФ.

Митохондрии играют важную роль в функционировании ДК. Они расположены вдоль дендритов и производят большую часть энергии, необходимой для нормальной работы клеток. Электрон-транспортная цепь, находящаяся в митохондриях, обеспечивает генерацию электрохимического потенциала, который используется для синтеза АТФ при окислительном фосфорилировании. Этот процесс включает в себя передачу электронов через электрон-транспортную цепь и создание градиента протонов через внутреннюю митохондриальную мембрану. Затем он используется АТФазой для синтеза АТФ. Зачастую, окислительное фосфорилирование связывают с производством энергии, однако оно также играет важную роль в других процессах, например, регулировании уровня кальция, участии в апоптозе и других процессах, не менее значимых для правильного функционирования нервной системы.

Одной из особенностей ДК является то, что дендриты могут быть очень длинными и иметь сложную структуру. Это означает, что митохондрии должны располагаться вдоль всего дендрита, чтобы обеспечивать необходимую энергию для работы клетки. Недавно было обнаружено, что процесс окислительного фосфорилирования в ДК может происходить не только в митохондриях, но и в других местах клетки, таких как эндоплазматические ретикулумы, пластинки плазмалеммы и синапсы [29]. Эти «локальные» процессы фосфорилирования важны для нормальной функции ДК. Например, они могут играть роль в регуляции кальция, который является ключевым сигнальным молекулой в нервной системе. Кроме того, локальное фосфорилирование может участвовать в регуляции синаптической пластичности, что имеет важное значение для обучения и памяти [37].

В ДК ОХРНOS играет важную роль в регуляции различных функций, таких как презентация антигена, продукция цитокинов и миграция. Современные исследования показали, что ингибирование этого пути

химическими ингибиторами или генетическими модификациями приводит к нарушению созревания ДК и презентации антигена [38; 39]. Следует упомянуть о том, что этот процесс участвует в продукции ДК таких провоспалительных цитокинов, как IL-12 и TNF- α ДК [39].

ОХРНOS важен для миграции ДК в лимфоидные ткани. Работа Chen, et al. свидетельствует, что ингибирование этого пути олигомицином ухудшает миграцию ДК [40], в то время как активация ОХРНOS с помощью АТФ или митохондриального разобщителя усиливает миграцию клеток. Этот процесс может также регулировать поляризацию ДК в сторону толерогенного или иммуногенного фенотипа. Например, ингибирование ОХРНOS метформинном способствует развитию толерогенного фенотипа в ДК за счет увеличения экспрессии IDO и IL-10 [39].

Несколько исследований показали, что ДК используют окислительное фосфорилирование для производства АТФ и что ингибирование пути приводит к нарушению функции ДК. Например, в статье, опубликованной в журнале «Nature Communications», исследователи обнаружили, что подавление ОХРНOS в ДК приводит к уменьшению презентации антигена – процессу, посредством которого ДК представляют такие чужеродные вещества, как патогены или раковые клетки, другим иммунным клеткам, чтобы инициировать иммунную реакцию [41].

В другом исследовании, опубликованном в журнале «Cell Reports», отмечается, что ОХРНOS необходим для миграции ДК – процесса, посредством которого ДК перемещаются от места поглощения антигена к лимфатическим узлам, где они активируют Т-клетки. Угнетение ОХРНOS в ДК нарушало их способность мигрировать в лимфатические узлы, что, в свою очередь, нарушало активацию Т-клеток и иммунные ответы [42].

Таким образом, ОХРНOS играет критическую роль в регуляции различных функций ДК. Управление активностью этого пути в ДК потенциально может быть терапевтической стратегией для модуляции иммунных ответов.

Цикл трикарбоновых кислот в дендритных клетках. Одним из метаболических путей, важных для функционирования ДК, является цикл трикарбоновых кислот (ТСА), также известный как цикл лимонной кислоты или цикл Кребса. Цикл ТСА представляет собой серию биохимических реакций, протекающих в митохондриях клеток и отвечающих за выработку энергии в виде АТФ. В дополнение к своей роли в производстве энергии цикл также генерирует промежуточные метаболиты, которые могут использоваться для таких путей биосинтеза, как синтез нуклеотидов и аминокислот. Недавние исследования показали, что цикл ТСА также важен для функции ДК [23; 29]. В частности, этот метаболический путь регулирует выработку цитокинов и хемокинов, которые важны для инициации и регуляции иммунных ответов [43]. Например, одно исследование показало, что ингибирование цикла ТСА в ДК приводит к снижению продукции цитокина IL-12, важного для дифференцировки Т-клеток в клетки Th1 [44]. Другие исследования свидетельствуют, что цикл ТСА регулирует продукцию других цитокинов и хемокинов, таких как IL-1 β , IL-6 и CCL5 [45,46]. В дополнение к своей роли в продукции цитокинов, цикл ТСА, по-видимому, также важен для антигенпрезентирующей функции ДК.

Презентация антигена – это процесс, посредством которого ДК демонстрируют антигены на своей клеточной поверхности Т-клеткам, что позволяет Т-клеткам распознавать определенные угрозы и реагировать на них. Недавние исследования показали, что цикл ТСА важен для образования АТФ, который необходим для транспорта антигенов на клеточную поверхность и для активации Т-клеток. В целом, цикл Кребса является критическим метаболическим путем, который играет важную роль в функционировании ДК. Регулируя выработку цитокинов и презентацию антигена, цикл ТСА дает возможность организовывать соответствующие иммунные ответы на широкий спектр угроз [47].

Итак, можно сделать вывод, что цикл Кребса является важным процессом в клетке, отвечающим за генерацию энергии в виде АТФ и участвующим в регуляции множества биологических процессов. Исследования показывают, что этот метаболический путь также играет важную роль в иммунной системе, регулируя выработку цитокинов и хемокинов, которые необходимы для инициации и регуляции иммунных ответов. Кроме того, цикл ТСА важен для образования АТФ, необходимого для транспорта антигенов на клеточную поверхность и активации Т-клеток. В целом, понимание роли цикла Кребса в клеточной биологии может помочь в разработке новых методов лечения различных заболеваний, связанных с нарушениями энергетического метаболизма и иммунной функции.

Окисление жирных кислот в дендритных клетках. Окисление жирных кислот (ОЖК, FAO) – это метаболический процесс, при котором жирные кислоты расщепляются для получения энергии в виде АТФ. В ДК FAO играет важную роль в регуляции продукции цитокинов и иммунных ответов. Известно, что они используют этот путь в качестве источника энергии, особенно в периоды активации или воспаления [29]. Это связано с тем, что FAO генерирует больше АТФ на молекулу жирной кислоты, чем гликолиз на молекулу глюкозы. Кроме того, этот метаболический путь с меньшей вероятностью производит активные

формы кислорода, которые могут повредить клетки [48]. Исследования показали, что ингибирование FAO в ДК может привести к снижению продукции цитокинов и нарушению иммунного ответа [49]. Это свидетельствует о том, что он является важным метаболическим путем для регуляции функции ДК. Кроме того, FAO также участвует в генерации антигенов для представления Т-клеткам [50]. ДК могут поглощать экзогенные липиды и превращать их в антигены для представления Т-клеткам. Этот процесс, известный как перекрестная презентация, важен для активации Т-клеток в ответ на инфекции и опухоли [51; 52]. В целом, FAO играет решающую роль в регуляции функции ДК и иммунных реакций.

Современные исследования демонстрируют, что метаболизм жирных кислот играет важную роль в регуляции функций ДК. Работа Basit, et. al. указывает на важность метаболизма жирных кислот в контроле иммунной реакции и установили, что ДК могут использовать жирные кислоты как источник энергии [53]. Другой эксперимент, проведенный в 2021 г., показал, что ДК могут утилизировать насыщенные жирные кислоты в электронном транспортном цепи митохондрий и генерировать энергию, что может иметь важные последствия для их функций [54]. В статье, опубликованной в 2015 г., авторы указывают на важность FAO для улучшения функций ДК. Исследователи установили, что FAO могут повышать экспрессию генов, связанных с иммунным ответом и уменьшать продукцию таких цитокинов, как TNF- α , в ДК [51]. В другом исследовании, опубликованном в 2016 г., авторы установили, что FAO могут улучшать антигенную презентацию и ДК и повышать способность этих клеток вызывать иммунный ответ [23].

Таким образом, FAO представляет собой сложный метаболический путь, который играет критическую роль в регуляции функции ДК и иммунных ответов. Способность модулировать этот путь может иметь терапевтическое значение для ряда заболеваний, включая онкологические заболевания и аутоиммунные расстройства.

Метаболизм аминокислот в дендритных клетках. Метаболизм аминокислот (АК) в ДК включает в себя несколько ключевых процессов: транспортировка и синтез белков, а также деградация АК. Процесс переноса АК в ДК происходит благодаря наличию специализированных белков на мембране клетки, называемых транспортерами АК. Эти белки связываются с АК и транспортируют их через клеточные мембраны. Некоторые из наиболее известных транспортеров АК включают в себя:

- симпорты (например, SLC1A1 и SLC6A19) – белки, которые транспортируют АК вместе с ионами или другими молекулами через мембрану, используя энергию электрохимического градиента;
- антипорты (например, SLC7A5 и SLC7A8) – белки, которые транспортируют АК в обратном направлении, чем симпорты, то есть против градиента концентрации. Они используют градиент протона или натрия для транспортировки АК;
- фасилитирующие транспортеры (например, SLC7A5 и SLC1A5) – белки, которые транспортируют АК, используя градиент концентрации. Они не используют энергию для транспортировки, но ее скорость может быть регулирована;
- натрий-зависимые транспортеры (например, SLC6A20, SLC7A11) – белки, которые транспортируют АК, используя градиент натрия.

Конкретные транспортеры, используемые для переноса аминокислот, зависят от типа клеток и тканей, а также от конкретной АК. Например, транспортеры SLC7A5 и SLC3A2 используются для трансфера лейцина, изолейцина и валина в мышечные клетки, а транспортёры SLC1A5 и SLC7A11 используются для доставки глутамина и цистеина в клетки иммунной системы.

Процесс переноса АК в ДК происходит благодаря наличию рибосом на дендритных отростках. Рибосомы используют мРНК, чтобы синтезировать белки, которые затем могут быть использованы для строительства клеточных структур и участвовать в различных биологических процессах.

Деградация АК происходит благодаря наличию различных ферментов в клетке: аминотрансферазы (трансаминазы), декарбоксилазы, аминогидролазы, уреазы и оксидазы. Некоторые из этих ферментов разрушают аминокислоты, освобождая отходы, которые затем могут быть использованы для получения энергии или других клеточных процессов [55–57].

АК участвуют в различных метаболических процессах и имеют решающее значение для контроля функции ДК. Исследования показывают, что ДК могут быть повреждены в результате изменений окружающей среды, которые связаны с увеличением уровня концентрации АК, таким образом, оказываясь уязвимыми к негативным воздействиям окружающей среды. У незрелых моДК наблюдается дисбаланс внутриклеточных АК, что приводит к ухудшению митохондриальной активности и снижению выработки АТФ, а также увеличивает поглощение глюкозы [58]. Работа Kakazu, et. al. показала, что прогрессирующий цирроз сопровождается дисбалансом АК в плазме, который подавляет созревание ДК. В результате проведенного исследования было обнаружено, что дисбаланс аминокислот приводит к снижению презентации антигенов (CD40, CD80, CD86, HLA-DR) и затрудняет миграцию в лимфоидные органы (CCR7) после добавления липополисахарида (ЛПС) к моДК. В том числе было установлено, что для созревания

ДК, помимо ветвисто-разветвленных аминокислот (ВСАА), в большей степени потребляются L-аспарат, L-цистин и L-глутамат. Эти аминокислоты являются ключевыми для энергетического метаболизма, так как связаны с малатно-аспаратным челноком, который отвечает за перенос электронов, образующихся в процессе гликолиза [59]. Также было выявлено, что введение разветвленных аминокислот (ВСАА) частично улучшает выработку цитокинов [60].

В статье, опубликованной в журнале «Nature», авторы сообщают о том, что мембранный транспортер SLC7A11 может действовать как молекулярный тормоз для процесса эффероцитоза, который отвечает за удаление умирающих клеток. Было обнаружено, что ингибирование функции SLC7A11 может ускорить заживление ран. Дальнейшие анализы выявили, что фармакологическое ингибирование, делеция или нокдаун SLC7A11, увеличивает эффероцитоз в ДК. Также этот транспортер высоко экспрессирован в ДК кожи, и секвенирование одноклеточной РНК показало его активацию в клетках врожденного иммунитета при воспалении кожи. SLC7A11-дефицитные ДК зависят от глюкозы, полученной из запасов гликогена, для увеличения эффероцитоза. Таким образом, SLC7A11 является негативным регулятором эффероцитоза, и его удаление может улучшить заживление ран, что имеет большое значение для лечения ран при диабете [61].

Таким образом, метаболизм аминокислот в ДК играет важную роль в поддержании функции нервной системы. Регуляция этих процессов может иметь важное значение для лечения различных неврологических, онкологических и других заболеваний.

Методы мониторинга метаболизма в дендритных клетках. Метаболизм в ДК играет важную роль в регулировании их развития, активации и функций. Поэтому мониторинг метаболизма является важным инструментом для изучения и понимания их функций и роли в иммунном ответе. Существует несколько методов мониторинга метаболизма в ДК, каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения и может быть применен в зависимости от конкретных целей исследования. В итоге, мониторинг метаболизма в ДК может привести к более глубокому пониманию их функций в иммунном ответе и открывать новые возможности для терапевтических стратегий при различных заболеваниях, связанных с нарушениями иммунного ответа:

1. Измерение уровня кальция. Кальций (Ca^{2+}) является важной сигнальной молекулой в нейронах и играет роль в регуляции метаболизма. В литературе описывается такой метод, как флуоресцентная микроскопия с индикаторами кальция, чтобы измерить изменения его уровня в ДК в реальном времени.

2. Измерение изменений pH. Различные метаболические процессы в клетках могут влиять на pH. Изменения кислотности ДК можно измерить с помощью флуоресцентных индикаторов.

3. Измерение электрической активности. Измерение электрической активности ДК может помочь в оценке метаболизма нейронов. Электрофизиологические методы (патч-клампинг и экстраклеточная запись) могут использоваться для измерения электрической активности клеток.

4. Измерение потребления кислорода. Известно, что ДК потребляют кислород при метаболических процессах. Для измерения потребления кислорода в дендритах можно применять микроэлектроды.

5. Измерение изменений концентрации метаболитов. Метаболиты являются продуктами метаболических процессов и могут использоваться в качестве показателей метаболизма. Такие методы, как масс-спектрометрия, могут использоваться для измерения изменений концентрации метаболитов в ДК.

Исследование Borgne, et. al. было направлено на разработку генетически закодированного биосенсора кальция для мониторинга сигналов кальция в режиме реального времени на ранней стадии активации Т-клеток. Биосенсор, названный mCameleon, использовался для мониторинга сигналов кальция на ранней стадии активации Т-клеток и для исследования роли различных сигнальных путей в передаче сигналов кальция. Было обнаружено, что специфические сигнальные пути кальция активируются во время активации Т-клеток и эти пути можно модулировать, чтобы влиять на их функцию. Хотя исследование не было сосредоточено конкретно на ДК, однако оно демонстрирует возможности для мониторинга передачи сигналов кальция во время активации Т-клеток, что является критическим аспектом взаимодействия ДК-Т-клеток [62].

Цель статьи, опубликованной в журнале «Nature Immunology», заключалась в исследовании метаболической перепрограммации ДК в ответ на стимуляцию рецепторов TLR. Авторы исследовали роль TANK-binding kinase 1 (TBK1) и I κ B kinase ϵ (IKK ϵ) в процессе метаболической перепрограммации ДК. Они показали, что стимуляция TLR приводит к активации TBK1 и IKK ϵ , которые в свою очередь индуцируют раннюю перепрограммацию гликолитического метаболизма ДК. Это проявляется в увеличении утилизации глюкозы и пентоз, сопровождающемся увеличением производства метаболитов, необходимых для анаболических процессов. Выводы статьи показывают, что переход ДК на альтернативный метаболический путь является неотъемлемой частью их активации в ответ на стимуляцию TLR. TBK1 и IKK ϵ играют важную роль в этом процессе, обеспечивая достаточное количество энергии и метаболитов для синтеза

белков и других биомолекул, необходимых для функционирования ДК. Эти результаты могут быть полезными для дальнейшего понимания метаболических механизмов, лежащих в основе иммунной активации и болезней, связанных с нарушением метаболизма. Одним из наиболее распространенных способов слежения за метаболизмом клеток является измерение концентраций метаболитов [30].

1. Хроматография высокого разрешения (HPLC) – метод, используемый для анализа сложных смесей, включая метаболиты. Он позволяет анализировать метаболиты в экстрактах ДК и определять их концентрацию. Источником примера стало исследование, опубликованное в журнале «Critical Reviews in Food Science and Nutrition». В нем авторы исследовали влияние полифенолов, входящих в состав пищевых продуктов, на функцию ДК. Для эксперимента были использованы различные методы анализа взаимодействия полифенолов с ДК, в том числе HPLC. Результаты свидетельствуют, что полифенолы могут регулировать функцию ДК, включая их способность активировать Т-клетки и производить цитокины. Было выявлено, что некоторые полифенолы могут ингибировать активацию ДК, тем самым оказывая иммуномодулирующее действие [65].

2. Масс-спектрометрия (MS) – метод, используемый для анализа молекул в смесях. MS также может использоваться для измерения концентрации метаболитов в ДК. Работа Imai, et. al. определяет механизм, по которому трансформирующий фактор роста $\beta 1$ (TGF- $\beta 1$) ингибирует миграцию ДК и способствует метастазированию опухолей в лимфоузлах. Для изучения этого механизма была использована масс-спектрометрическая техника анализа протеома. Исследование показало, что TGF- $\beta 1$ способствует ингибированию миграции ДК, приводящее к их накоплению в лимфатических узлах, что, в свою очередь, создает благоприятные условия для метастазирования опухолей. Также было установлено, что TGF- $\beta 1$ регулирует выражение многих белков, связанных с миграцией ДК, включая интегрины и цитоскелетные белки [66].

Указанный метод анализа использовали авторы в исследовании, опубликованном в журнале «Frontiers in Immunology». Целью работы было изучение метаболических изменений, которые происходят при активации пДК и мДК человека с помощью рецептора RIG-I. Сделаны выводы о том, что активация RIG-I приводит к различным изменениям метаболического профиля у ДК, происходящим в зависимости от их происхождения. В частности, пДК проявляют повышенную активность окислительного фосфорилирования, а мДК гликолиза, что может отражать различные требования этих клеток в процессе иммунной реакции на вирусы. Результаты могут быть полезными для более глубокого понимания роли метаболизма в функции ДК при ответе на инфекции [67].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что такой метод позволяет получить детальную информацию о механизмах регуляции белков и выявить новые потенциальные мишени для лечения заболеваний, связанных с метастазированием опухолей [66; 67].

3. Биосенсоры – метод, используемый для измерения концентрации метаболитов в реальном времени. Примером такого исследования является статья, опубликованная в журнале «Analytical and Bioanalytical Chemistry», в которой дается описание исследование метаболических изменений в стриатуме (полосатом теле) крыс, вызванных электрической стимуляцией среднего мозга. Для измерения концентраций глюкозы и лактата в реальном времени был использован биосенсорный метод вольтамперометрии. В ходе исследования установлено, что концентрации глюкозы и лактата в стриатуме крыс существенно изменяются в ответ на электрическую стимуляцию среднего мозга. При этом изменения концентраций глюкозы и лактата происходят с разной скоростью и динамикой. В частности, концентрация лактата быстро возрастает после начала стимуляции, в то время как концентрация глюкозы изменяется более плавно и медленно [68; 69].

Использование биосенсорного метода вольтамперометрии позволило измерять концентрации глюкозы и лактата с высокой временной и пространственной разрешающей способностью. Подобные методы измерения содержания метаболитов имеют потенциал для разработки новых диагностических и терапевтических инструментов для мониторинга метаболизма и лечения различных заболеваний.

4. Проточная цитометрия. Преимуществом этого метода является возможность измерения концентрации метаболитов в отдельных клетках, что позволяет проводить более точный анализ и получать более детальную информацию о метаболических процессах в ДК клетках. Статья, опубликованная в журнале «Communications Biology», сообщает о новом методе измерения клеточных метаболитов под названием *Met-Flow*. Была продемонстрирована способность одновременно измерять расходящиеся метаболические профили и динамическое ремоделирование в мононуклеарных клетках периферической крови человека. Результаты проведенной работы показывают, что пДК показали более высокие уровни IDH2, ATP5A, G6PD и GLUT1, отражающие повышенную способность к OXPHOS, циклу Кребса, PPP и поглощению глюкозы по сравнению с мДК. В том числе был сделан вывод о различных метаболических потребностях в разных субпопуляциях ДК после активации. Так, авторы обнаружили, что в мДК способность к переносу аргинина через метаболизм выше, чем их способность к OXPHOS и поглощению глюкозы в пДК [70].

Актуальные исследования и текущие достижения в изучении метаболизма дендритных клеток.

Изучение метаболизма ДК – актуальная область исследований, так как метаболизм является ключевым фактором, влияющим на функционирование ДК и их роль в защите организма от патологических состояний. Последние исследования в области метаболизма ДК открывают новые перспективы в понимании механизмов функционирования этих клеток и развитии новых подходов к лечению связанных с ними заболеваний [24; 71; 72]. Несколько актуальных вопросов и направлений исследований в этой области:

1. Механизмы утилизации глюкозы и метаболизма лактата ДК.

2. Исследование метаболизма аминокислот.

3. Изучение метаболических нарушений и их влияния на такие патологические состояния нервной системы, связанные с ДК, как болезнь Альцгеймера.

В работе Manoharan, et. al. исследуются влияния лактата на функцию таких иммунных клеток, как ДК и макрофаги. Авторы утверждают, что лактат может изменять метаболические пути и функции этих клеток, а также регулировать их иммунные ответы. В результате исследований авторы пришли к выводу, что лактат способен улучшать иммунные ответы ДК и макрофагов, что может быть полезно при борьбе с инфекциями и онкологическими заболеваниями. Однако при таких хронических воспалительных заболеваниях, как ревматоидный артрит, уровень лактата может быть слишком высоким, что приводит к снижению иммунной реактивности ДК и макрофагов, что может усугубить течение заболевания. В статье указывается важность изучения влияния метаболизма на функции иммунных клеток, а также на потенциальные пути регуляции иммунных ответов для улучшения здоровья человека [73].

Цель статьи Lee, et. al. состоит в исследовании роли гликолиза в активации и адгезии моноцитов в присутствии стимулятора иммунной системы, бактериального эндотоксина ЛПС. В результате экспериментов, было установлено, что активация моноцитов ЛПС приводит к усилению гликолиза, высвобождению лактата и увеличению экспрессии гликолиз-связанных генов. Блокирование гликолиза с помощью ингибиторов приводит к снижению экспрессии генов, связанных с активацией моноцитов и адгезией клеток. Таким образом, авторы делают вывод о том, что гликолиз является необходимым для активации и адгезии моноцитов, а увеличенный гликолиз является важным механизмом регуляции иммунного ответа на инфекцию. Эти результаты могут иметь значимость для разработки новых стратегий лечения инфекционных заболеваний, основанных на регуляции метаболизма иммунных клеток [74].

В работе, опубликованной в журнале «Frontiers in Immunology», сообщается об исследовании метаболических адаптаций, происходящих в различных субпопуляциях ДК в ответ на различные сигналы иммунной активации. Авторы обнаружили, что подтипы ДК претерпевают различный метаболический переход, когда они активируются различными путями иммунной активации. В частности, было обнаружено, что субпопуляция ДК, активируемая через TLR, переходит на аэробный гликолиз и метаболизм аминокислот, в то время как подтип ДК, активируемый через рецепторы NOD, использует бета-оксидацию жирных кислот и гликолиз. Эти результаты показывают, что метаболический профиль ДК может оказывать важное влияние на их способность к иммунной активации. Следовательно, в статье подчеркивается важность изучения метаболизма ДК для понимания их функции в иммунной системе, а также может иметь практическое значение для разработки новых методов лечения иммунных нарушений и опухолей [75].

В статье, опубликованной в журнале «Immunobiology», исследуется влияние окружающей среды на дифференциацию моДК и анализируется роль пероксисомных пролифератор-активированных рецепторов γ (PPAR γ) в этом процессе. В частности, авторы обнаружили, что взаимодействие моДК с определенными жирными кислотами, приводит к сдвигу в сторону дифференциации CD1a- моДК, которые характеризуются высоким уровнем продукции цитокинов и иммуногенности. Кроме того, обнаружено, что PPAR γ является ключевым регулятором этого процесса, так как его активация сокращает производство CD1a+ моДК и стимулирует дифференциацию CD1a-моДК. Эти результаты показывают, что окружающая среда может играть важную роль в регуляции дифференциации моДК, а метаболизм жирных кислот и митохондрий может быть одним из механизмов, обеспечивающих эту регуляцию [7].

Цель исследования, представленного в работе Ciaramellaa, et. al., заключалась в изучении изменений иммунной функции ДК у пациентов с болезнью Альцгеймера (БА). Для этого были использованы образцы крови 26 пациентов с БА и 22 контрольных лиц без деменции. ДК были выделены из периферической крови и проведено их стимулирование в присутствии ЛПС. Авторы обнаружили, что ДК пациентов с БА показали увеличенную продукцию простагландина E2 (PGE2) и IL-6 в ответ на стимуляцию ЛПС по сравнению с контрольными ДК. Это свидетельствует о более высоком уровне воспалительного ответа у ДК пациентов с БА. Выводы, сделанные в ходе этого исследования, указывают на возможную связь между иммунными нарушениями, метаболизмом и патологическими процессами, приводящими к развитию заболеваний, а результаты могут иметь практическое значение для разработки новых методов диагностики и лечения БА, основанных на модуляции иммунного ответа ДК [5].

Заключение

Итак, изучение метаболизма ДК и его связи с иммунологией является активной и захватывающей областью исследований. Ранее считалось, что дендриты преимущественно выполняют роль приемных структур в нейронах, но недавние открытия подтверждают их активную метаболическую активность и влияние на иммунную систему.

ДК играют ключевую роль в иммунной ответе организма, осуществляя захват и представление антигенов, активацию и регуляцию иммунных клеток и формирование иммунологической памяти. Такие метаболические особенности, как использование различных источников энергии и повышенная потребность в аминокислотах, обеспечивают эффективное функционирование дендритных клеток и поддерживают их активность в иммунологических процессах.

Будущие исследования в этой области предоставят новые возможности для расширения знаний о метаболизме ДК и его связи с различными заболеваниями. Дальнейшие открытия могут привести к разработке новых перспективных подходов в иммунотерапии, направленных на метаболические пути и процессы в ДК. Путем манипуляции метаболическими свойствами дендритных клеток можно повысить их иммуногенность, усилить активацию иммунных клеток и улучшить иммунный ответ против инфекций и опухолей, что открывает возможности для разработки инновационных стратегий лечения, которые основываются на модуляции метаболизма дендритных клеток. Эти подходы могут привести к разработке персонализированных и эффективных терапевтических решений, учитывающих метаболические особенности каждого пациента и оптимизирующих их иммунный ответ.

Библиографические ссылки / References

1. Balan S, Saxena M, Bhardwaj N. Dendritic cell subsets and locations. *International Review of Cell and Molecular Biology*. 2019;348:1–68.
2. Castell-Rodríguez A, Piñón-Zárate G, Herrera-Enríquez M, Jarquín-Yáñez K, Medina-Solares I, Castell-Rodríguez A, et al. Dendritic Cells: Location, Function, and Clinical Implications. *Biology of Myelomonocytic Cells*. 2017;21–50.
3. Brombacher EC, Patente TA, Quik M, Everts B. Characterization of Dendritic Cell Metabolism by Flow Cytometry. *Methods in molecular biology (Clifton, N. J.)*. 2023;2618:219–37.
4. Reziniciuc S, Bezavada L, Bahadoran A, Duan S, Wang R, Lopez-Ferrer D, et al. Dynamic metabolic reprogramming in dendritic cells: An early response to influenza infection that is essential for effector function. *PLoS Pathogens*. 2020;16(10):e1008957.
5. Ciaramella A, Bizzoni F, Salani F, Vanni D, Spalletta G, Sanarico N, et al. Increased pro-inflammatory response by dendritic cells from patients with Alzheimer's disease. *Journal of Alzheimer's Disease*. 2010;19(2):559–72.
6. Hernández SS, Jakobsen MR, Bak RO. Plasmacytoid Dendritic Cells as a Novel Cell-Based Cancer Immunotherapy. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(19):11397.
7. Gogolak P, Rethi B, Szatmari I, Lanyi A, Dezso B, Nagy L, et al. Differentiation of CD1a- and CD1a+ monocyte-derived dendritic cells is biased by lipid environment and PPARgamma. *Blood*. 2007;109(2):643–52.
8. Patente TA, Pinho MP, Oliveira AA, Evangelista GCM, Bergami-Santos PC, Barbutto JAM. Human Dendritic Cells: Their Heterogeneity and Clinical Application Potential in Cancer Immunotherapy. *Frontiers in Immunology*. 2019;9(3176).
9. Collin M, Bigley V. Human dendritic cell subsets: an update. *Immunology*. 2018;154(1):3–20.
10. Böttcher JP, Sousa CR. The Role of Type 1 Conventional Dendritic Cells in Cancer Immunity. *Trends Cancer*. 2018;4(11):784–92.
11. Sasaki I, Kato T, Hemmi H, Fukuda-Ohta Y, Wakaki-Nishiyama N, Yamamoto A, et al. Conventional Type 1 Dendritic Cells in Intestinal Immune Homeostasis. *Frontiers in Immunology*. 2022;13.
12. Sichert D, Lambrecht BN, Williams M, Scott CL. Development of conventional dendritic cells: from common bone marrow progenitors to multiple subsets in peripheral tissues. *Mucosal Immunology*. 2017;10(4):831–44.
13. Saito Y, Komori S, Kotani T, Murata Y, Matozaki T. The Role of Type-2 Conventional Dendritic Cells in the Regulation of Tumor Immunity. *Cancers*. 2022;14(8):1976.
14. Colonna M, Trinchieri G, Liu YJ. Plasmacytoid dendritic cells in immunity. *Nature Immunology*. 2004;5(12):1219–26.
15. Ye Y, Gaugler B, Mohty M, Malard F. Plasmacytoid dendritic cell biology and its role in immune-mediated diseases. *Clinical & Translational Immunology*. 2020;9(5):e1139.
16. Villani AC, Satija R, Reynolds G, Sarkizova S, Shekhar K, Fletcher J, et al. Single-cell RNA-seq reveals new types of human blood dendritic cells, monocytes, and progenitors. *Science*. 2017;356(6335):eaah4573.
17. Qu C, Brinck-Jensen NS, Zang M, Chen K. Monocyte-derived dendritic cells: targets as potent antigen-presenting cells for the design of vaccines against infectious diseases. *International Journal of Infectious Diseases*. 2014;19:1–5.
18. Shin KS, Jeon I, Kim BS, Kim IK, Park YJ, Koh CH, et al. Monocyte-Derived Dendritic Cells Dictate the Memory Differentiation of CD8+ T Cells During Acute Infection. *Frontiers in Immunology*. 2019;10(1887).
19. Rhodes JW, Botting RA, Bertram KM, Vine EE, Rana H, Baharlou H, et al. Human anogenital monocyte-derived dendritic cells and langerin+cDC2 are major HIV target cells. *Nature Communications*. 2021;12(1):2147.
20. Lee YS, Radford KJ. The role of dendritic cells in cancer. *International Review of Cell and Molecular Biology*. 2019;348:123–78.
21. Del Prete A, Salvi V, Soriani A, Laffranchi M, Sozio F, Bosisio D, et al. Dendritic cell subsets in cancer immunity and tumor antigen sensing. *Cellular & Molecular Immunology*. 2023;20:432–447.
22. Pelgrom LR, van der Ham AJ, Everts B. Analysis of TLR-Induced Metabolic Changes in Dendritic Cells Using the Seahorse XF(e)96 Extracellular Flux Analyzer. *Methods in molecular biology (Clifton, N. J.)*. 2016;1390:273–85.
23. Møller SH, Wang L, Ho PC. Metabolic programming in dendritic cells tailors immune responses and homeostasis. *Cellular & Molecular Immunology*. 2022;19(3):370–83.

24. Giovanelli P, Sandoval TA, Cubillos-Ruiz JR. Dendritic Cell Metabolism and Function in Tumors. *Trends in Immunology*. 2019;40(8):699–718.
25. Currivan E, Finlay D, Moreira D. Dendritic cells metabolism: a strategic path to improve antitumoral DC vaccination. *Clinical & Experimental Immunology*. 2022;208(2):193–201.
26. Cubillos-Ruiz JR, Silberman PC, Rutkowski MR, Chopra S, Perales-Puchalt A, Song M, et al. ER Stress Sensor XBP1 Controls Anti-tumor Immunity by Disrupting Dendritic Cell Homeostasis. *Cellular*. 2015;161(7):1527–38.
27. Herber DL, Cao W, Nefedova Y, Novitskiy SV, Nagaraj S, Tyurin VA, et al. Lipid accumulation and dendritic cell dysfunction in cancer. *Nature Medicine*. 2010;16(8):880–6.
28. Basit F, van Oorschot T, van Buggenum J, Derks RJE, Kostidis S, Giera M, et al. Metabolomic and lipidomic signatures associated with activation of human cDC1 (BDCA3+/CD141+) dendritic cells. *Immunology*. 2022;165(1):99–109.
29. Wculek SK, Khouili SC, Priego E, Heras-Murillo I, Sancho D. Metabolic Control of Dendritic Cell Functions: Digesting Information. *Frontiers in Immunology*. 2019;10:775.
30. Everts B, Amiel E, Huang SCC, Smith AM, Chang CH, Lam WY, et al. TLR-driven early glycolytic reprogramming via the kinases TBK1-IKK ϵ supports the anabolic demands of dendritic cell activation. *Nature Immunology*. 2014;15(4):323–32.
31. Zheng Z, Ma H, Zhang X, Tu F, Wang X, Ha T, et al. Enhanced Glycolytic Metabolism Contributes to Cardiac Dysfunction in Polymicrobial Sepsis. *The Journal of Infectious Diseases*. 2017;215(9):1396–406.
32. Song X, Si Q, Qi R, Liu W, Li M, Guo M, et al. Indoleamine 2,3-Dioxygenase 1: A Promising Therapeutic Target in Malignant Tumor. *Frontiers in Immunology*. 2021;12:800630.
33. Luby A, Alves-Guerra MC. Targeting Metabolism to Control Immune Responses in Cancer and Improve Checkpoint Blockade Immunotherapy. *Cancers*. 2021;13(23):5912.
34. Lawless SJ, Kedia-Mehta N, Walls JF, McGarrigle R, Convery O, Sinclair LV, et al. Glucose represses dendritic cell-induced T cell responses. *Nature Communications*. 2017;8(1):15620.
35. Shirai T, Nazarewicz RR, Wallis BB, Yanes RE, Watanabe R, Hilhorst M, et al. The glycolytic enzyme PKM2 bridges metabolic and inflammatory dysfunction in coronary artery disease. *Journal of Experimental Medicine*. 2016;213(3):337–54.
36. Adamik J, Munson PV, Hartmann FJ, Combes AJ, Pierre P, Krummel MF, et al. Distinct metabolic states guide maturation of inflammatory and tolerogenic dendritic cells. *Nature Communications*. 2022;13(1):5184.
37. Rothenfluh E, Schweizer A, Nagy L. Opening Wedge Osteotomy for Distal Radius Malunion: Dorsal or Palmar Approach. *Journal of Wrist Surgery*. 2013;2(1):49–54.
38. Palsson-McDermott EM, Dyck L, Zasłona Z, Menon D, McGettrick AF, Mills KHG, et al. Pyruvate Kinase M2 Is Required for the Expression of the Immune Checkpoint PD-L1 in Immune Cells and Tumors. *Frontiers in Immunology*. 2017;8:1300.
39. Arts RJW, Novakovic B, Ter Horst R, Carvalho A, Bekkering S, Lachmandas E, et al. Glutaminolysis and Fumarate Accumulation Integrate Immunometabolic and Epigenetic Programs in Trained Immunity. *Cellular Metabolism*. 2016;24(6):807–19.
40. Chen JT, Chang WC. Effects of tissue culture conditions and explant characteristics on direct somatic embryogenesis in *Oncidium 'Gower Ramsey'*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2002;69(1):41–4.
41. Zheng K, Wang C, Cheng YQ, Yue Y, Han X, Zhang Z, et al. Electron-beam-assisted superplastic shaping of nanoscale amorphous silica. *Nature Communications*. 2010;1(1):24.
42. Segura E, Touzot M, Bohineust A, Cappuccio A, Chiochia G, Hosmalin A, et al. Human Inflammatory Dendritic Cells Induce Th17 Cell Differentiation. *Immunity*. 2013;38(2):336–48.
43. Martínez-Reyes I, Chandel NS. Mitochondrial TCA cycle metabolites control physiology and disease. *Nature Communications*. 2020;11:102.
44. Kelly B, O'Neill LA. Metabolic reprogramming in macrophages and dendritic cells in innate immunity. *Cellular Research*. 2015;25(7):771–84.
45. Todisco S, Convertini P, Iacobazzi V, Infantino V. TCA Cycle Rewiring as Emerging Metabolic Signature of Hepatocellular Carcinoma. *Cancers*. 2019;12(1):68.
46. Liu S, Yang J, Wu Z. The Regulatory Role of α -Ketoglutarate Metabolism in Macrophages. *Mediators of Inflammation*. 2021;2021:5577577.
47. Choi I, Son H, Baek JH. Tricarboxylic Acid (TCA) Cycle Intermediates: Regulators of Immune Responses. *Life*. 2021;11(1):69.
48. Schönfeld P, Więckowski MR, Lebidzińska M, Wojtczak L. Mitochondrial fatty acid oxidation and oxidative stress: Lack of reverse electron transfer-associated production of reactive oxygen species. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics*. 2010;1797(6):929–38.
49. Michalek RD, Gerriets VA, Jacobs SR, Macintyre AN, MacIver NJ, Mason EF, et al. Cutting Edge: Distinct Glycolytic and Lipid Oxidative Metabolic Programs Are Essential for Effector and Regulatory CD4+ T Cell Subsets. *Journal of Immunology* (Baltimore, Md.:1950). 2011;186(6):3299–303.
50. Almeida L, Lochner M, Berod L, Sparwasser T. Metabolic pathways in T cell activation and lineage differentiation. *Seminars in Immunology*. 2016;28(5):514–24.
51. Peng X, He Y, Huang J, Tao Y, Liu S. Metabolism of Dendritic Cells in Tumor Microenvironment: For Immunotherapy. *Frontiers in Immunology*. 2021;12:613492.
52. Duraj T, Carrión-Navarro J, Seyfried TN, García-Romero N, Ayuso-Sacido A. Metabolic therapy and bioenergetic analysis: The missing piece of the puzzle. *Molecular Metabolism*. 2021;54:101389.
53. Basit F, de Vries IJM. Dendritic Cells Require PINK1-Mediated Phosphorylation of BCKDE1 α to Promote Fatty Acid Oxidation for Immune Function. *Frontiers in Immunology*. 2019;10:2386.
54. Zhang Q, Wang H, Mao C, Sun M, Dominah G, Chen L, et al. Fatty acid oxidation contributes to IL-1 β secretion in M2 macrophages and promotes macrophage-mediated tumor cell migration. *Molecular Immunology*. 2018;94:27–35.
55. Kandasamy P, Gyimesi G, Kanai Y, Hediger MA. Amino acid transporters revisited: New views in health and disease. *Trends in Biochemical Sciences*. 2018;43(10):752–89.
56. Souba WW, Pacitti AJ. How amino acids get into cells: mechanisms, models, menus, and mediators. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*. 1992;16(6):569–78.
57. Choudhuri S, Chanderbhan RF. The biology of nutrients: genetic and molecular principles. *Elsevier*. 2021;273–288.

58. Wu L, Yan Z, Jiang Y, Chen Y, Du J, Guo L, et al. Metabolic regulation of dendritic cell activation and immune function during inflammation. *Frontiers in Immunology*. 2023;14:1140749.
59. Kakazu E, Kondo Y, Kogure T, Ninomiya M, Kimura O, Ueno Y, et al. Plasma amino acids imbalance in cirrhotic patients disturbs the tricarboxylic acid cycle of dendritic cell. *Scientific Reports*. 2013;3:3459.
60. Kakazu E, Ueno Y, Kondo Y, Fukushima K, Shiina M, Inoue J, et al. Branched chain amino acids enhance the maturation and function of myeloid dendritic cells ex vivo in patients with advanced cirrhosis. *Hepatology* (Baltimore, Md.). 2009;50(6):1936–45.
61. Maschalidi S, Mehrotra P, Keçeli BN, De Cleene HKL, Lecomte K, Van der Cruyssen R, et al. Author Correction: Targeting SL-C7A11 improves efferocytosis by dendritic cells and wound healing in diabetes. *Nature*. 2022;608(7923):E29.
62. Borgne ML, Raju S, Zinselmeyer BH, Le VT, Li J, Wang Y, et al. Real-time analysis of calcium signals during the early phase of T cell activation using a genetically-encoded calcium biosensor. *Journal of Immunology* (Baltimore, Md.:1950). 2016;196(4):1471–9.
63. Chow S, Hedley D. Flow cytometric measurement of intracellular pH. *Current Protocols in Cytometry*. 2001;9(9.3).
64. Kim S, Guzman SJ, Hu H, Jonas P. Active dendrites support efficient initiation of dendritic spikes in hippocampal CA3 pyramidal neurons. *Nature Neuroscience*. 2012;15(4):600–6.
65. del Cornò M, Scazzocchio B, Masella R, Gessani S. Regulation of Dendritic Cell Function by Dietary Polyphenols. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2016;56(5):737–47.
66. Imai K, Minamiya Y, Koyota S, Ito M, Saito H, Sato Y, et al. Inhibition of dendritic cell migration by transforming growth factor- β 1 increases tumor-draining lymph node metastasis. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research*. 2012;31(1):3.
67. Fekete T, Sütö MI, Bencze D, Mázló A, Szabo A, Biro T, et al. Human Plasmacytoid and Monocyte-Derived Dendritic Cells Display Distinct Metabolic Profile Upon RIG-I Activation. *Frontiers in Immunology*. 2018;9:3070.
68. Forderhase AG, Styers HC, Lee CA, Sombers LA. Simultaneous Voltammetric Detection of Glucose and Lactate Fluctuations in Rat Striatum Evoked by Electrical Stimulation of the Midbrain. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2020;412(24):6611–24.
69. Smith SK, Lugo-Morales LZ, Tang C, Gosrani SP, Lee CA, Roberts JG, et al. Quantitative Comparison of Enzyme Immobilization Strategies for Glucose Biosensing in Real-Time Using Fast-Scan Cyclic Voltammetry Coupled with Carbon-Fiber Microelectrodes. *Chem Phys Chem*. 2018;19(10):1197–204.
70. Ahl PJ, Hopkins RA, Xiang WW, Au B, Kaliaperumal N, Fairhurst AM, et al. Met-Flow, a strategy for single-cell metabolic analysis highlights dynamic changes in immune subpopulations. *Communications Biology*. 2020;3(1):1–15.
71. Murphy TL, Murphy KM. Dendritic cells in cancer immunology. *Cellular & Molecular Immunology*. 2022;19(1):3–13.
72. He Z, Zhu X, Shi Z, Wu T, Wu L. Metabolic Regulation of Dendritic Cell Differentiation. *Frontiers in Immunology*. 2019;10:27–49.
73. Manoharan I, Prasad PD, Thangaraju M, Manicassamy S. Lactate-Dependent Regulation of Immune Responses by Dendritic Cells and Macrophages. *Frontiers in Immunology*. 2021;12:691134.
74. Lee MKS, Al-Sharea A, Shihata WA, Bertuzzo Veiga C, Cooney OD, Fleetwood AJ, et al. Glycolysis Is Required for LPS-Induced Activation and Adhesion of Human CD14+CD16- Monocytes. *Frontiers in Immunology*. 2019;10:2054.
75. Basit F, Mathan T, Sancho D, de Vries IJM. Human Dendritic Cell Subsets Undergo Distinct Metabolic Reprogramming for Immune Response. *Frontiers in Immunology*. 2018;9:2489.

Статья поступила в редколлегию 21.07.2023.
Received by editorial board 21.07.2023.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 631.459.3

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, ТИПИЗАЦИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕФЛЯЦИОННО-ОПАСНЫХ ПОЧВ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЛЯХ БЕЛАРУСИ

Н. Н. ЦЫБУЛЬКО¹⁾, В. Б. ЦЫРИБКО²⁾, Е. В. АЛЕКСЕЙЧИК¹⁾, И. И. ЖУКОВА³⁾

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

²⁾Институт почвоведения и агрохимии, Национальная академия наук Беларуси,
ул. Казинца, 90, 220107, г. Минск, Беларусь

³⁾Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка,
ул. Советская, 18, 220050, г. Минск, Беларусь

Образец цитирования:

Цыбулько НН, Цырибко ВБ, Алексейчик ЕВ, Жукова ИИ. Генетические особенности, типизация и распространение дефляционно-опасных почв на сельскохозяйственных землях Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;3:78–87.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-78-87>

For citation:

Tsybulka MM, Tsyribka VB, Alexeichik EV, Zhukova II. Genetic features, typification and deflation risk soils on agricultural lands of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;3:78–87. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-78-87>

Авторы:

Николай Николаевич Цыбулько – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; начальник научно-исследовательского центра.

Виктор Борисович Цырибко – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий лабораторией агрофизических свойств и защиты почв от эрозии.

Елена Валерьевна Алексейчик – аспирантка кафедры экологического мониторинга и менеджмента.

Инна Ивановна Жукова – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий кафедрой биологии и методики преподавания биологии.

Authors:

Mikalai M. Tsybulka, doctor of science (agriculture), full professor; head of the research center.

nik.nik1966@tut.by

Viktor B. Tsyribka, PhD (agriculture), docent; head of the laboratory of agrophysical properties and soil protection from erosion.

m029@yandex.by

Elena V. Alexeichik, postgraduate student at the department of environmental monitoring and management.

id@iseu.by

Inna I. Zhukova, PhD (agriculture), docent; head of the department of biology and methods of biology teaching.

inn0707@bspu.by

Проведена группировка почв по степени потенциальной дефляционной опасности, выполнена типизация земель в зависимости от состава почвенного покрова, соотношения его основных компонентов. Основными свойствами почв, определяющими их устойчивость к дефляции, являются гранулометрический состав и структурно-агрегатное состояние. Показано, что в супесчаных почвах в структурно-агрегатном составе доля дефляционных частиц составляет около 75 %, в песчаных почвах – 90–99 %, в торфяных почвах колеблется от 30 до 50 %, а в деградированных торфяно-минеральных, минеральных остаточно-торфяных и постторфяных – от 50 до 90 %. Высокую степень дефляционной опасности имеют песчаные почвы на мощных песках, торфяные почвы на маломощных (0,5–1 м) торфах, торфяно-глеевые, торфянисто-глеевые, торфяно-минеральные, подстилаемые песком, минеральные остаточно-торфяные и постторфяные песчаные почвы. Среди дефляционно-опасных почв минеральные легкие почвы занимают 86,7 %, торфяные и деградированные торфяные – 13,3 %. Дефляционно-опасные земли наиболее распространены на территории Белорусского Полесья. В 24 районах площади почв с высокой потенциальной дефляционной опасностью занимают в составе сельскохозяйственного землепользования более 50 %. Для комплексной оценки районов по степени дефляционной опасности территории выполнена интегральная оценка на основе показателей удельного веса в составе сельскохозяйственных земель дефляционно-опасных почв, а также почв с высокой степенью дефляционной опасности.

Ключевые слова: дефляционно опасные почвы; потенциальная дефляционная опасность; типизация земель.

GENETIC FEATURES, TYPIFICATION AND DEFLATION RISK SOILS ON AGRICULTURAL LANDS OF BELARUS

M. M. TSYBULKA^a, V. B. TSYRIBKA^b, E. V. ALEXEICHIK^a, I. I. ZHUKOVA^c

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

*^bInstitute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus
90 Kazintsa Street, Minsk 220107, Belarus*

*^cBelarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank
18 Saveckaja Street, Minsk 220050, Belarus*

Corresponding author: M. M. Tsybulka (nik.nik1966@tut.by)

The article describes and presents the groups of soils according to the degree of potential deflation risk. Particle size distribution and structural aggregate composition are the main properties of soils which determine their sustainability to deflation. The typification of lands was carried out depending on the composition of the soil cover, the ratio of its main components. It shows that in sandy loam soils in the structural and aggregate composition, the proportion of deflationary particles is about 75 %, in sandy soils – 90–99 %, in peat soils ranges from 30 to 50 %, and in degraded peat-mineral, mineral residual peat and post-peat - from 50 to 90 %. Sandy soils on heavy sands, peat soils on low-power (0.5–1 m) peat, peat-gley, peat-gley, peat-mineral, underlain by sand, mineral residual peat and post-peat sandy soils have a high degree of deflation risk. Among the deflation risk soils, mineral light soils occupy 86.7 %, peat and degraded peat soils – 13.3 %. Deflation risk lands are most common on the territory of the Belarusian Polesie. In 24 districts, soil areas with a high potential deflation risk occupy more than 50 % of agricultural land. The integral assessment was carried out based on specific gravity indicators in the composition of agricultural lands of deflation risk soils as well as high degree deflation risk soils for a comprehensive assessment of areas according to the degree of deflation risk.

Keywords: deflation risk soils; potential deflation risk; land typification.

Введение

Возникновение и интенсивность ветровой эрозии (дефляции) почв определяется рядом факторов: климатическими и геоморфологическими условиями, свойствами почвообразующих пород и почв, растительным покровом, антропогенным воздействием на почвенный покров. Дефляция почв проявляется в виде повседневной ветровой эрозии на открытых не защищенных растительностью массивах и в виде пыльных бурь. Повседневная эрозия протекает под воздействием слабых воздушных потоков – ветров скоростью < 15 м/с, пыльных бурь, возникающих при сильных ветрах, скорость которых превышает 10–15 м/с. Пыльная (песчаная) буря представляет перенос больших количеств пыли, песка, частиц сухого торфа и их смесей сильным ветром в приземном слое воздуха (на высоте > 2 м от поверхности) [1; 2].

На территории Беларуси дефляция почв чаще всего возникает весной (апрель-май) и в начале лета (первая декада июня), когда верхний слой почвы распылен механической обработкой и не защищен растительным покровом, реже – осенью. Потери почвы составляют в апреле – 30 %, в мае – 42, в июне – 24, в сентябре – 4 % от общей суммы годовых потерь [3].

Перенос частиц почвы вызывают ветры, обладающие необходимой критической скоростью, достаточной для отрыва частиц от поверхности. Для минеральных почв легкого гранулометрического состава их скорость достигает 5–6 м/с, для органогенных торфяных почв – 8–9 м/с. При критической скорости ветра в движение приходят частицы почвы диаметром от 1,0 до 0,25 мм и меньше. Агрегаты и частицы диаметром >1 мм обычно не переносятся ветром, а перекачиваются по поверхности почвы и только при штормовых ветрах могут вовлекаться в воздушный поток [4].

Противодефляционная устойчивость почв по физическому смыслу аналогична противозерозивной стойкости: она характеризует способность почвы противостоять сдувающему действию воздушного потока. Количественно она выражается величиной скорости начала массового движения частиц почвы, которая определяется размером, плотностью и сцеплением агрегатов и комков [5].

Цель исследования – на основе генетических свойств почв провести группировку их по степени потенциальной дефляционной опасности, выполнить типизацию земель в зависимости от состава почвенного покрова, соотношения его основных компонентов, проанализировать распространение почв с разной дефляционной опасностью на сельскохозяйственных землях Республики Беларусь.

Объектом исследования явились дефляционно опасные почвы пахотных и луговых земель сельскохозяйственных организаций страны. Предмет исследования – диагностические критерии (показатели) и группировка почв по степени потенциальной дефляционной опасности. Типы и подтипы почв приведены согласно Номенклатурному списку почв Республики Беларусь.

Результаты исследования и их обсуждение

Группировка почв по степени потенциальной дефляционной опасности. Основными свойствами почв, определяющими устойчивость их к дефляции, являются гранулометрический и структурно-агрегатный состав, состав поглощенных оснований, соотношение гумуса и карбонатов кальция. Они оказывают прямое и косвенное влияние на содержание дефляционно устойчивых агрегатов – частиц диаметром >1,00 мм. Уменьшение в почве содержания физической глины, ила, микроагрегатов диаметром >0,01 мм, поглощенных оснований и соотношения гумуса и карбонатов кальция приводит к увеличению содержания в ней дефляционных частиц (дефлируемой фракции) и, следовательно, к повышению дефляционной опасности почвы. Минеральные почвы относятся к дефляционно опасными (в разной степени) при содержании дефлируемой фракции в агрегатном составе более 50 %.

В результате проведенных исследований установлено, что в легких по гранулометрическому составу рыхлосупесчаных почвах в структурно-агрегатном составе доля дефляционных частиц достигает 75 %, в песчаных почвах – 90–99 %. В торфяных почвах доля дефляционных частиц колеблется от 30 до 50 %, в деградированных торфяно-минеральных, минеральных остаточно-торфяных и постторфяных почвах – от 50 до 90 %, в зависимости от степени деградации этих почв (табл. 1).

Таблица 1

Содержание (в %) в агрегатном составе основных генетических типов почв Беларуси дефляционных частиц (диаметр <1,0 мм)

Table 1

Content (%) in the aggregate composition of the main genetic soil types of Belarus of deflationary particles (diameter <1.0 mm)

Почвы	Содержание дефляционных частиц (диаметром <1,0 мм), %
Дерново-подзолистые и дерново-подзолистые заболоченные (осушенные) рыхлосупесчаные	~ 75
Дерново-подзолистые и дерново-подзолистые заболоченные (осушенные) песчаные	> 90
Торфяные мощные (мощность торфа >2 м)	~ 30
Торфяные среднемощные (мощность торфа 1–2 м)	~ 40
Торфяные маломощные (мощность торфа 0,5–1 м), торфяно-глеевые, торфянисто-глеевые	~ 50
Деградированные торфяно-минеральные	~ 50
Деградированные минеральные остаточно-торфяные супесчаные	~ 70
Деградированные постторфяные минеральные (минеральные после сработки торфа) супесчаные	~ 70
Деградированные минеральные остаточно-торфяные песчаные	~ 75
Деградированные постторфяные минеральные (минеральные после сработки торфа) песчаные	~ 90

Основные генетические типы почв Беларуси в зависимости от их гранулометрического состава, увлажнения (гидроморфизма) и подстилающей породы сгруппированы по степени потенциальной дефляционной опасности. Выделены почвы со слабой, средней и сильной степенью дефляционной опасности. Слабой потенциальной дефляционной опасностью характеризуются рыхлосупесчаные почвы разной степени гидроморфизма и осушенные торфяные мощные (>2 м) и среднемощные (1–2 м) почвы. В средней степени дефляционно опасными являются песчаные почвы, подстилаемые суглинком, торфяные маломощные (0,5–1 м), торфяно-глеевые, торфянисто-глеевые, торфяно-минеральные, подстилаемые суглинком, минеральные остаточно-торфяные и минеральные постторфяные супесчаные, торфяно-минеральные, подстилаемые песком. Высокую степень дефляционной опасности имеют песчаные почвы на мощных песках, минеральные остаточно-торфяные и минеральные постторфяные песчаные почвы (табл. 2).

Таблица 2

Группировка почв по степени дефляционной опасности

Table 2

Grouping of soils according to the degree of deflation risk

Степень потенциальной дефляционной опасности почв	Группы почв		
	минеральные легкие по гранулометрическому составу	осушенные торфяные	деградированные торфяные
Слабая	Рыхлосупесчаные, подстилаемые песком: автоморфные, слабо-глееватые (осушенные и неосушенные), глееватые (осушенные), глеевые (осушенные)	на мощных (>2 м) торфах	–
Средняя	Песчаные, подстилаемые суглинком: автоморфные, слабоглееватые (осушенные и неосушенные), глееватые (осушенные), глеевые (осушенные)	На среднемощных (1–2 м) торфах	Торфяно-минеральные, подстилаемые суглинком, минеральные остаточно-торфяные, минеральные постторфяные супесчаные
Сильная	Песчаные на мощных песках: автоморфные, слабоглееватые (осушенные и неосушенные), глееватые (осушенные), глеевые (осушенные)	На маломощных (0,5–1 м) торфах, торфяно-глеевые (0,3–0,5 м), торфянисто-глеевые (0,2–0,3 м)	Торфяно-минеральные, подстилаемые песком, минеральные остаточно-торфяные, постторфяные минеральные песчаные

Типизация дефляционно опасных земель. На территории Белорусского Полесья, как наиболее характерного региона республики в отношении проявления экстремальной ветровой эрозии (пыльных бурь), выделены 4 типа дефляционно опасных земель, которые приурочены к определенным категориям рельефа, различаются составом почвенного покрова, соотношением его основных компонентов, совокупностью свойств, составляющих его компонентов, их общим экологическим состоянием, характером сельскохозяйственного использования, величиной производительной способности почв, другими существенными характеристиками (табл. 3).

Первый тип земель представлен дерново-подзолистыми почвами (70–75 %). На пониженных элементах рельефа сконцентрированы (20–25 %) дерново-подзолистые заболоченные глееватые, глеевые почвы, и 10–15 % могут занимать дерново-подзолистые почвы. Второй тип земель включает дерново-подзолистые заболоченные осушенные (65–70 %), дерново-подзолистые (15–20 %), осушенные дерново-подзолистые заболоченные глееватые и глеевые (15–20 %) и торфяно-болотные (7–10 %) почвы. Для третьего типа земель характерно преобладание дерновых заболоченных осушенных почв (65–70 %), встречаются также дерново-подзолистые заболоченные осушенные почвы (10–15 %), торфяно-болотные (до 14 %), деградированные торфяно-минеральные и минеральные остаточно-торфяные (до 5 %) почвы. Четвертый тип земель представлен торфяно-болотными (60 %), дерновыми заболоченными осушенными (до 15 %) почвами, а также деградированными торфяно-минеральными, минеральными остаточно-торфяными и минеральными постторфяными почвами (5–10 %) (табл. 4).

Таблица 3

Типы дефляционно опасных земель

Table 3

Types of deflation risk lands

Тип земель	Наименование типов земель
I	Приподнятые плоско-волнистые на дерново-подзолистых рыхлосупесчаных и песчаных, сменяемых ближе 1 м песками или подстилаемых глубже 1 м мореной, почвах с участием дефлированных и дефляционно опасных почв
II	Пониженные равнинные на дерново-подзолистых заболоченных супесчаных и песчаных преимущественно осушенных дефляционно опасных почвах
III	Низкие плоские на дерновых заболоченных супесчаных и песчаных, преимущественно осушенных дефляционно опасных почвах с участием торфяно-болотных почв
IV	Ложбинно-котловинные на торфяно-болотных осушенных дефляционно опасных почвах с участием деградированных торфяных почв

Таблица 4

Структура почвенного покрова разных типов дефляционно опасных земель

Table 4

The structure of the soil cover of different types of deflation risk lands

Почвы	Компонентный состав почв по типам земель, %			
	I	II	III	IV
Дерново-подзолистые	70–75	15–20	–	–
Дерново-подзолистые дефлированные	1–5	–	–	–
Дерново-подзолистые заболоченные глееватые и глеевые	20–25	15–20	–	–
Дерново-подзолистые заболоченные осушенные	–	65–70	10–15	–
Дерновые заболоченные осушенные	–	–	65–70	15
Торфяно-болотные осушенные	5–10	7–10	14	40
Торфяно-минеральные	–	–	5	30
Минеральные остаточные торфяные	–	–	5	10
Минеральные постторфяные	–	–	–	5

Выделенные типы земель различаются по свойствам и степени дефлируемости почв. *Первый тип земель* представлен преимущественно легкими по гранулометрическому составу песчаными (48 %) и рыхлосупесчаными (43 %) почвами. Около 6 % занимают торфяно-болотные почвы. Дефлированность почв этого типа земель в среднем 3,4 %, до 70 % почв являются дефляционно опасными. *Во втором типе земель* основной удельный вес приходится на песчаные (58 %) и супесчаные (34 %) почвы. Подвержено дефляции почв – 3 %, дефляционно опасными являются – 85 %. *Для третьего типа земель* характерно наличие почв разного гранулометрического состава – 48 % супесчаных, 31 – песчаных и 7 % – суглинистых почв. До 14 % занимают торфяно-болотные почвы. Дефлированность этого типа земель составляет 1,5 %, дефляционно опасных почв – 85 %. *Четвертый тип земель* представлен в основном (75 %) торфяно-болотными и деградированными торфяно-минеральными, минеральными остаточными-торфяными и минеральными постторфяными почвами (табл. 5).

Таблица 5

Агроэкологическое состояние типов земель

Table 5

Agroecological state of land types

Тип земель	Доля почв по гранулометрическому составу, в %				Дефлированность почв, %	Дефляционная опасность земель, %
	суглинистые	супесчаные	песчаные	торфяные		
I	3	43	48	6	3,4	70,0
II	–	34	58	8	3,0	85,0
III	7	31	48	14	1,4	85,0
IV	–	5	20	75	–	75,0

Распространение дефляционно-опасных почв на сельскохозяйственных землях. По данным почвенного обследования, в Беларуси 2108,2 тыс. га почв сельскохозяйственных земель (41,2%), относятся к дефляционно-опасным, а подвержено дефляции 82,7 тыс. га земель [6]. Среди дефляционно опасных почв минеральные легкие почвы занимают 86,7%, торфяные и деградированные торфяные почвы – 13,3%. Дефляционно-опасные почвы наиболее распространены на территории Белорусского Полесья – в Брестской, Гомельской и южной части Минской обл. (рис. 1).

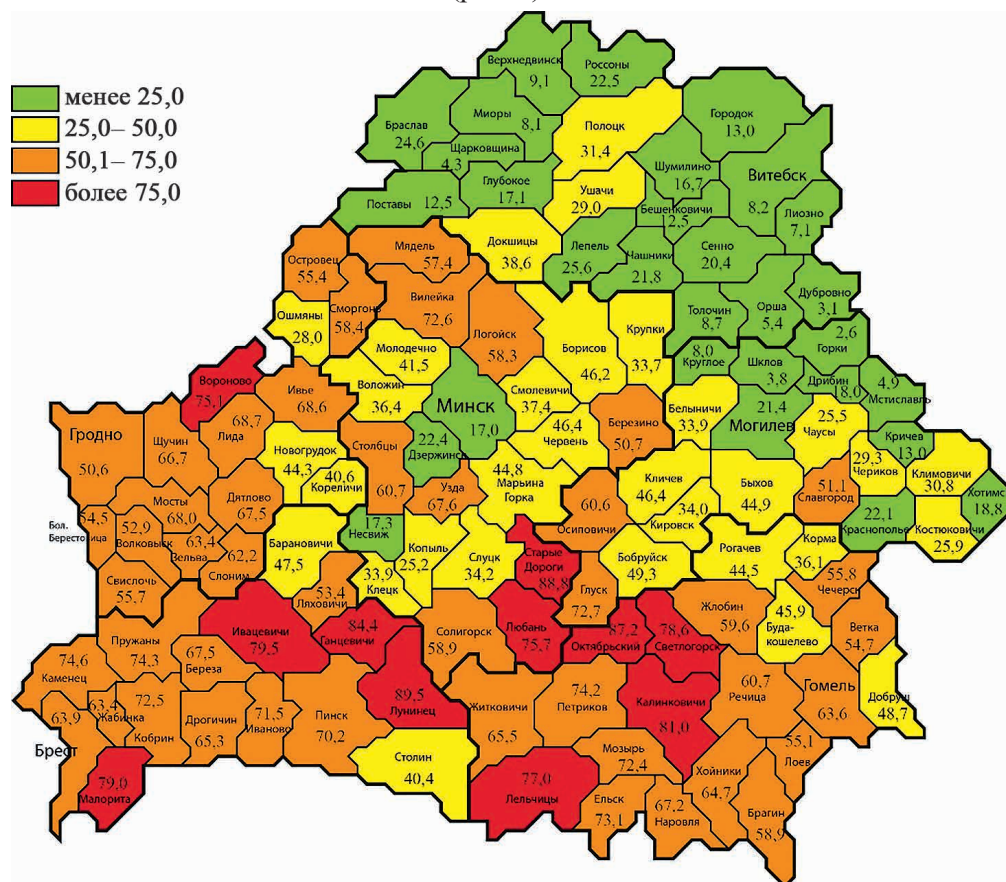


Рис. 1. Группировка районов по удельному весу дефляционно опасных почв в составе сельскохозяйственных земель, %

Fig. 1. Grouping of regions according to the proportion of deflation kshyl soils as part of agricultural lands, %

Высокий удельный вес (70% и выше) дефляционно-опасных почв в составе сельскохозяйственных земель в Лунинском (89,5%), Стародорожском (88,8%), Октябрьском (87,2%), Ганцевичском (84,4%), Калинковичском (81,0%), Ивацевичском (79,5%), Малоритском (79%), Светлогорском (78,6%), Лельчицком (77,0%), Любанском (75,7%), Вороновском (75,1%), Каменецком (74,6%), Пружанском (74,3%), Петриковском (74,2%), Ельском (73,1%), Глусском (72,7%), Вилейском (72,6%), Кобринском (72,5%), Мозырском (72,4%), Ивановском (71,5%), Пинском (70,2%) районах.

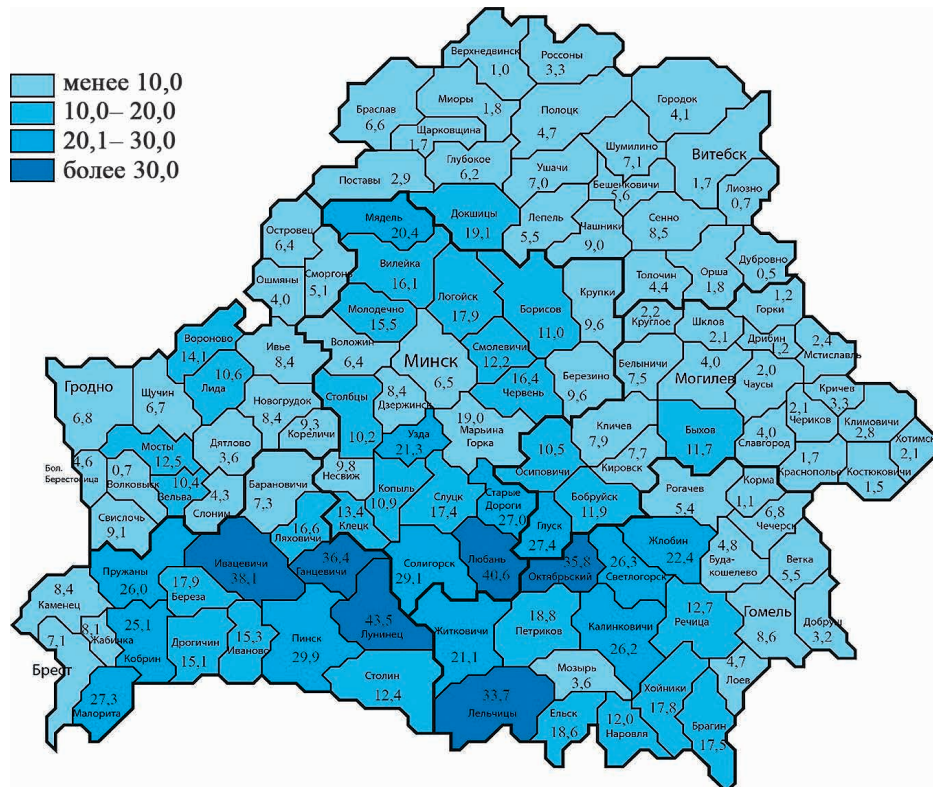


Рис. 3. Группировка районов по удельному весу дефляционно-опасных торфяных и деградированных торфяных почв в составе сельскохозяйственных земель, %

Fig. 3. Grouping of districts according to the share of deflation risk peat and degraded peat soils in the composition of agricultural land, %

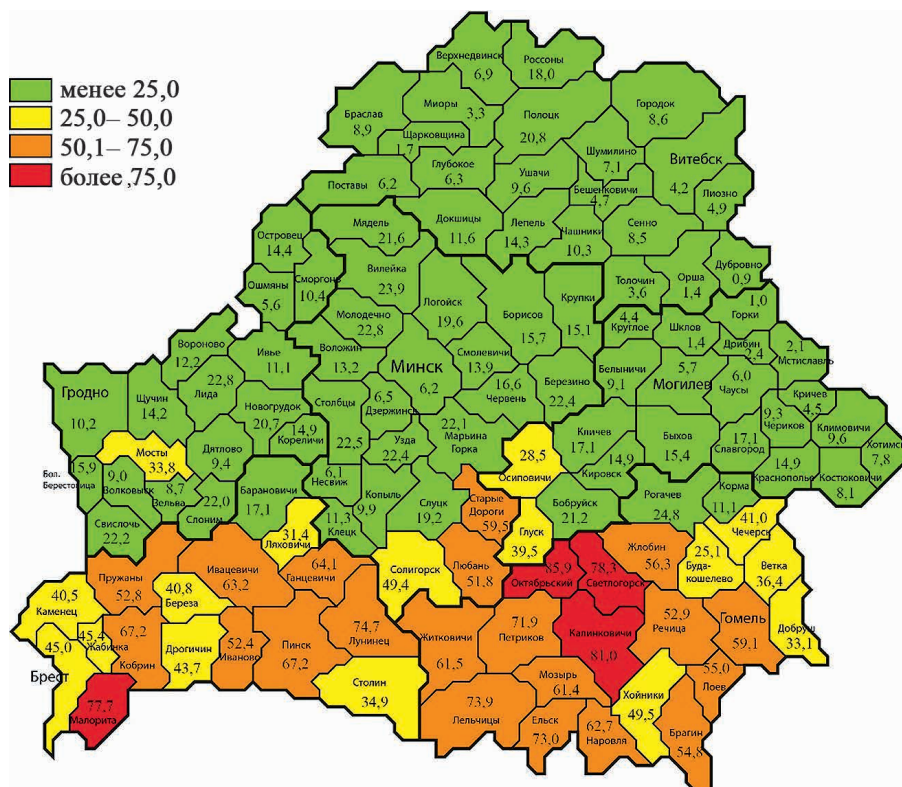


Рис. 4. Группировка районов по удельному весу почв с высокой потенциальной дефляционной опасностью в составе сельскохозяйственных земель, %

Fig. 4. Grouping of areas according to the share of soils with a high potential deflation risk in the composition of agricultural land, %

Для комплексного определения районов по степени дефляционной опасности территории выполнена интегральная оценка на основе показателей удельного веса в составе сельскохозяйственных земель дефляционно-опасных почв, а также почв с высокой степенью дефляционной опасности. Каждый диапазон значений анализируемых показателей выражался в баллах. Балльная шкала изменялась от 1 до 4. Низшему баллу (1) соответствует наименьший диапазон изменения показателя, высшему баллу (4) – максимальный диапазон. В результате интегральной оценки показателей получена итоговая сумма баллов по каждому району, которая характеризует степень дефляционной опасности территории. Суммарный балл по району колеблется от 2 до 8 (табл. 6).

Минимальным баллом (2) характеризуются районы, в которых удельный вес дефляционно-опасных почв и почв с высокой потенциальной дефляционной опасностью не превышает 15 %. Из 118 районов минимальный балл отмечается в 29 районах. Максимальный балл (8) имеют районы, в которых доля дефляционно-опасных почв и почв с высокой потенциальной дефляционной опасностью составляет более 75 %. Максимальный балл имеют 4 района – Малоритский, Калинковичский, Октябрьский, Светлогорский.

Таблица 6

Оценка районов по степени потенциальной дефляционной опасности территорий сельскохозяйственного землепользования

Table 6

Assessment of areas according to the degree of potential deflation risk of agricultural land use areas

Балл	Количество районов	Характеристика земель	Районы
2	29	Дефляционно-опасные почвы и почвы с высокой дефляционной опасностью до 15 %	Дубровенский, Шарковщинский, Оршанский, Лиозненский, Миорский, Витебский, Толочинский, Верхнедвинский, Бешенковичский, Поставский, Городокский, Шумилинский, Глубокский, Сенненский, Чашницкий, Россонский, Браславский, Дзержинский, Минский, Несвижский, Горецкий, Дрибинский, Кричевский, Круглянский, Могилевский, Мстиславский, Хотимский, Шкловский, Краснопольский
3	29	Дефляционно-опасные почвы 25–50, почвы с высокой дефляционной опасностью – 5–25 %	Барановичский, Лепельский, Ушачский, Полоцкий, Докшицкий, Кормянский, Новогрудский, Копыльский, Слуцкий, Борисовский, Клецкий, Пуховичский, Смолевичский, Червенский, Бельничский, Климовичский, Кличевский, Костюковичский, Чаусский, Чериковский, Бобруйский, Быховский, Кореличский, Ошмянский, Воложинский, Кировский, Рогачевский, Молодечненский, Крупский
4	22	Дефляционно-опасные почвы 40–75, почвы с высокой дефляционной опасностью – 5–35 %.	Столинский, Буда-Кошелевский, Добрушский, Ивьевский, Сморгонский, Мядельский, Столбцовский, Волковысский, Островецкий, Свислочский, Щучинский, Зельвенский, Лидский, Березинский, Вилейский, Славгородский, Берестовицкий, Слонимский, Дятловский, Узденский, Гродненский, Логойский
5	14	Дефляционно-опасные почвы 50–75, почвы с высокой дефляционной опасностью – 10–50 %	Жабинковский, Дрогичинский, Березовский, Ветковский, Хойницкий, Солигорский, Осиповичский, Глусский, Ляховичский, Брестский, Каменецкий, Чечерский, Вороновский, Мостовский
6	14	Дефляционно-опасные почвы 55–75, почвы с высокой дефляционной опасностью – 50–75 %.	Ивановский, Пинский, Лоевский, Ельский, Наровлянский, Кобринский, Брагинский, Жлобинский, Мозырский, Пружанский, Гомельский, Речицкий, Житковичский, Петриковский
7	6	Дефляционно-опасные почвы > 75, почвы с высокой дефляционной опасностью – 50–75 %	Ганцевичский, Лельчицкий, Лунинецкий, Любанский, Ивацевичский, Стародорожский
8	4	Дефляционно-опасные почвы и почвы с высокой дефляционной опасностью > 75 %	Малоритский, Калинковичский, Октябрьский, Светлогорский

Заключение

Основными свойствами почв, определяющими их устойчивость к дефляции, являются гранулометрический состав и структурно-агрегатное состояние. В легких рыхлосупесчаных почвах в структурно-агрегатном составе доля дефляционных частиц составляет около 75 %, в песчаных почвах – 90–99 %. В торфяных почвах доля дефляционных частиц колеблется от 30 до 50 %, в деградированных торфяно-минеральных, минеральных остаточно-торфяных и постторфяных – от 50 до 90 %. Слабой потенциальной дефляционной опасностью характеризуются рыхлосупесчаные почвы разной степени гидроморфизма и осушенные торфяные почвы на мощных (>2 м) торфах. В средней степени дефляционно опасными являются песчаные почвы, подстилаемые суглинком, осушенные торфяные почвы на среднемощных (1–2 м) торфах, торфяно-минеральные, подстилаемые суглинком, минеральные остаточно-торфяные и постторфяные супесчаные почвы. Высокую степень дефляционной опасности имеют песчаные почвы на мощных песках, торфяные почвы на маломощных (0,5–1 м) торфах, торфяно-глеевые, торфянисто-глеевые, торфяно-минеральные, подстилаемые песком, минеральные остаточно-торфяные и постторфяные песчаные почвы.

Выделены 4 типа дефляционно опасных земель, которые приурочены к определенным категориям рельефа, различаются составом почвенного покрова, соотношением его основных компонентов, совокупностью свойств, составляющих его компонентов, их общим экологическим состоянием. Среди дефляционно опасных почв минеральные легкие почвы занимают 86,7 %, торфяные и деградированные торфяные почвы – 13,3 %.

Дефляционно-опасные земли наиболее распространены на территории Белорусского Полесья. В 24 районах Полесья площади почв с высокой потенциальной дефляционной опасностью занимают в составе сельскохозяйственного землепользования более 50 %.

Для комплексной характеристики районов по степени дефляционной опасности территории выполнена интегральная оценка на основе показателей удельного веса в составе сельскохозяйственных земель дефляционно-опасных почв, а также почв с высокой степенью дефляционной опасности. Минимальным баллом характеризуются районы, в которых доля дефляционно-опасных почв, почв с высокой потенциальной дефляционной опасностью не превышает 15 %. Из 118 районов минимальный балл отмечается в 29 районах. Максимальный балл имеют районы, в которых доля дефляционно-опасных почв и почв с высокой потенциальной дефляционной опасностью более 75 %. Максимальный балл имеют 4 района – Малоритский, Калинковичский, Октябрьский и Светлогорский.

Библиографические ссылки

1. Ларионов ГА. *Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки*. Москва: Издательство МГУ; 1993. 200 с.
2. Черныш АФ, Чижиков ЮА. Дефляция почв в Беларуси. *Природные ресурсы*. 2005;3:38–50.
3. Цыбулько НН, Устинова АМ, Червань АН, Касьяненко ИИ, Романенко СС, Цырибко ВБ. Эрозионная деградация почв Беларуси. *Земледелие и защита растений*. 2018;2(117):19–26.
4. Лапа ВВ, редактор. *Почвы Республики Беларусь*. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. 632 с.
5. Черныш АФ, Устинова АМ, Цырибко ВБ, Червань АН, Касьяненко ИИ. Деградация почв сельскохозяйственных земель Беларуси: виды и количественная оценка. *Почвоведение и агрохимия*. 2016;(2):7–18.
6. *Почвы сельскохозяйственных земель Республики Беларусь*. Минск: [б. и.]; 2001. 432 с.

References

1. Larionov GA. *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennyye otsenki* [Erosion and deflation of soils: basic regularities and quantitative estimates]. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1993. 200 p. Russian.
2. Chernysh AF, Chizhikov YuA. *Deflyatsiya pochv v Belarusi* [Soil deflation in Belarus]. *Natural resources*. 2005;3:38–50. Russian.
3. Tsybulka NN, Ustinova AM, Chervan AN, Kasyanenko II, Romanenko SS, Tsyribko VB. *Eroziionnaya degradatsiya pochv Belarusi* [Erosive degradation of soils in Belarus]. *Agriculture and Plant Protection*. 2018;2(117):19–26. Russian.
4. Lapa VV, editor. *Pochvy Respubliki Belarus* [Soils of the Republic of Belarus]. Minsk: Information Center of the Ministry of Finance; 2019. 632 p. Russian.
5. Chernysh AF, Ustinova AM, Tsyrybko VB, Chervan AN, Kas'yanenko II. *Degradatsiya pochv sel'skokhozyaistvennykh zemel' Belarusi: vidy i kolichestvennaya otsenka* [Soil degradation of agricultural lands in Belarus: the types and quantitative assessment]. *Soil Science and Agrochemistry*. 2016;(2):7–18. Russian.
6. *Pochvy selskokhozyaistvennykh zemel Respubliki Belarus* [Soils of agricultural lands of the Republic of Belarus]. Minsk: [publisher unknown]; 2001. 432 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 07.08.2023.
Received by editorial board 07.08.2023.

УДК 504.06.620.95

РАЗРАБОТКА И АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ ТЕРРИТОРИЙ АДМИНИСТРАТИВНЫХ РАЙОНОВ

О. И. РОДЬКИН¹⁾, М. А. ЕРЕСЬКО²⁾

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

²⁾Белорусский научно-исследовательский центр «Экология»,
ул. Г. Якубова, 76, 220095, г. Минск, Беларусь

Оценка состояния окружающей среды территорий регионов проводится при проектировании крупных объектов строительства, определении уровня экологического потенциала территорий и их устойчивости к внешнему воздействию. В зарубежных странах для комплексной оценки экологического воздействия используются индикаторы на основе компонентов ландшафта, но без учета административной возможности управления. Целью наших исследований была разработка оригинальной методики для комплексной оценки территорий, где в качестве оптимальной территориальной единицы предложен административный район, имеющий единую структуру управления и базы данных статистической отчетности. Для оценки состояния административных районов предложено 10 индикаторов, характеризующих как негативное, так и положительное воздействие на окружающую среду. Для адаптации методики проведения комплексной оценки территории были выбраны три административных района Минской обл. Республики Беларусь (Борисовский, Дзержинский и Мядельский), которые характеризуются сходными климатическими условиями, но имеют серьезные отличия по размерам, населению, специализации и направлениям хозяйственной деятельности. Результаты анализа свидетельствуют, что значительный вклад в итоговую оценку вносит специализация района. Следовательно, если район, развивающий природоохранную, рекреационную и туристическую деятельность (Мядельский), предсказуемо имеет более высокую итоговую оценку, то более значительное суммарное воздействие на окружающую среду и, соответственно, низкая итоговая оценка характерна для района с развитой сельскохозяйственной деятельностью.

Ключевые слова: территория; комплексная оценка; окружающая среда; экологический потенциал; воздействие на окружающую среду.

Образец цитирования:

Родькин ОИ, Ересько МА. Разработка и адаптация методики комплексной оценки состояния окружающей среды для территорий административных районов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;3:88–96. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-88-96>

For citation:

Rodzkin OI, Eresko MA. Development and adaptation of the methodology for comprehensive assessment of the state of the environment for the territories of administrative regions. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;3:88–96. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-88-96>

Авторы:

Олег Иванович Родькин – доктор биологических наук, доцент; директор.

Марина Анатольевна Ересько – кандидат географических наук, доцент; заведующий отделом мониторинга окружающей среды.

Authors:

Aleh I. Rodzkin, doctor of science (biology), docent; director. aleh.rodzkin@rambler.ru

Marina A. Eresko, PhD (geography), docent; head of the department of environmental monitoring. kisa_marina@mail.ru

DEVELOPMENT AND ADAPTATION OF THE METHODOLOGY FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE STATE OF THE ENVIRONMENT FOR THE TERRITORIES OF ADMINISTRATIVE REGIONS

O. I. RODZKIN^a, M. A. ERESKO^b

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

^bBelarussian Research Center «Ecology»,
76 G. Yakubova Street, Minsk 220095, Belarus

Corresponding author: O. I. Rodzkin (aleh.rodzkin@rambler.ru)

Assessment of the state of the environment of certain territories fulfilled for designing large construction projects, assessing the ecological potential of territories and their resistance to external influences, and in other cases. In foreign countries, for a comprehensive assessment of environmental impact, a diverse range of indicators is used, which, as a rule, is linked to specific components that make up the landscape but without the administrative component. The goal of our research was to develop an original methodology for a comprehensive assessment of territories, where an administrative district with a unified management structure and statistical reporting database was proposed as the optimal territorial unit. A total of 10 indicators have been proposed to assess both negative and positive impacts. To adapt the methodology for conducting a comprehensive assessment of the territory, three districts of the Minsk region of Republic of Belarus (Borisovsky, Dzerzhinsky and Myadelsky) were selected, which are characterized by similar climatic conditions, but have serious differences in size, population, specialization and areas of economic activity. The results of the analysis show that the specialization of the district makes a significant contribution to the final assessment. Thus, if the area that develops environmental, recreational and tourist activities (Myadelsky) predictably has a higher final score, but more significant total impact on the environment and, accordingly, a low final assessment is typical for an area with developed agricultural activities.

Keywords: territory; comprehensive assessment; environment; ecological potential; environmental impact.

Введение

Оценка состояния окружающей среды определенных территорий является одной из важнейших экологических задач. Она необходима при разработке стратегической сравнительной оценки территорий при проектировании крупных объектов строительства; обосновании защиты особо охраняемых территорий; разработке мероприятий, направленных на сохранение биоразнообразия; при сравнительной оценке экологического потенциала территорий и их устойчивости к внешнему воздействию.

Оценка состояния окружающей среды, используемая в зарубежных методиках, реализуется на уровне ландшафта. На Парижской международной конференции (Ландшафты, Европа 2001) было разработано и предложено к использованию следующее определение: *ландшафты* – это пространственно определенные единицы, характер и функции которых определяются сложным и региональным взаимодействием природных процессов с человеческой деятельностью, движимые экономическими, социальными и экологическими факторами и ценностями [1].

Как и многие другие определения ландшафта, разработанные за последние годы, вышеупомянутый подход предназначен для достижения конкретной цели – в данном случае для оценки ландшафта на региональном уровне [2].

Концептуально основанные на исследованиях экосистем эти компоненты предполагают, что экологические и социально-экономические проблемы вовлечены в причину взаимосвязи эффектов и сопоставимы с экосистемными процессами, например, между типами почв¹, водными ресурсами, биологической составляющей [3]. Ландшафт является управляемой системой, и для него всегда характерно наличие двух составляющих: территории (то есть географическая область, размеры которой могут варьировать) и системы управления (существующие формальные или неформальные институты, которые могут влиять на выбор путей развития и осуществлять реальное управление ландшафтами) [4].

Для оценки устойчивости в зарубежной литературе используется ряд методов и инструментов.

Метод, основанный на разработке и оценке критериев и индикаторов устойчивости. Метод используется при разработке экологической политики и системы управления территориями [5]. Основан на мониторинге и оценке прогресса в сочетании с целями устойчивого управления в данной области (критерии

¹Кадастр земельных ресурсов [Электронный ресурс]. URL: https://www.gki.gov.by/ru/activity_branches-land-reestr/ (дата обращения: 15.07.2023).

и индикаторы, связанные с устойчивым управлением). Широко используется из-за простоты, гибкости и прозрачности [6].

Оценка жизненного цикла (ОЖЦ) – это практический инструмент для систематической оценки экологических проблем и воздействия производственных систем – от приобретения сырья до окончательной утилизации, в соответствии с заявленными целями и объемом. ОЖЦ можно определить как инвентаризацию, сбор и классификацию процедур для выявления уровня воздействия продукции на окружающую среду на всех этапах ее жизненного цикла².

Анализ затрат и выгод – это метод оценки общего воздействия проекта на общество путем расчета социальных затрат и выгод. Воздействие на окружающую среду оценивается и переводится в денежное выражение. Хорошо зарекомендовал себя и используется в экономических решениях. Основан на сопоставлении затрат на проведение и результаты мероприятий [6].

По итогам исследований, выполненных на этапе анализа методов и используемых для комплексной оценки территорий в разных странах, можно сделать вывод: для Республики Беларусь наиболее приемлемым является метод индикаторов. В зарубежных странах для комплексной оценки экологического воздействия используется разнообразный ассортимент индикаторов, который увязывается, как правило, с конкретными компонентами, составляющими ландшафт (территорию), а также с национальными целями устойчивого развития.

Зарубежные методики для комплексной оценки состояния окружающей среды ориентированы на концепцию «устойчивое развитие». В ее рамках разработаны соответствующие индикаторы [7], ассортимент которых увязывается с конкретными компонентами экологических систем, расположенных на территории региона [8; 9]. Такой подход предусматривает учет ряда индикаторов, характеризующих концепцию «устойчивое развитие», то есть экологическую, экономическую и социальную компоненты. Нами представлены примеры индикаторов по блокам.

Экологический блок включает коэффициент конверсии естественной экосистемы (га/год) с разбивкой по типам покрытия; общую площадь естественной преобразованной экосистемы (га) с разбивкой по типам земного покрова; деградацию естественной экосистемы норма (га/год) с разбивкой по типам растительного покрытия территории.

Экономический блок состоит из средней урожайности сельскохозяйственных культур; затрат на экологическую деятельность в регионе и др.

Социальный блок определяет долю сельского населения, живущего ниже национальной черты бедности и др.

При этом каждый индикатор увязывается с глобальными и национальными целями устойчивого развития, а потенциал территории (ландшафта) определяется согласно средневзвешенной интегральной оценке всех используемых индикаторов.

Недостатки такого подхода для комплексной оценки биосферного состояния территории: наличие социальной компоненты, не оказывающей прямого воздействия на состояние и характеристику окружающей среды; сбор необходимой информации для расчета индикаторов требует значительного специфического объема данных, в том числе для проведения экологических специальных полевых исследований. Эти недостатки были учтены в наших исследованиях при разработке и обосновании методики и индикаторов для комплексной оценки состояния территорий. Цель наших исследований – разработка оригинальной методики для комплексной оценки территорий, где в качестве оптимальной территориальной единицы предложен административный район, имеющий единую структуру управления и базы данных статистической отчетности.

Материалы и методы исследования

Для проведения наших исследований была разработана оригинальная методика комплексной оценки территорий на основе зарубежного опыта, но с учетом национальной специфики Республики Беларусь. На первом этапе была выбрана и обоснована территориальная единица, имеющая единую структуру управления и базы данных статистической отчетности³. Для структуры управления окружающей средой в Республике Беларусь такой единицей является административный район. Для характеристики и оценки

²СТБ ISO 14040-2010. Государственный стандарт Республики Беларусь [Электронный ресурс]. Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Принципы и структурная схема. URL: <https://tnpa.by/#!/DocumentCard/175153/214398> (дата обращения: 15.07.2023).

³Экотраты [Электронный ресурс]. URL: <https://neg.by/novosti/otkrytj/na-prirodoohrannye-meropriyatiya-v-2019-g-belarus-potrati-la-712-mln-rub> (дата обращения: 15.07.2023).

окружающей среды⁴ административного района были предложены индикаторы, которые могут быть рассчитаны исходя из доступных постоянно обновляемых баз статистической информации.

При выборе индикаторов учитывалось, что согласно классическому определению, биосфера – это оболочка земли, заселенная живыми организмами, которая включает три основных компонента: атмосферу, гидросферу и литосферу [10]. Соответственно, индикаторы для комплексной оценки должны быть представлены для каждого из этих компонентов.

Индикаторы, оказывающие позитивное воздействие:

Лесной фонд или лесистость территории. Лес – это естественная экосистема, которая является средой обитания для большинства видов растений и животных, обеспечивая поддержку их разнообразия.

Водные объекты, водоемы и водотоки – среда обитания для рыб, земноводных, водоплавающих птиц и млекопитающих, насекомых, а также для ряда видов растений.

Сельскохозяйственные угодья, естественные луга и пастбища – это частично преобразованные в результате антропогенного воздействия экологические системы, которые также являются естественной средой обитания для птиц, мелких млекопитающих и других животных. Естественные сельскохозяйственные угодья характеризуются значительным разнообразием видов растений.

Болота и водно-болотные территории – естественная среда обитания для ряда редких видов растений и животных, включенных в Красную книгу Республики Беларусь. На белорусских болотах, в частности, обитает самая крупная в мире популяция уникального вида птиц – вертячая камышевка.

Важнейший индикатор, характеризующий природный потенциал территории, – это наличие *особо охраняемых природных территорий* (ООПТ): национальных парков, заповедников, заказников.

Одним из индикаторов, позволяющим оценить перспективу сохранения экосистем, является финансирование или *затраты на природоохранные мероприятия*. Этот индикатор характеризует потенциальные возможности района для инвестирования в охрану окружающей среды⁵. Инвестиции могут иметь различные источники и интерес для инвесторов, в том числе связанные с природным потенциалом административного района, так как возможность его развития может быть целесообразной не только с экологической, но и экономической точки зрения.

К индикаторам, обуславливающим *негативное воздействие* на состояние природных экосистем, следует отнести плотность населения, площадь пахотных земель, осушительные мелиорации, выбросы в атмосферный воздух⁶. Пахотные земли, в отличие от естественных сенокосов и пастбищ, – это полностью преобразованные экологические системы. Они не только не являются средой обитания для растений и животных, но оказывают значительное негативное воздействие на биоразнообразие вследствие использования синтетических минеральных удобрений, химических средств защиты растений, средств механизации.

Нами предложено *10 индикаторов* для оценки как негативного, так и положительного воздействия:

- Выбросы от стационарных источников, кг/га.
- Плотность населения на территории оценки, ч/км².
- Площадь пашни (в %) к территории.
- Площадь осушенных земель (в %) ко всей территории.
- Площадь сельскохозяйственных угодий (в %) ко всей территории.
- Площадь водных ресурсов (в %) ко всей территории.
- Площадь болот (в %) ко всей территории.
- Площадь лесов (в %) ко всей территории.
- Площадь особо охраняемых природных территорий (в %) ко всей территории.
- Расходы на охрану окружающей среды в тыс. руб. на человека.

Показатели для расчета таких индикаторов могут быть получены в официальной статистической отчетности. Как показывает зарубежный опыт, в качестве индикаторов оценки территорий наиболее целесообразно использовать не абсолютные, а относительные показатели воздействия на единицу площади или численность населения. Для большинства индикаторов следует проводить расчет на единицу площади территории, так как он более точно характеризует воздействие именно на экосистемы как естественную среду обитания растений и животных.

Следует отметить, что обязательным элементом является выбор единицы (эталона) для сравнения. В качестве такового в зарубежной практике используется или соответствие показателям устойчивого развития, или средневзвешенным показателям территории (региона). Для сравнительной оценки административных районов Республики Беларусь целесообразно проводить сравнение со средней величиной определенного

⁴Охрана окружающей среды в Республике Беларусь, 2020. Белстат [Электронный ресурс]. URL: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/ffe/ffe0756ee18e391021d253aa54b56e0d.pdf> (дата обращения: 15.07.2023).

⁵Там же.

⁶Там же.

показателя для всей территории страны. Для количественной (балльной) оценки предложена шкала, единицей размерности которой будет 10 % – отклонение от средних показателей.

При разработке шкалы оценок учитывались только те индикаторы, показатели которых можно свободно найти в доступной официальной статистике⁷. Таким образом, не все потенциальные факторы воздействия были учтены при разработке и использовании предложенного метода комплексной оценки, что связано с отсутствием ряда информации в официальных базах данных. В частности, для комплексной оценки состояния биосферы территории целесообразно оценивать данные по количеству видов краснокнижных животных и растений, находящихся на территории района, а также индикаторы биоиндикации. Вопросом остается наличие таких данных. Они могут быть получены при проведении дополнительных исследований (табл. 1). Например, выделение и оценка эталонных участков одинаковых экологических систем на территории районов.

Таблица 1

Шкала для оценки комплексного воздействия на территорию

Table 1

Scale for assessing the complex impact on the area

Показатель	% отклонения от среднего показателя и балл*										
	Сред	+10	+20	+30	+40	+50	-10	-20	-30	-40	-50
Выбросы ст., кг/га	20,5	22,8 -1	25,6 -2	29,3 -3	34,2 -4	41,0 -5	18,4 +1	16,4 +2	14,3 +3	12,3 +4	10,2 +5
Плотность населения, ч/км ²	45,5	50,5 -1	56,9 -2	65,0 -3	75,8 -4	91,0 -5	40,9 +1	36,4 +2	31,8 +3	27,4 +4	22,7 +5
Выбросы, кг/га	20,52	22,8 -1	25,6 -2	29,3 -3	34,2 -4	41,0 -5	18,4 +1	16,4 +2	14,4 +3	12,3 +4	10,3 +5
Пашня, % к территории	27,3	30,2 -1	34,1 -2	38,9 -3	45,4 -4	54,2 -5	24,5 +1	21,8 +2	19,0 +3	16,3 +4	13,6 +5
Осушенные земли, % к территории	16,5	18,3 -1	20,6 -2	23,5 -3	27,4 -4	32,9 -5	14,8 +1	13,1 +2	11,5 +3	9,8 +4	8,2 +5
Сельскохозяйственные угодья, % к территории	12,6	14,0 +1	15,7 +2	18,0 +3	21,0 +4	25,2 +5	11,3 -1	10,1 -2	8,8 -3	7,5 -4	6,3 -5
Водные ресурсы, % к территории	2,2	2,4 +1	2,7 +2	3,1 +3	3,7 +4	4,4 +5	2,0 -1	1,7 -2	1,5 -3	1,3 -4	1,1 -5
Болога, % к территории	3,7	4,1 +1	4,7 +2	5,3 +3	6,2 +4	7,5 +5	3,3 -1	3,0 -2	2,6 -3	2,2 -4	1,8 -5
Лес, % к территории	42,7	47,4 +1	53,3 +2	61,0 +3	71,1 +4	85,4 +5	38,4 -1	34,1 -2	29,8 -3	25,6 -4	21,3 -5
ООПТ, % к территории	8,9	9,9 +1	11,2 +2	12,8 +3	14,9 +4	17,9 +5	8,0 -1	7,1 -2	6,2 -3	5,3 -4	4,4 -5
Расходы, тыс.р/чел	0,075	0,08 +1	0,09 +2	0,10 +3	0,12 +4	0,15 +5	0,07 -1	0,06 -2	0,05 -3	0,04 -4	0,03 -5

*При росте негативного воздействия баллы снижаются, при росте положительного воздействия возрастают.

⁷Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды. 2021 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nsmos.by/content/805.html> (дата обращения: 15.07.2023).

Результаты исследования и их обсуждение

Для проведения комплексной оценки территории были выбраны три административных района Минской обл. Республики Беларусь.

Дзержинский р-н является типичным аграрным районом, численность населения которого составляет 69,8 тыс. чел. (городское – 46,5 тыс. чел., из них в г. Дзержинске – 29,0 тыс. чел.). Более 40 % территории района занимают пахотные земли⁸.

Борисовский р-н с административным центром в г. Борисов находится на северо-востоке Минской обл.⁹. Территория г. Борисова – 46 кв. км. Территория Борисовского р-на – 3046 кв. км. Общая площадь земель – 1663,9378, численность населения Борисовского р-на составляет 175 962 чел. Он отличается развитой промышленной структурой. В районном центре (г. Борисов) находится ряд крупных промышленных предприятий.

Мядельский р-н расположен на северо-западе Минской обл. Его территория располагается в пределах Нарочано-Вилейской низменности северной агроклиматической зоны¹⁰. На территории района находится крупнейшее в стране оз. Нарочь и Национальный парк «Нарочанский». В состав агропромышленного комплекса Мядельского р-на входит 14 крупных агрокомплексов. На его территории нет крупных промышленных предприятий. Развита инфраструктура туристической отрасли и рекреационной деятельности.

Таким образом, выбранные районы находятся в одной области и характеризуются сходными климатическими условиями. Однако между ними имеют место серьезные отличия по размерам, населению, специализации и направлениям хозяйственной деятельности. Статистическая информация по выбранным районам, используемая для последующего расчета индексов, представлена в табл. 2.

Таблица 2

Статистическая информация по Мядельскому, Борисовскому и Дзержинскому районам Минской обл.

Table 2

Statistical information for Myadel, Borisov and Dzerzhinsky districts of the Minsk region

Показатель	Значение	Районы		
		Мядельский	Борисовский	Дзержинский
Площадь всего	га	196823	297743	119992
Население	тыс. чел.	26448	175962	67360
Выбросы от стационарных источников	т	900	4500	2100
Пашня	га	34407	68852	52977
Осушенные земли	га	24927	26742	15516
Сельскохозяйственные угодья без пашни	га	38941	24657	18136
Площадь леса	га	78225	163277	36403
Площадь водных объектов	га	16671	3891	1155
Площадь болот	га	12060	6512	583
Площадь ООПТ	га	88720	20990	89

⁸Дзержинский районный исполнительный комитет [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dzerzhinsk.gov.by/ekonomika/promyshlennost> (дата обращения: 15.07.2023).

⁹Борисовский районный исполнительный комитет [Электронный ресурс]. URL: <http://www.borisov.gov.by/ekonomika/plan-gazvitiya-borisovskogo-rajona-2019-god> (дата обращения: 15.07.2023).

¹⁰Мядельский районный исполнительный комитет [Электронный ресурс]. URL: <http://myadel.gov.by/ru/promyshlennost-ru/> (дата обращения: 15.07.2023).

Представленная в табл. 2 статистическая информация использовалась для расчета комплексной оценки состояния биосферы Мядельского, Борисовского и Дзержинского районов Минской обл. Результаты расчетов комплексной оценки выбранных районов согласно предложенным индикаторам представлены в табл. 3.

Таблица 3

Фактические показатели индикаторов воздействия и величина балльной оценки состояния биосферы территории районов Минской обл.

Table 3

Actual indicators of impact indicators and the value of the score for the state of the biosphere in the districts of the Minsk region

Индикатор	Оценка	Районы		
		Мядельский	Борисовский	Дзержинский
Выбросы от стационарных источников, кг/га	Фактический	4,57	15,11	17,50
	Балл	5	2	1
Плотность населения, ч/км ²	Фактический	13,43	59,09	56,13
	Балл	4	-2	-2
Пашня, % к территории	Фактический	17,48	23,12	44,15
	Балл	4	1	-4
Осушенные земли, % к территории	Фактический	12,66	8,98	12,93
	Балл			
Сельскохозяйственные угодья, % к территории	Фактический	19,78	8,28	15,11
	Балл	4	-3	2
Водный ресурс, % к территории	Фактический	8,47	1,30	0,96
	Балл	5	-4	-5
Болота, % к территории	Фактический	6,12	2,18	0,48
	Балл	4	-4	-5
Лес, % к территории	Фактический	39,74	54,83	30,33
	Балл	-1	2	-3
ООПТ, % к территории	Фактический	45,07	7,04	0,07
	Балл	5	-2	-5
Расходы на ООС, тыс. р/чел.	Фактический	0,20	0,03	0,01
	Балл	5	-4	-5
Итого баллов		37	-9	-24

Наиболее высокие баллы по большинству показателей имеет Мядельский р-н. Для него не характерна интенсивная промышленная и аграрная деятельность. Поэтому выбросы от стационарных источников в 5 раз меньше по сравнению с Борисовским р-ном и в 2,3 раза – с Дзержинским. По площади Мядельский р-н уступает Борисовскому, но превосходит Дзержинский. Тем не менее, при расчете относительного показателя (объем выбросов на гектар площади) оценка Мядельского р-на была выше по сравнению с остальными. Он имеет невысокий процент распаханности территории. Площадь остальных сельскохозяйственных угодий (луга, пастбища, сенокосы) превосходит площадь пашни только для Мядельского р-на. Естественно, что итоговый балл по относительной площади пашни и оставшихся сельскохозяйственных угодий к общей площади территорий был значительно выше, чем для Борисовского и Дзержинского районов. Абсолютные площади, занятые болотами и водными объектами на его территории, также были выше, что предопределило высокую относительную оценку. Мядельский р-н специализируется на природоохранной, рекреационной и туристической деятельности, поэтому показатель относительной доли площади особо охраняемых природных территорий и, соответственно, оценка в баллах являются наиболее высокими. Мядельский р-н имеет меньшую площадь леса по сравнению с Борисовским, и с учетом общей площади территории значительно уступает последнему по относительному показателю, хотя превосходит Дзержинский р-н. Площадь осушенных земель в Мядельском р-не незначительно ниже по сравнению с Борисовским, но с учетом общей площади территории, относительный показатель (индикатор) ниже на

3 балла. Итак, Мядельский р-н значительно превосходит остальные по расходам на охрану окружающей среды, что главным образом связано с наличием на его территории Национального парка «Нарочанский».

Борисовский р-н имеет среднюю итоговую оценку. Он уступает Мядельскому р-ну по большинству показателей. Более высокий балл получен по индикатору относительной лесистости территории. Площадь леса на его территории более чем в 2 раза выше по сравнению с Мядельским р-ном. Поэтому, даже в сравнении с общей площадью территорий районов, итоговый балл был также выше. Наиболее высокий балл для Борисовского р-на получен по показателю относительной осушенности территории. Показатель площади осушенных земель к остальной территории района был минимальным и составил 8,98 %.

Наиболее низкая итоговая оценка была получена для Дзержинского р-на. Это несколько противоречиво, так как район тоже нельзя отнести к территории с интенсивной промышленной деятельностью, в отличие от Борисовского р-на. Однако по индикатору относительного объема выбросов на единицу площади, Дзержинский р-н получил наименьший балл. Так, несмотря на то, что общий объем выбросов был ниже в 2,1 раза по сравнению с Борисовским р-ном, по общей площади территорий он уступает почти в 2,5 раза. Высокий относительный показатель распаханности территории (44 %) предопределил низкие баллы по относительной площади пашни и площади леса. Для Дзержинского р-на также характерна небольшая площадь, занятая болотами и водными объектами, что обусловило относительно низкие оценки. Низкая оценка получена и по индикатору особо охраняемых природных территорий. Здесь нет национальных парков и даже заказников. Относительно высокие оценки для территории Дзержинского р-на получены по таким показателям, как относительная площадь осушенных территорий и площадь сельскохозяйственных угодий за минусом пашни. По первому показателю Дзержинский р-н уступает только Борисовскому, а по второму Мядельскому.

Заключение

По результатам нашего исследования можно сделать следующие выводы:

– Разработанная методика позволяет ранжировать административные районы по состоянию окружающей среды на занимаемых ими территориях. Результаты расчетов, выполненных согласно предлагаемой методике, подтверждают первоначальную гипотезу, что более благоприятная ситуация по состоянию окружающей среды должна быть в административных районах, характеризующихся минимальным антропогенным воздействием. Так, наиболее высокая оценка получена для Мядельского р-на, средние показатели для Борисовского и наиболее низкие для Дзержинского р-на. При этом необходимо учитывать, что значительный вклад в итоговую оценку вносит специализация района. Если район, развивающий природоохранную, рекреационную и туристическую деятельность (Мядельский), предсказуемо имеет более высокую итоговую оценку, то относительная оценка районов, специализирующихся на аграрной деятельности (Дзержинский) и интенсивной промышленной деятельности (Борисовский) несколько неожиданная. Так, более значительное суммарное воздействие на окружающую среду и, соответственно, низкая итоговая оценка характерна для района с развитой сельскохозяйственной деятельностью.

– В соответствии с методикой, из десяти индикаторов, выбранных для оценки территории района, девять имеют прямое значение для характеристики воздействия на окружающую среду и один (расходы на охрану окружающей среды) косвенное. Этот показатель характеризует возможность и готовность руководства района финансировать природоохранные мероприятия. Следует отметить, что такие показатели (включая спонсорскую помощь) используются в большинстве зарубежных методик комплексной оценки состояния территорий. Исключение индикатора «расходы на охрану окружающей среды» из общей оценки не приведет к изменению относительной характеристики районов, но изменит итоговые суммарные показатели. Без указанного индикатора итоговый балл для Мядельского р-на равен +32, для Борисовского – –4 и для Дзержинского – –20. Таким образом, только для Мядельского р-на итоговая оценка состояния биосферы территории будет выше средневзвешенной, характерной для территории Республики Беларусь как с учетом всех индикаторов, так и при исключении индикатора, имеющего косвенное значение.

Библиографические ссылки

1. Dirk M. Wascher. Overview on Agricultural Landscape Indicators. Across OECD Countries [Internet, cited 2023 July 15]. Available from: <https://edepot.wur.nl/24131>.
2. Dirk M. Wascher. Landscape-indicator development: Steps towards a European approach. Wageningen University [Internet, cited 2023 July 15]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/40798303_Landscape-indicator_development_Steps_towards_a_European_approach.
3. Bruni D. Landscape quality and sustainability indicators. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2016;8:698–705.

4. Baral H, Holmgren P. A framework for measuring sustainability outcomes for landscape investments [Internet, cited 2023 July 15]. Working paper, Center for International Forestry Research, 2015. Available from: https://www.cifor.org/publications/pdf_files/WPapers/WP195Baral.pdf.
5. Participatory Use of a Tool to Assess Governance for Sustainable Landscapes [Internet, cited 2023 July 15]. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/ffgc.2021.507443/full>.
6. The Methodology of Landscape Quality (LQ) Indicators Analysis Based on Remote Sensing Data: Polish National Parks Case Study [Internet, cited 2023 July 15]. Available from: <http://www.mdpi.com/journal/sustainability>.
7. LandScale Assessment Framework and Guidelines. A New Approach for Assessing and Communicating Sustainability Performance at Landscape Scale [Internet, cited 2023 July 15]. Available from: <https://www.landscape.org>.
8. Pariss K. Environmental Indicators for Agriculture: Methods and Results. Executive summary 2001. Paris: OECD; 2001. p. 53.
9. Hatem Galal A. Ibrahim. Ecological Indicators for Landscape Assessment- Moving Forward with Sustainability Initiatives for Qatar. *Journal of Ecosystem & Ecography*. 2012;2:5. DOI: 10.4172/2157-7625.1000119.
10. Костяшкин НА, Гончарова ЕМ. Биосфера и ноосфера. Москва: Айрис-пресс; 2004. 576 с.

Reference

1. Dirk M. Wascher. Overview on Agricultural Landscape Indicators. Across OECD Countries [Internet, cited 2023 July 15]. Available from: <https://edepot.wur.nl/24131>.
2. Dirk M. Wascher. Landscape-indicator development: Steps towards a European approach. Wageningen University [Internet, cited 2023 July 15]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/40798303_Landscape-indicator_development_Steps_towards_a_European_approach.
3. Bruni D. Landscape quality and sustainability indicators. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2016;8:698–705.
4. Baral H, Holmgren P. A framework for measuring sustainability outcomes for landscape investments [Internet, cited 2023 July 15]. Working paper, Center for International Forestry Research, 2015. Available from: https://www.cifor.org/publications/pdf_files/WPapers/WP195Baral.pdf.
5. Participatory Use of a Tool to Assess Governance for Sustainable Landscapes [Internet, cited 2023 July 15]. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/ffgc.2021.507443/full>.
6. The Methodology of Landscape Quality (LQ) Indicators Analysis Based on Remote Sensing Data: Polish National Parks Case Study [Internet, cited 2023 July 15]. Available from: <http://www.mdpi.com/journal/sustainability>.
7. LandScale Assessment Framework and Guidelines. A New Approach for Assessing and Communicating Sustainability Performance at Landscape Scale [Internet, cited 2023 July 15]. Available from: <https://www.landscape.org>.
8. Pariss K. Environmental Indicators for Agriculture: Methods and Results. Executive summary 2001. Paris: OECD; 2001. p. 53.
9. Hatem Galal A. Ibrahim. Ecological Indicators for Landscape Assessment- Moving Forward with Sustainability Initiatives for Qatar. *Journal of Ecosystem & Ecography*. 2012;2:5. DOI: 10.4172/2157-7625.1000119.
10. Kostjashkin NA, Goncharova EM. Biosfera i noosfera [Biosphere and noosphere]. Moscow: Ajris-press; 2004. 576 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 07.08.2023.
Received by editorial board 07.08.2023.

РАСЧЕТ РЕЙТИНГА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ГОРОДОВ И АДМИНИСТРАТИВНЫХ РАЙОНОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ ЗА 2021 г.

Д. В. ЦУБЛЕНОК¹⁾, Е. И. ГРОМАДСКАЯ¹⁾, М. В. ВОДЕЙКО¹⁾

¹⁾Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов,
ул. Славинского, 1, корп. 2, 220086, г. Минск, Беларусь

Исследование ориентировано на информирование общественности и всех заинтересованных лиц о проведенной работе по расчету рейтинга экологического развития отдельных регионов страны, полученных результатах и балльном соотношении рассматриваемых административных территорий относительно друг друга. Рейтинг экологического развития регионов Республики Беларусь призван отражать деятельность в области рационального природопользования и охраны окружающей среды государственных органов, в компетенцию которых входят вопросы охраны окружающей среды, органов исполнительной власти, общественных объединений, граждан на соответствующих территориях с возможностью сопоставления информации в административно-территориальном разрезе. Он служит информационной основой для принятия экологически значимых решений по совершенствованию экологической политики, механизмов регулирования природопользования и охраны окружающей среды, контроля за соблюдением природоохранного законодательства, оценки эффективности принимаемых мер по охране окружающей среды, действия региональных программ, а также научно-технических разработок, направленных на обеспечение экологической безопасности и устойчивого природопользования. В статье отражены результаты расчета рейтинга экологического развития Минска, а также Брестского, Витебского, Гомельского, Гродненского, Минского и Могилевского районов в 2021 г. Дана сравнительная характеристика расчета рейтинга 2021 к 2020 г. для областных центров и г. Минска Республики Беларусь. Исходные данные для расчета показателей рейтинга экологического развития областных центров, Минска и районов являются данные, формируемые в соответствии с ТКП 17.02-19-2021(33140) «Охрана окружающей среды и природопользование. Рейтинг экологического развития регионов Республики Беларусь. Технические требования» органами государственного управления, организациями, подчиненными Правительству Республики Беларусь, местными органами власти (райисполкомы, Брестский, Витебский, Гомельский, Гродненский, Минский, Могилевский горисполкомы), территориальными органами Минприроды и подчиненными организациями, иными организациями Республики Беларусь. Методика расчета рейтинга экологического развития городов и районов также приведена в ТКП 17.02-19-2021, где подробно описаны последовательность, формулы, формирование комплексов показателей в группы показателей для детального и корректного расчета. Результат исследования – ранжирование городов и районов по комплексу показателей, которые затронули вопросы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, а также проблемы эффективности экологической политики на региональном уровне. Так, в 2021 г. лидером стали Брест и Могилевская обл., однако с наименьшим количеством баллов в рассматриваемом году стали г. Гомель и Минский р-н.

Ключевые слова: экорейтинг; воздействие на окружающую среду; охрана окружающей среды; комплексная оценка; экологическое состояние; экологические показатели.

Образец цитирования:

Цубленок ДВ, Громадская ЕИ, Водейко МВ. Расчет рейтинга экологического развития городов и административных районов Республики Беларусь за 2021 г. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;3:97–105. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-97-105>

For citation:

Tsublianok DV, Hramadskaya AI, Vadeika MV. Calculation of the rating of ecological development of individual regions of the Republic of Belarus in 2021. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;3:97–105. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-3-97-105>

Авторы:

Дарья Владимировна Цубленок – младший научный сотрудник отдела поверхностных вод.

Елена Ивановна Громадская – начальник отдела поверхностных вод.

Маргарита Вячеславовна Водейко – младший научный сотрудник отдела поверхностных вод.

Authors:

Darya V. Tsublianok, junior researcher at the department of the surface water.

opv@cricuwr.by

Alena I. Hramadskaya, head of the department of the surface water.

grei@cricuwr.by

Marharyta V. Vadeika, junior researcher at the department of the surface water.

opv@cricuwr.by

CALCULATION OF THE RATING OF ECOLOGICAL DEVELOPMENT OF INDIVIDUAL REGIONS OF THE REPUBLIC OF BELARUS IN 2021

D. V. TSUBLIANOK^a, A. I. HRAMADSKAYA^a, M. V. VADEIKA^a

*^aCentral Research Institute for Complex use of Water Resources,
1 Slavinskaya Street, 2 building, Minsk 220086, Belarus
Corresponding author: D. V. Tsublianok (opv@cricuwr.by)*

The article is aimed at informing the public and all interested parties about the work carried out to calculate the rating of environmental development of individual regions of the country, the results obtained and the score ratio of the administrative territories under consideration relative to each other. The rating of ecological development of the regions of the Republic of Belarus is intended to reflect the activities in the field of rational nature management and environmental protection of state bodies whose competence includes environmental protection issues, executive authorities, public associations, citizens in the relevant territories with the possibility of comparing information in the administrative-territorial context. It serves as an information basis for making environmentally significant decisions to improve environmental policy, environmental management and environmental protection mechanisms, monitoring compliance with environmental legislation, evaluating the effectiveness of environmental protection measures, developing regional programs, as well as scientific and technical developments aimed at ensuring environmental safety and sustainable environmental management. This article contains the results of calculating the rating of environmental development of the regions of the regional centers, Minsk, Brest, Vitebsk, Gomel, Grodno, Minsk and Mogilev districts in 2021. As well as a comparative characteristic of the calculation of the rating of 2021 by 2020 for regional centers and Minsk of the Republic of Belarus. The initial data for calculating the environmental development rating indicators of regional centers, Minsk and districts are the data generated in accordance with the TAP 17.02-19-2021 (33140) "Environmental protection and nature management. Rating of ecological development of the regions of the Republic of Belarus. Technical requirements" by public administration bodies, organizations subordinate to the Government of the Republic of Belarus, local authorities (district executive committees, Brest, Vitebsk, Gomel, Grodno, Minsk, Mogilev city executive committees), territorial bodies of the Ministry of Natural Resources and subordinate organizations, other organizations of the Republic of Belarus. The methodology for calculating the rating of environmental development of cities and districts is also given in the TAP 17.02-19-2021, which describes in detail the sequence, formulas, the formation of complexes of indicators into groups of indicators for detailed and correct calculation. The main results of the article were the ranking of cities and districts according to a set of indicators that touched upon issues of environmental protection and rational use of natural resources, as well as issues of the effectiveness of environmental policy at the regional level. For example, in 2021 Brest and Mogilev region became the leaders, however, Gomel and Minsk region became the lowest number of points in the year under review.

Keywords: environmental rating; environmental impact; environmental protection; comprehensive assessment; environmental condition; environmental indicators.

Введение

Расчет рейтинга экологического развития регионов Республики Беларусь обусловлен необходимостью комплексной оценки экологического состояния отдельных регионов Республики Беларусь для реализации государственной политики страны в области устойчивого развития и повышения качества окружающей среды [1].

В Беларуси экорейтинг введен впервые в 2021 г. РУП «ЦНИИКИВР». В 2022 г. проведен расчет и составление экологического рейтинга за 2021 г. в разрезе областных центров и г. Минска, а также Брестского, Витебского, Гомельского, Гродненского, Минского и Могилевского районов на основании данных статистики, предоставленных в 2022 г. за предыдущий год [2].

Наиболее важными задачами проведения работ по составлению экологического рейтинга развития регионов Республики Беларусь являются проведение оценки экологического состояния отдельных регионов и их последующее ранжирование по комплексу показателей с целью выявления и определения значимости отдельных экологических проблем на рассматриваемой территории для последующего планирования, разработки и реализации мероприятий по улучшению экологического состояния территории и ее устойчивому функционированию.

Показатели экологического развития регионов, согласно техническому кодексу установившейся практики ТКП 17.02-19-2021(33140) «Охрана окружающей среды и природопользование. Рейтинг экологического развития регионов Республики Беларусь. Технические требования», утвержденному и введенному в действие постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 27 апреля 2021 г. № 5-Т (далее – ТКП 17.02-19-2021 (33140)), затрагивают вопросы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов. Проведение рейтинговой

оценки и представление ее результатов в виде информационных материалов способствует повышению качества экологической информации и информированности населения о состоянии окружающей среды в конкретном регионе¹.

На основании результатов экологического рейтинга осуществляется координация на региональном уровне деятельности субъектов, вовлеченных в управление окружающей средой, развивается система экологических показателей на территориальном уровне.

Материалы и методы исследования

Расчет рейтинга экологического развития отдельных регионов Республики Беларусь проведен согласно ТКП 17.02-19-2021 (33140), на основании исходных данных, сформированных в соответствии с национальным законодательством в области использования природных ресурсов и охраны окружающей среды, с учетом международных подходов по оценке экологического состояния окружающей среды и ее отдельных компонентов.

Рейтинг экологического развития регионов Республики Беларусь представляет собой метод количественной оценки и сравнительного анализа показателей экологического развития отдельных административно-территориальных единиц Республики Беларусь².

Рейтинг экологического развития регионов за 2021 г. рассчитан для областных центров, Минска, Брестского, Витебского, Гомельского, Гродненского, Минского и Могилевского районов [2].

Для формирования экологического рейтинга областных центров и Минска использовано 32 показателя в 3-х категориях. При этом в каждой из 3-х категорий выделено от 3 до 5 групп показателей, и каждая из них включает от 1 до 4 показателей.

Для формирования экологического рейтинга Брестского, Витебского, Гомельского, Гродненского, Минского и Могилевского районов за 2021 г. использовано 37 показателей в 3-х категориях. При этом в каждой из 3-х категорий выделено от 4 до 6 групп показателей, и каждая из них включает от 1 до 4 показателей.

По каждому показателю район или город получает баллы, количество которых определяется положением данного района (города) среди других районов (городов) с присвоением баллов от 0 до 100, где 100 баллов характеризует район или город как абсолютного лидера по показателю, а 0 баллов – как абсолютного аутсайдера³.

Методология экологического рейтинга позволяет ранжировать города и районы Республики Беларусь по показателям в 3-х категориях, каждая из которых имеет свой относительный вес (вклад) в итоговый рейтинг района:

- текущее состояние и использование компонентов окружающей среды – 30 %;
- воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду – 30 %;
- управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики – 40 % [1].

Для визуализации распределения баллов в таблицах используется градиентная цветовая заливка: наиболее высокие баллы по показателю отражаются насыщенным зеленым цветом, переходящим в светло-зеленый и белый, с последующим переходом на светло-красный цвет и его насыщением⁴.

Таким образом, результат составления рейтинга экологического развития городов и районов за 2021 г. получен путем суммирования баллов по всем показателям каждой группы в пределах 3-х категорий: «Текущее состояние и использование компонентов окружающей среды», «Воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду» и «Управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики».

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных результатов расчета их рейтинга экологического развития областных центров и г. Минска, Брестского, Витебского, Гомельского, Гродненского, Минского и Могилевского районов за 2021 г. проведен в разрезе групп показателей, категорий показателей и итогового результата расчета рейтинга [2].

По совокупности проанализированных показателей для областных центров и Минска в категории 1 «Текущее состояние и использование компонентов окружающей среды» результаты рейтинга

¹ТКП 17.02-19-2021 (33140). Охрана окружающей среды и природопользование. Рейтинг экологического развития регионов Республики Беларусь. Технические требования = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Рэйтынг экалагічнага развіцця рэгіёнаў Рэспублікі Беларусь. Тэхнічныя патрабаванні. Введен в действие постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 27 апреля 2021 г. № 5-Т. Минск: Минприроды, 2021.

²Там же.

³Там же.

⁴Там же.

городов ранжированы в последовательности от лучшего к худшему: Брест, Витебск, Гомель, Гродно, Могилев, Минск (табл. 1). Среди районов осуществлено ранжирование в порядке от лучшего к худшему: Брестский, Витебский, Гомельский, Гродненский, Могилевский, Минский (табл. 2).

Таблица 1

Сравнительная балльная оценка деятельности в категории «Текущее состояние и использование компонентов окружающей среды» в г. Минске и областных центрах в 2021 г.

Table 1

Comparative assessment of activities in the category «State and use of environmental components» in Minsk and regional centers in 2021

Город	Водные ресурсы, водопользование	Атмосферный воздух	Земельные ресурсы и почвы	Сумма баллов
Брест	82	67	100	249
Витебск	97	100	13	210
Гомель	100	76	24	200
Гродно	28	0	99	127
Минск	19	16	0	36
Могилев	0	28	73	100

Таблица 2

Сравнительная балльная оценка деятельности в категории «Состояние и использование компонентов окружающей среды» на территории административных районов в 2021 г.

Table 2

Comparative point evaluation of activities in the category «State and use of environmental components» on the territory of administrative districts in 2021

Административный район	Водные ресурсы, водопользование	Атмосферный воздух	Земельные ресурсы и почвы	Биоразнообразие	Сумма баллов
Брестский	43	61	3	84	191
Витебский	100	19	13	0	132
Гомельский	13	22	82	47	165
Гродненский	68	22	0	100	190
Минский	0	0	100	16	116
Могилевский	6	100	82	49	237

По группе показателей «Водные ресурсы, водопользование», отражающей текущее состояние и использование водных ресурсов в пределах городов, наилучший результат в 2021 г. отмечен в Гомеле и Витебске, наихудший – в Могилеве. Среди районов наибольшее количество баллов по результатам расчета рейтинга имел Витебский р-н, наименьшее – Минский [4].

По группе показателей «Атмосферный воздух», отражающей уровень воздействия на атмосферный воздух от стационарных источников выбросов, наилучшие результаты в 2021 г. были в Витебске и Гомеле, наихудшие – в Гродно и Минске. Среди районов наибольшее количество баллов по группе показателей имели Брестский р-н (лидировал по 2 показателям из 3), наименьшее – Витебский р-н.

По группе показателей «Земельные ресурсы и почвы» в 2021 г. лидировали Брест и Гродно; наименьшее количество баллов по расчетам рейтинга – у Витебска, Минска и Гомеля. Среди районов наибольшее количество баллов по данной группе показателей имели Гродненский, Могилевский и Брестский р-ны, наименьшее – Минский.

По группе показателей «Биоразнообразие» на основе расчета рейтинга наибольшее количество баллов имели Гродненский р-н (за счет наибольшей среди остальных районов доли площади особо охраняемой

природной территории) и Брестский р-н (за счет наибольшей площади, на которой проведены работы по экологической реабилитации и восстановлению естественных экологических систем). Минский и Витебский р-ны по данной группе показателей имели наименьшее количество баллов [5].

По совокупности проанализированных показателей областных центров и Минска в категории 2 «Воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду» результаты рейтинга городов ранжированы в последовательности от лучшего к худшему: Брест, Минск, Гродно, Могилев, Гомель, Витебск (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительная балльная оценка деятельности в категории «Воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду» в г. Минске и областных центрах в 2021 г.

Table 3

Comparative assessment of activities in the category
«Impact of the main types of economic activity on the environment» in Minsk and regional centers in 2021

Город	Производственная сфера	Транспорт	Жилищно-коммунальное хозяйство	Обращение с отходами	Энергетика	Сумма баллов
Брест	100	21	76	100	52	349
Витебск	0	0	28	44	0	73
Гомель	25	8	0	0	100	134
Гродно	25	33	100	41	2	201
Минск	22	100	56	19	87	285
Могилев	20	1	41	63	43	168

Среди районов в категории 2 «Воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду» районы ранжированы в последовательности от лучшего к худшему: Могилевский, Брестский, Витебский, Гродненский, Минский, Гомельский (табл.4).

Таблица 4

Сравнительная балльная оценка деятельности в категории «Воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду» на территории административных районов в 2021 г.

Table 4

Comparative point assessment of activities in the category
«Impact of the main types of economic activities on the environment» on the territory of administrative districts in 2021

Административный район	Производственная сфера	Сельское хозяйство	Жилищно-коммунальное хозяйство	Обращение с отходами	Энергетика	Транспорт	Сумма баллов
Брестский	77	44	100	100	0	6	327
Витебский	6	64	51	61	97	0	278
Гомельский	1	100	28	0	34	1	164
Гродненский	0	0	61	60	100	5	226
Минский	0	37	0	18	22	100	178
Могилевский	100	87	19	67	64	2	339

По группе показателей «Производственная сфера», отражающей воздействие производственной сферы на атмосферный воздух и водные ресурсы в пределах областных центров и Минска, наилучший результат в 2021 г. зафиксирован в Бресте, наихудший – в Витебске и Могилеве. Среди районов наибольшее количество баллов имели Могилевский (за счет наиболее эффективного, по сравнению с другими районами, проведения мероприятий по сокращению выбросов в атмосферный воздух) и Брестский р-н (за счет

наибольшей среди остальных районов доли повторно используемой и оборотной воды в общем объеме воды, используемой на производственные нужды). Наименьшее количество баллов по группе показателей имели Гомельский, Минский и Гродненский р-ны.

В 2021 г. по группе «Транспорт» по результатам оценки наличия экологических транспортных средств в собственности физических лиц и организаций на 10 тыс. чел. лидировали Минск (6,43 единиц) и Гродно (3,10 единиц), наименьшее значение данного показателя отмечено в Витебске – 1,49 единиц. Среди районов по данной группе показателей абсолютным лидером являлся Минский р-н.

По группе показателей «Жилищно-коммунальное хозяйство» и по комплексу показателей образования и обращения с твердыми коммунальными отходами (далее – ТКО) наилучший результат в 2021 г. зафиксирован в Гродно, наихудший – в Гомеле.

Среди районов по данной группе показателей в 2021 г. лидировал Брестский р-н. Наименьшее количество баллов имели Минский и Могилевский р-ны, где объемы образования ТКО на 10 тыс. чел. в год были выше, чем в других районах, а также Витебский и Гродненский р-ны, где отсутствовали мощности линий по сортировке ТКО.

По группе показателей «Обращение с отходами» лидировал в 2021 г. Брест. Наименьшее количество баллов среди всех рассматриваемых городов зафиксировано в Гомеле. Следует отметить, что наибольшая доля выведенного из эксплуатации оборудования, содержащего полихлорированные бифенилы (далее – ПХБ), отмечена в Могилеве (97,82 %), наименьшая – в Минске (77,81 %). Среди районов по данной группе показателей наибольшее количество баллов имел Брестский (лидировал по 2 показателям из 4), а наименьшее количество баллов – Гомельский р-н.

По использованию в 2021 г. возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ) по группе «Энергетика» сохранилась ситуация 2020 г. – наилучший результат в Гомеле (установленная электрическая мощность 15 960 МВт), наихудший – в Витебске, где ВИЭ по-прежнему отсутствовали. Среди районов по данной группе Витебский занимал 2 место после Гродненского р-на. Отсутствовали сведения о наличии ВИЭ в Брестском, Гомельском и Минском районах.

По группе показателей «Сельское хозяйство» лидировали Витебский и Могилевский р-ны, в основном, за счет максимального количества баллов по показателю «доля объектов хранения навоза и навозосодержащих сточных вод, не отвечающих экологическим требованиям», а также «доля ликвидированных неиспользуемых артезианских скважин». Следует уточнить, что 100 баллов по результатам рейтинга, согласно ТКП 17.02-19-2021, присваивается районам, у которых изначально отсутствовали артезианские скважины, подлежащие ликвидации. Гродненский р-н в 2021 г. имел наименьшее количество баллов по данной группе показателей.

По совокупности проанализированных показателей для областных центров и г. Минска в категории 3 «Управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики» города ранжированы в последовательности от лучшего к худшему: Могилев, Минск, Брест, Гродно, Витебск, Гомель (табл. 5).

Таблица 5

Сравнительная балльная оценка деятельности в категории «Управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики» в г. Минске и областных центрах в 2021 г.

Table 5

Comparative point evaluation of activities in the category «Environmental impact management and effectiveness of environmental policy» in Minsk and regional centers in 2021

Город	Эколого-экономические показатели	Реализация местных природоохранных инициатив и участие в международном сотрудничестве	Участие общественности в решении экологических вопросов	Экологическое образование и просвещение	Эффективное использование городской территории	Сумма баллов
Брест	55	50	46	0	100	251
Витебск	0	0	100	22	40	163
Гомель	50	0	7	8	0	65
Гродно	19	0	65	38	54	176
Минск	75	100	0	67	99	341
Могилев	100	50	60	100	78	388

В категории 3 «Управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики» административные районы ранжированы в последовательности от лучшего к худшему: Брестский, Могилевский, Гомельский, Витебский, Гродненский, Минский (табл. 6).

Таблица 6

Сравнительная балльная оценка деятельности в категории «Управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики» в административных районах в 2021 г.

Table 6

Comparative point evaluation of activities in the category «Environmental impact management and effectiveness of environmental policy» in administrative districts in 2021

Административный район	Эколого-экономические показатели	Реализация местных природоохранных инициатив и участие в международном сотрудничестве	Участие общественности в решении экологических вопросов	Экологическое образование и просвещение	Сумма баллов
Брестский	100	67	5	47	219
Витебский	44	0	39	52	135
Гомельский	29	39	0	100	168
Гродненский	10	0	100	0	110
Минский	45	0	15	27	87
Могилевский	0	100	9	69	179

В группе «*Эколого-экономические показатели*» в 2021, аналогично 2020 г., лидировал Могилев. Наименьшее количество баллов в группе получено для Витебска. Анализ показателя «Доля средств городского бюджета, направленных на охрану окружающей среды и реализацию природоохранных мероприятий» свидетельствует, что его значение по всем городам составило менее 0,5 %. При этом минимальное значение в 2021 г. отмечено в Гродно (0 %), максимальное – в Могилеве (0,322 %). Среди районов в 2021 г. по данному показателю лидировал Брестский р-н. Наихудшим был результат для трех районов – Витебского, Гродненского и Могилевского.

По группе показателей «*Реализация местных природоохранных инициатив и участие в международном сотрудничестве*» наилучший результат в 2021 г. среди городов зафиксирован в Минске, наихудший – в Витебске, Гомеле и Гродно.

Результаты рейтинга районов по группе показателей «*Реализация местных природоохранных инициатив и участие в международном сотрудничестве*» свидетельствуют об отсутствии на территории районов инициатив в области климата, а также проектов международной технической помощи, реализуемых на территории районов.

По группе показателей «*Участие общественности в решении экологических вопросов*», позволяющей оценить уровень взаимодействия с общественностью местных органов исполнительной власти в вопросах, затрагивающих рациональное использование и охрану природных ресурсов, наибольшее количество баллов в 2021 г. по результатам расчета рейтинга имел Гродно, наименьшее, как и в 2020 г., – Минск. Среди районов по данной группе показателей наибольшее количество баллов было у Гродненского р-на, наименьшее – у Брестского, Гомельского и Могилевского.

По группе показателей «*Экологическое образование и просвещение*» в результате расчета наибольшее количество баллов получено для Минска, Могилева и Гродно. Следует отметить, что по данной группе показателей города получают наименьшее количество баллов ввиду полного или частичного отсутствия на их территории экологических фестивалей, форумов, конференций, а также недостаточного информационного обеспечения городского населения актуальной информацией о состоянии окружающей среды [6].

Среди районов по данной группе показателей лидировал Гомельский р-н за счет наличия объектов экологического туризма, проведенных экологических фестивалей, форумов и конференций.

По группе показателей «*Эффективное использование городской территории*» наибольшее количество баллов в 2021 г. набрал Брест, наименьшее – Гомель.

Итоговый результат расчета рейтинга экологического развития рассматриваемых городов и административных районов позволил ранжировать их в последовательности от лучшего к худшему:

- *города*: Брест, Могилев, Минск, Гродно, Витебск, Гомель (табл. 7);
- *административные районы*: Могилевский, Брестский, Гомельский, Витебский, Гродненский, Минский (табл. 8).

Таблица 7

Итоговый результат расчета рейтинга экологического развития г. Минска и областных центров за 2021 г.

Table 7

The final result of the calculation of the rating of environmental development of Minsk and regional centers for 2021

Город	Итоговые баллы рейтинга	Место
Брест	280	1
Витебск	150	5
Гомель	126	6
Гродно	169	4
Минск	232	3
Могилев	236	2

Таблица 8

Итоговый результат расчета рейтинга экологического развития административных районов за 2021 г.

Table 8

The final result of calculating the rating of environmental development of administrative districts for 2021

Административный район	Итоговые баллы рейтинга	Место
Брестский	243	2
Витебский	177	3
Гомельский	166	4
Гродненский	169	5
Минский	123	6
Могилевский	245	1

Заключение

Поскольку экологический рейтинг составляется 2-й год подряд, то имеется возможность сравнить результаты расчета рейтинга за 2020 и 2021 гг. Максимальное количество баллов в 2020 г. составило 283, что обеспечило 1-е место Гродно [7]. В 2021 г. максимальное количество баллов – 280 получил Брест, улучшив свое положение в рейтинге. Минимальное количество баллов в 2020 г. – 100 было у Витебска. Минимальное количество баллов в 2021 г. – 126 (Гомель). В 2021 г. Витебск улучшил результат, переместившись с 6-го места на 5-е с количеством баллов 150.

Расчет рейтинга экологического развития административных районов за 2021 г. проведен впервые. В 2021 г. 1 место с количеством баллов 245 занял Могилевский р-н. Наименьшее количество баллов – 123 у Минского р-на.

На основе анализа статистических данных за 2021 г. и результатов расчета рейтинга экологического развития регионов разработан комплекс мероприятий, направленный на снижение антропогенной нагрузки на компоненты окружающей среды.

Результаты расчета рейтинга экологического развития регионов Республики Беларусь за 2021 г. отражают необходимость повышения качества экологического образования, информирования граждан о состоянии окружающей среды, их вовлеченность в природоохранные мероприятия, а также повышение координации на региональном уровне деятельности субъектов, которые заняты управлением окружающей

средой. По результатам расчета рейтинга с учетом наиболее проблемных показателей для областных центров, г. Минска, а также Брестского, Витебского, Гомельского, Гродненского, Минского и Могилёвского районов разработан комплекс мероприятий по улучшению экологического состояния территорий.

Библиографические ссылки

1. Дубенок СА, Кулаков АЮ, Конончук ТП. Методология разработки и формирования рейтинга экологического развития регионов Республики Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;1:14–24.
2. Громадская ЕИ, Баканова ДВ, Водейко МВ. *Состояние природной среды Беларуси*. Минск: РУП «ЦНИИКИВР»; 2022. 147 с.
3. Баканова ДС, Громадская ЕИ. Актуализация картографической и тематической информации о поверхностных водных объектах Республики Беларусь. В: *Сборник статей III Международной научно-технической конференции. «Минские научные чтения». Часть 1*. Минск: ИВЦ Минфина; 2020. с. 93–98.
4. Громадская ЕИ, Баканова ДС. Инвентаризация родников Беларуси. *Наука и инновации*. 2021;8:79–83.
5. Баканова ДС, Водейко МВ, Таврыкина ОМ. Результаты инвентаризации поверхностных водных объектов в бассейне реки Припять. *Наука и инновации*. 2022;6:77–79.
6. Громадская ЕИ, Дубенок СА, Сушко СВ. *Состояние природной среды Беларуси*. Минск: РУП «ЦНИИКИВР»; 2022. 150 с.

References

1. Dubenok SA, Kulakov AYU, Kononchuk TP. *Metodologiya razrabotki i formirovaniya reitinga ekologicheskogo razvitiya regionov Respubliki Belarus* [Methodology for developing and ranking the environmental development of the regions of the Republic of Belarus]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*. 2022;1:14–24. Russian.
2. Gromadskaya EI, Bakanova DV, Vodeiko MV. *Sostoyanie prirodnoi sredy Belarusi* [The state of the natural environment of Belarus]. Minsk: RUE «CRICUWR»; 2022. 147 p. Russian.
3. Bakanova DS, Gromadskaya EI. *Aktualizatsiya kartograficheskoi i tematicheskoi informatsii o poverkhnostnykh vodnykh ob'ektakh Respubliki Belarus* [Updating cartographic and thematic information about surface water bodies of the Republic of Belarus]. In: *Sbornik statei III Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Minskie nauchnye chteniya». Chast 1*. Minsk: IVTs Minfina; 2020. p. 93–98. Russian.
4. Gromadskaya EI, Bakanova DS. *Inventarizatsiya rodnikov Belarusi* [Inventory of springs in Belarus]. *Nauka i innovatsii*. 2021;8:79–83. Russian.
5. Bakanova DS, Vodeiko MV, Tavrykina OM. *Rezultaty inventarizatsii poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov v basseine reki Pripyat* [Results of the inventory of surface water bodies in the Pripyat River basin]. *Nauka i innovatsii*. 2022;6:77–79. Russian.
6. Gromadskaya EI, Dubenok SA, Sushko SV. *Sostoyanie prirodnoi sredy Belarusi* [The state of the natural environment of Belarus]. Minsk: RUE «CRICUWR»; 2022. 150 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 09.02.2023.
Received by editorial board 09.02.2023.

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Яхновец М. Н., Юрченко Е. О.</i> Оценка биологической активности экстрактов из компостированных листьев <i>Acer negundo</i> L. и <i>Robinia pseudoacacia</i> L. на проростках тест-культур	4
<i>Акимов А. Н., Людчик А. М., Мельник Е. А., Павленко П. Н.</i> Сезонный ход концентраций антропогенных загрязнений воздуха и приземного озона в городах Беларуси.....	16

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Веренич К. А., Миненко В. Ф.</i> Применение математического моделирования рентгенодиагностической процедуры при разработке диагностических референтных уровней.....	31
<i>Никитин А. Н., Шуранкова О. А., Чешик И. А., Калиниченко С. А.</i> Сравнительная оценка методов последовательной экстракции Тессьера и BCR для оценки распределения ванадия по формам нахождения в почве	41

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Кучкарова Л. С., Каюмов Х. Ю., Рохимова Ш. О., Сыса А. Г.</i> Внешняя и внутренняя секреция поджелудочной железы при экспериментальном панкреатите.....	50
<i>Стожаров А. Н., Хрусталёв В. В.</i> Заболеваемость жителей Беларуси, облученных I-131 во время внутриутробного развития в результате аварии на Чернобыльской АЭС	57
<i>Таланкина А. С., Гончаров А. Е.</i> Метаболические особенности субпопуляций дендритных клеток.....	65

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Цыбулько Н. Н., Цырибко В. Б., Алексейчик Е. В., Жукова И. И.</i> Генетические особенности, типизация и распространение дефляционно-опасных почв на сельскохозяйственных землях Беларуси	78
<i>Родькин О. И., Ересько М. А.</i> Разработка и адаптация методики комплексной оценки состояния окружающей среды для территорий административных районов	88
<i>Цубленок Д. В., Громадская Е. И., Водейко М. В.</i> Расчет рейтинга экологического развития городов и административных районов Республики Беларусь за 2021 г.	97

CONTENTS

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

- Yakhnovets M. N., Yurchenko E. O.* Evaluation of the biological activity of extracts from *Acer negundo* L. and *Robinia pseudoacacia* L. composted leaves on seedlings of test cultures4
- Akimov A. N., Liudchik A. M., Melnik E. A., Paulenka P. N.* Seasonal course of anthropogenic air pollution and surface ozone concentrations in the cities of Belarus.16

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

- Viarenich K. A., Minenko V. F.* Application of mathematical simulation of X-ray radiography procedure to development of diagnostic reference levels.....31
- Nikitin A. N., Shurankova O. A., Cheshik I. A., Kalinichenko S. A.* Comparative assessment of the Tessier and BCR sequential extraction methods for the evaluation of vanadium speciation in the soil41

MEDICAL ECOLOGY

- Kuchkarova L. S., Kayumov X. Yu., Rokhimova Sh. O., Sysa A. G.* External and internal secretion of the pancreas in experimental pancreatitis50
- Stojarov A. N., Khrustalev V. V.* Analysis of the morbidity of residents of Belarus who received thyroid exposure due to the accumulation of I-131 during fetal development as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant57
- Talankina A. S., Goncharov A. E.* Metabolic features of dendritic cell subpopulations65

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

- Tsybulka M. M., Tsyribka V. B., Alexeichik E. V., Zhukova I. I.* Genetic features, typification and deflation risk soils on agricultural lands of Belarus.....78
- Rodzkin O. I., Eresko M. A.* Development and adaptation of the methodology for comprehensive assessment of the state of the environment for the territories of administrative regions88
- Tsublianok D. V., Hramadskaya A. I., Vadeika M. V.* Calculation of the rating of ecological development of individual regions of the Republic of Belarus in 202197

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.
№ 3. 2023**

Учредитель:
Белорусский государственный университет

Юридический адрес: пр. Независимости, 4,
220030, Минск.

Почтовый адрес: ул. Долгобродская, 23/1,
220070, Минск.

Тел. 398-89-34, 398-93-44.

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

«Журнал Белорусского государственного
университета. Экология» издается с сентября 2017 г.
До августа 2017 г. выходил под названием
«Экологический вестник»
(ISSN 1994-2087).

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

Подписано в печать 29.09.2023.
Тираж 100 экз. Заказ 245.

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

© БГУ, 2023

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 3. 2023**

Founder:
Belarusian State University

Registered address: 4 Niezaliežnasci Ave.,
220030, Minsk.

Correspondence address: 23/1 Daŭhabrodskaja Str.,
220070, Minsk.

Tel. 398-89-34, 398-93-44.

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

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

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

Signed print 29.09.2023.
Edition 100 copies. Order number 245.

RUE «Information Computing Center of the Ministry
of Finance of the Republic of Belarus».
License for publishing No. 02330/89, 3 March, 2014.
17 Kalvaryjskaya Str., 220004, Minsk.

© BSU, 2023