



БЕЛОРУССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЭКОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

ECOLOGY

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

2

2022

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
<i>Батян А. Н.</i>	Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Головатый С. Е.</i>	Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Голубев А. П.</i>	Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Гричик В. В.</i>	Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Дардынская И. В.</i>	Центр всемирного здоровья «Великие озера», Чикаго, США.
<i>Дзятковская Е. Н.</i>	Институт стратегии развития образования Российской академии образования, Москва, Россия.
<i>Дроздович В. В.</i>	Национальный институт рака, США, Бетесда.
<i>Зафранская М. М.</i>	Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Кильчевский А. В.</i>	Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
<i>Коноплев А. В.</i>	Институт радиоактивности окружающей среды университета г. Фукусима, Япония.
<i>Коровин Ю. А.</i>	Обнинский институт атомной энергетики – Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Обнинск, Россия.
<i>Ленгфельдер Э.</i>	Радиологический институт здоровья и окружающей среды им. Отто Хуга, Мюнхен, Германия.
<i>Либератос Г.</i>	Афинский технический университет, Афины, Греция.
<i>Линге И. И.</i>	Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия.
<i>Лукашенко С. Н.</i>	Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия.
<i>Логинов В. Ф.</i>	Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
<i>Медведев С. В.</i>	ГНУ «Объединенный институт проблем информатики» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
<i>Набиев И. Р.</i>	Реймский университет, Франция, Реймс.
<i>Степанов С. А.</i>	Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Россия.
<i>Стожаров А. Н.</i>	Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь.
<i>Тарутин И. Г.</i>	ГУ «РНПЦ онкологии и медицинской радиологии 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.

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

УДК 316.6:616-036.21

ВЛИЯНИЕ УРБАНИЗАЦИИ НА ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗДОРОВЬЕ ЖИТЕЛЕЙ МЕГАПОЛИСОВ В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ COVID-19

В. Н. ЛУЧИНА¹⁾, В. В. СИВУХА¹⁾

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

В Европе, Азии и Америке существует много исследований, посвященных пандемии COVID-19. Данные изыскания доказывают, что к основным факторам, отрицательно воздействующим на психическое и соматическое здоровье людей, относится социальное дистанцирование. Большинство стран мира с целью уменьшения нагрузки на систему здравоохранения использовали практику введения карантина. Уменьшение социальных контактов из-за вынужденной самоизоляции послужило поводом возникновения таких психологических проблем, как апатия, стресс, страх, одиночество, которые неизбежно возникают у жителей современных мегаполисов, влияя на психофизиологическое состояние здоровья людей. Актуализируется вопрос профессионального выгорания у медицинского персонала, работающего в «красной зоне», подвергающегося угрозе заражения и экстремальной нагрузке.

Ключевые слова: COVID-19; карантин; локдаун; социальное дистанцирование; пандемия; стресс; депрессия; «инфодемия»; самоубийство; урбанизация; «красная зона»; профессиональное выгорание.

Образец цитирования:

Лучина ВН, Сивуха ВВ. Влияние урбанизации на психофизиологическое здоровье жителей мегаполисов в условиях пандемии COVID-19. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;2:4–11.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-4-11>

For citation:

Luchina VN, Sivukha VV. The impact of urbanization on the psychophysiological health of residents of megacities in the conditions of the COVID-19 pandemic. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;2:4–11. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-4-11>

Авторы:

Виктория Николаевна Лучина – старший преподаватель кафедры социально-гуманитарных наук и устойчивого развития.

Валерия Викторовна Сивуха – студентка факультета мониторинга окружающей среды.

Authors:

Victoria N. Luchina, senior lecturer at the department of social and humanitarian sciences and sustainable development.

luchina-v@mail.ru

Valeria V. Sivukha, student at the faculty of environmental monitoring.

sivuxa.2001@mail.ru

THE IMPACT OF URBANIZATION ON THE PSYCHOPHYSIOLOGICAL HEALTH OF RESIDENTS OF EGACITIES IN THE CONDITIONS OF THE COVID-19 PANDEMIC

V. N. LUCHINA^a, V. V. SIVUKHA^a

^a*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: V. N. Luchina (luchina-v@mail.ru)*

There are many studies on the COVID-19 pandemic in Europe, Asia and America. These studies prove that the main factors negatively affecting the mental and somatic health of people include social distancing. Most countries of the world have used the practice of quarantine in order to reduce the burden on the healthcare system. The decrease in social contacts due to forced self-isolation has caused some psychological problems, such as apathy, stress, fear, loneliness, which also inevitably arise among residents of modern megacities, as factors of the influence of urbanization on the psychophysiological state of people's health. Also, the issue of professional burnout is relevant for medical personnel working in the "red zone", exposed to the threat of infection and extreme stress.

Keywords: COVID-19; quarantine; lockdown; social distancing; pandemic; stress; depression; "infodemia"; suicide; urbanization; "red zone"; professional burnout.

Введение

Пандемия COVID-19 продолжает распространяться по миру и является одним из главных вызовов человечеству в новейшей истории. Следует отметить, что пандемии поражали народы с древних времен. Первый «карантин» для улучшения борьбы с проказой был введен в морских портах Венеции в 1127 г. Данная санитарная мера оказалась успешной и впоследствии неоднократно использовалась во многих европейских городах. В 1918 г. в Европе началась эпидемия «испанского» гриппа, которым переболело более 550 млн и умерло около 90–100 млн чел. Первая мировая война не унесла столько человеческих жизней, как «испанка». Опираясь на полученный скорбный опыт, многие страны мира начали реформировать свои системы здравоохранения и более тщательно осуществлять эпидемиологический надзор за болезнями. В 2009 г. человечество столкнулось с эпидемией свиного гриппа, вызванного вирусом гриппа «А-Н1N1», после чего Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) была разработана модель прогнозирования рисков развития пандемии и изучены возможные психоэмоциональные последствия для людей.

Также неутешительным является тот факт, что «испанка» имела четыре волны и каждая новая из них была слабее предыдущей. Свиной грипп также удалось обуздать и сократить заболеваемость им путем вакцинации и появления у людей иммунитета к этой болезни. К сожалению, до сих пор не удается остановить пандемию COVID-19, так как происходят мутации вируса и не в ослабевающую сторону. Поэтому во многих странах мира для улучшения борьбы с коронавирусом была предпринята такая санитарная мера, как жесткий карантин (локдаун). Она часто подвергается критике и непониманию со стороны многих людей, несет в себе как положительные, так и отрицательные аспекты.

Одним из последствий введения карантина является негативный экономический аспект. В период COVID-19 сократились доходы населения практически во всех странах мира, меры жесткой бюджетной экономии вызвали повышение уровня тревожности, снижение самооценки у многих людей, более частое употребление алкоголя и психоактивных веществ, увеличение случаев суицида.

Вместе с тем одним из негативных последствий карантина стало проявление агрессии у людей, что является следствием шоковой травмы, во многом вызванной СМИ. Агрессия выражается различными способами, начиная от шуток в Интернете на тему убийства кашляющих и чихающих в общественных местах, заканчивая обсуждением «теорий заговора» и поиском виновных. Более того, во многих странах мира фиксируется рост домашнего насилия. Возросло количество обращений на «горячие линии» людей, пострадавших от издевательств со стороны близких. Здесь лидерство принадлежит Китаю, где домашнее насилие увеличилось в три раза в сравнении с докоронавирусным периодом.

Негативное воздействие на психологическое и соматическое здоровье человека в условиях COVID-19 оказывает тревога. Причины появления тревожности достаточно разнообразны. По мнению ученых, к ним относятся:

– неизученность ситуации, дающая возможность различных трактовок происходящего. Такое всегда случается при появлении нового заболевания, последствия которого неизвестны, и при отсутствии подобного опыта;

– непредсказуемость. На данный момент учеными не выявлены все негативные последствия коронавируса для организма человека, эффективность существующих на сегодняшний день вакцин и глобальность последствий пандемии.

Еще одним разрушительным фактором, неблагоприятно воздействующим на психическое здоровье человека в условиях пандемии, является паника, которая порождается самым древним механизмом выживания у человека – страхом [1]. «Панические атаки» являются реакцией на стресс, возникающий при недостаточности информации и невозможности спрогнозировать события. Как результат, у человека обостряется потребность в дополнительной информации, а наиболее доступным её источником является Интернет, в котором зачастую распространяются панические слухи, «фейки» и дезинформация, вызывающие у человека дезориентацию и причиняющие психологический вред. В случаях неконтролируемой тревожности «фейковая» информация формирует «пандемию страха». По мнению ученых Института молекулярной и поведенческой неврологии Мичиганского университета, это приводит к стремительному перерастанию индивидуальной паники в массовую. Массовые паники нередко заканчивались трагическим исходом. По мнению психологов, заражение страхом невозможно предотвратить, но можно уменьшить. Так как страх – это социальный феномен, то для снижения уровня панических настроений и регулирования общественного поведения необходимо применить классическое правило: присутствие спокойного и уверенного в себе человека рядом с людьми, инфицированными страхом. В большом социуме роль такой авторитетной фигуры призваны выполнять власти. Однако контрпродуктивными являются попытки успокаивать население на фоне новостных сюжетов, в которых люди в средствах индивидуальной защиты проводят тесты на вирус или очереди машин скорой помощи около больниц. Это лишь усиливает страхи и вызывает «инфодемию». Людям в стрессовой ситуации сложно рационально мыслить, поэтому средства массовой информации должны корректно предоставлять четкие инструкции по необходимым мерам безопасности в период пандемии, а также своевременно и правдиво информировать граждан о предпринимаемых государством усилиях по борьбе с вирусом [2].

Поддавшись «пандемии страха», человек пытается хоть что-то делать, не всегда понимая что именно, зачем и для чего. Такое суетливое поведение усиливает паническое настроение и неблагоприятно отражается на соматическом состоянии людей. Опираясь на полученный опыт, китайские ученые подтверждают вышесказанное, заявляя о том, что наиболее негативное воздействие на людей оказывают новостные данные: люди часто проверяют новые сведения о коронавирусе, следят за количеством заразившихся, тем самым увеличивая собственный уровень тревожности. Отсутствие сна и генерализованное тревожное расстройство отмечается более чем у 35 % людей, ответивших на опрос в сети Интернет. Данные симптомы чаще наблюдались у людей младше 35 лет, а также у медицинского персонала [2].

В условиях пандемии, в том числе как следствие переживания длительного стресса и паники, возможно формирование психических расстройств: депрессия, тревожное расстройство, обсессивно-компульсивное расстройство, острое стрессовое расстройство, генерализованное тревожное расстройство, посттравматическое стрессовое расстройство, фобии, в том числе агорафобия и др.

Психологические исследования последствий пандемий, проведенные за последние 20 лет, свидетельствуют о негативном влиянии на мироощущение людей таких событий в их жизни, как отказ от привычного круга общения и образа жизни, ограничение свободы, финансовые потери и др. Даже для работающих удаленно до введения локдауна все происходящее явилось стресс-фактором, так как любая принудительная изоляция человека на срок более 10 дней вызывает депрессивное состояние и вредит здоровью на уровне психики.

Современный городской житель зачастую чувствует себя одиноким в большом мегаполисе, где проживает огромное количество незнакомых друг другу людей. В условиях пандемии COVID-19 ощущение одиночества у жителя мегаполиса усилилось в разы, несмотря на то что он решает множество повседневных задач, много работает и совсем мало отдыхает. Все эти факторы оказывают колоссальное воздействие на психику. Многие горожане привыкают к напряженному нервному состоянию и не способны даже настроить себя на полноценный, умиротворяющий отдых. Малоподвижность, отсутствие естественной природной среды, постоянное пребывание в измененной среде, загрязненность воздуха и воды – все эти факторы отрицательно сказываются на образе жизни горожан и на их здоровье, особенно в период локдауна. Следовательно, городские жители часто страдают неврозами и другими «болезнями цивилизации».

Мегаполисы имеют как положительные, так и отрицательные стороны. Жизнь в современном городе дает человеку больше шансов для развития, комфорта, однако отрицательно сказывается на физическом и психологическом здоровье людей. Экологические, биологические и социально-экономические факторы крупных городов, оказывающие влияние на самочувствие и здоровье человека, очень разнообразны и многочисленны. Главное место среди них занимают те процессы, которые не соответствуют биологическим потребностям человеческого организма. Источником их возникновения является биологическое, физическое и химическое загрязнение окружающей среды. Характерные экологические проблемы для

мегаполисов – это воздействие загрязненной и измененной окружающей среды, большая численность населения, загрязнение воды и атмосферного воздуха, электромагнитные излучения, высокий уровень шума и большое количество отходов [3].

Загрязнение воздуха больших городов может пагубно влиять на здоровье человека различными способами. Есть два типа эффектов отрицательного воздействия: краткосрочный и долгосрочный. При краткосрочном – первой страдает дыхательная система человека. Загрязнители, оседая в дыхательных путях, могут стать причиной респираторных заболеваний, вызвать изменения функции легких, а также обострение астмы у лиц, страдающих этой болезнью. Кроме того, содержание в воздухе в высокой концентрации диоксида серы может вызвать раздражение кожи и слизистой глаз.

Куда более тяжелые последствия возникают при продолжительном вдыхании загрязненного воздуха. Основываясь на результатах длительных исследований ученые пришли к выводу о том, что такой воздух может стать причиной самых разных болезней. По данным ВОЗ, причиной 43 % случаев ХОБЛ (хронической обструктивной болезни легких) является загрязненный воздух; рака легких в 29 % всех случаев, так как особое влияние на этот показатель оказывают твердые частицы, которые вместе с вдыхаемыми газами достигают нижних дыхательных путей, вызывая их повреждение; заболеваний сердечно-сосудистой системы (люди, проживающие в регионах с высоким уровнем загрязнения, больше подвержены риску умереть от инсульта или сердечного приступа, о чем свидетельствуют неоднократные научные исследования) [4]. Наличие таких диагнозов приводит к более тяжелой форме течения заболевания коронавирусной инфекцией и увеличению риска летального исхода.

Загрязнение и засорение водоемов является следствием недостаточно очищенных сточных вод различных предприятий. По данным ВОЗ, вода содержит 13 тыс. потенциально токсичных элементов: свинец, ртуть, кадмий, цинк, никель и хром, которые могут вызывать гипертонию, атеросклероз, полиневрит, потерю остроты зрения, поражение костного мозга. Радиоактивные элементы цезий, уран, плутоний, стронций вызывают онкологические заболевания, ослабление иммунитета, генетические изменения. Азот и фосфор – рост в водопроводных коммуникациях и артезианских скважинах сине-зеленых водорослей, плохо поддающихся фильтрации и вырабатывающих токсины, которые, попав в организм человека, ослабляют его иммунитет.

С питьевой водой в организм человека проникают болезнетворные микробы – возбудители многих инфекционных и паразитарных заболеваний (сальмонеллез, вирусный гепатит, холера, брюшной тиф, дизентерия, полиомиелит). Более того, болезнетворные микробы, присутствующие в питьевой воде, загрязненной сточными и канализационными водами, становятся причиной гастроэнтерита, миокардита и кишечных расстройств. Хлор, фтор, бром и их соединения, попав в воду, вызывают гепатиты, нефриты, врожденные аномалии плода, ослабление иммунной системы и онкологические заболевания.

Воздушный транспорт, автотранспорт, промышленные предприятия и рельсовый транспорт являются основными источниками шума в больших городах. Шум, производимый транспортом на проезжей части дорог, распространяется не только на придорожную территорию, но и далеко в зону жилой застройки. Поезда, идущие по железнодорожным путям или около сортировочных станций, существенно повышают уровень шума. Максимальный уровень звукового давления на расстоянии 7,5 м от движущегося товарного состава достигает 92 дБА, от электропоезда – 93 дБА, от пассажирского поезда – 91 дБА. Нарушает акустический режим городов и современный трамвай. Трамвайный шум по интенсивности близок к шуму дизельных автомобилей и автобусов, в нем преобладают средние и высокие частоты. Уровни трамвайного шума во многом зависят от конструкции вагона и состояния путевого хозяйства.

Промышленные предприятия производят значительный шум и нарушение акустического режима в случаях, когда их территория непосредственно примыкает к жилым кварталам мегаполисов. Известно, что при длительном воздействии шума на организм человека происходит уменьшение содержания сахара в крови до нижнего уровня нормы, что вызывает повышение концентрации адреналина в крови и приводит к резкой гипогликемии. Снижает некоторые показатели иммунитета человека и шум в 60 дБА, регистрируемый иногда на городских транспортных магистралях [5]. Снижение показателей иммунитета повышает вероятность заболевания COVID-19.

Электромагнитные поля коротковолнового, ультракоротковолнового и сверхвысокочастотного диапазона, наряду с другими физическими факторами окружающей среды, отрицательно влияющими на здоровье горожан, играют все большую роль. Их основные источники – радиолокаторы, коротковолновые передатчики, телецентры, сверхвысокочастотные и средневолновые передатчики. От такого воздействия страдает нервная система человека.

Урбанизированное пространство современных мегаполисов оказывает довольно сильное влияние на психику и настроение человека. Людей, живущих в городе, постоянно сопровождает стресс (так называемый городской стресс). Длительный стресс приводит к нарушениям функций организма, заболеваниям сердечно-сосудистой системы, желудочно-кишечного тракта. Он может служить патогенетической

основой сердечно-сосудистых, невротических и эндокринных заболеваний. Цветовые решения, плотность застройки, её однотипность, высота зданий могут вызывать у людей как дискомфорт, приводить к стрессу или депрессии, так и наоборот, повышать настроение, работоспособность и уровень самочувствия человека. Безусловно, однородная среда в виде заборов и однотипных зданий снижает концентрацию внимания, уровень зрения, при регулярном воздействии угнетает психику человека. Так, стремительное разрастание городов, увеличение количества новых микрорайонов актуализирует проблему влияния окружающей среды на психоэмоциональное состояние человека [6].

Архитектура и расположение зданий зачастую играют отрицательную роль. Острые углы создают напряжённую атмосферу, прямые линии чужды природе и неестественны, а отсутствие элементов декора и однообразие архитектуры утомляет, понижает эмоциональную удовлетворённость людей внешним видом города. «По результатам опроса, проведенного в Екатеринбурге в 2017 г. среди студентов второго курса направления «Торговое дело» Уральского государственного экономического университета, 97 % респондентов высказали предпочтение зданиям с лепниной или интересными формами в дизайне отделки, и лишь 3 % респондентов сказали, что обычные пяти/девятиэтажные дома с прямыми линиями и отсутствием каких-либо деталей на фасаде нравятся им больше. Это обусловлено тем, что разнообразие форм и пересечение линий характерно для дикой природы и гораздо естественней архитектуры 1960–1970-х годов, поэтому первый вариант приятнее на подсознательном уровне» [6]. Ярким примером положительно влияющего на эмоциональное настроение дизайнера являются здания, построенные в стиле «Био-тек», который сочетает в себе как плавные линии и разнообразие естественных, присущих природе форм, так и практичность с использованием высоких технологий. Такой архитектурный стиль необходимо чаще использовать при застройке современных городов.

В дизайне архитектурного экстерьера серьёзное влияние на психоэмоциональное состояние человека имеют цветовые решения. Серый и темные цвета у большинства людей вызывают уныние, ассоциации с болезнью и усталостью. И наоборот, оранжевый, синий, зеленый и их оттенки чаще всего вызывают положительные эмоции. Более того, цвета действительно способны повышать работоспособность, понижать сонливость (алый, оранжевый), давать чувство удовлетворенности и покоя (синий, зеленый), и наоборот, эмоционально подавлять (серый, черный и тусклые оттенки других цветов). Однако слишком яркие или не сочетающиеся цвета также не оказывают благотворного влияния на психическое состояние человека и способны навредить глазам. Важно учитывать это при дизайне зданий и использовать естественные, не невычурные цвета и их сочетания. Кроме того, зеленые насаждения, клумбы, объекты искусства, скульптуры благотворно влияют на создание комфортной атмосферы для напряженной человеческой психики [7].

Ландшафт оказывает определенное психогенное воздействие на людей. Выделяют две крайние формы в психологическом влиянии окружающей среды на человека: перенасыщенность природной среды, ведущая к психическому переутомлению (многообразием флоры и фауны в тропиках), и, наоборот, «пустая среда», однообразное пространство, где невозможно найти зрительных или иных ориентиров. Эта природная среда вызывает чувство беспричинного беспокойства и страха у многих людей (бескрайность пустыни и т. п.). В таком же ассоциативном ряду находятся гомогенные районы и «агрессивные» поля больших городов: голые стены из бетона и стекла, однообразные переходы и асфальтовые покрытия, глухие заборы, одинаковые элементы (ряды окон в высотных домах), ограниченность обзора. Такой ландшафт ускоряет развитие стрессов и депрессивных состояний, особенно в период пандемии COVID-19 [8].

Многие мегаполисы развивались стихийно, при этом зачастую не учитывались биологические потребности и психологические особенности индивида. Современный большой город с его многочисленными монотонными зданиями, транспортными магистралями и непрерывным шумом подавляет биологическую природу человека, устраняет необходимую физическую нагрузку, угнетает психику. Вышеперечисленные факторы вызывают повышенную раздражительность, немотивированную агрессию, общую вялость у многочисленных жителей больших городов, а также в непривычных условиях пандемии приводят к увеличению случаев суицида [9].

Чаще всего совершают самоубийство именно одинокие люди, находящиеся в депрессивном состоянии, вызванном локдауном, ограничением передвижения, потерей возможности очного общения с близкими и дорогими людьми. Не имеет значения, как, вынужденно или добровольно, переносит человек изоляцию: идеи суицида посещают до 70 % людей, а 15 % – приводят в исполнение задуманное. Именно поэтому суициды – это проблема одиночества и депрессии. Психологические реакции, вызванные COVID-19, связаны с атмосферой эмоциональной напряженности и повышают риск самоубийства у людей с низкой степенью стрессоустойчивости. Серьезным фактором увеличения числа суицидов является физическое насилие, например, издевательства и жестокое обращение со стороны взрослых в детстве. Известно, что печаль, тревога, финансовые стрессы и чувство эмоциональной и физической изоляции могут привести к самоубийству, так как эти чувства человек испытывает во время кризиса и пандемии.

В 2008 г. клинический психолог Дж. Робертсон совместно с BBC (англ. British Broadcasting Corporation) провели эксперимент. Шесть добровольцев в течение 48 ч находились в уединенных камерах без звука. У всех испытуемых первыми симптомами эмоционального неблагополучия стали тревожность, чрезмерная раздражительность, а закончилось все несвязными мыслями и даже разного рода галлюцинациями. Причины этого феномена пока до конца не изучены. Существует теория, объясняющая эту реакцию человека на вынужденную изоляцию тем, что его мозг страдает от нехватки информации, поступающей извне. При этом нервная система продолжает подавать в мозг сигналы, пусть и ложные. Мозг же, в свою очередь, пытается из ложных сигналов создать целостную картину, к которой стремится психика человека. Как следствие, возникают галлюцинации [10].

Также естественны «реакции утраты», по модели американского психолога, психотерапевта Элизабет Кюблер-Росс, в период карантина и тревожного состояния социума. Большинство людей при значительных проблемах переживают одну и ту же палитру чувств, проходят похожие стадии принятия проблемы и предпринимают попытку создания безопасного мира вокруг себя. При наблюдении за людьми, испытывающими сильный стресс (потеря близкого человека, смертельная болезнь), Э. Кюблер-Росс пришла к выводу, что каждый из них проходил одинаковые стадии психологического реагирования на проблему: «шок» – «отрицание» – «паника – гнев» – «торг» – «депрессия» – «повседневность» [1].

Например, первой реакцией людей, узнавших о COVID-19 и возможных смертельных исходах болезни, был шок. Вторая стадия – отрицание, многие люди настаивают на том, что «никакого коронавируса нет!». Поэтому, сегодня в каждой стране существуют люди «ковид-диссиденты» (например, во время «испанки» 1918 г. в США были лиги «антимасочников»), а каждый второй не боится заболеть или убежден, что ему не опасен вирус. В данной ситуации простые и понятные всем рекомендации по профилактике распространения вируса кажутся неубедительными, так как являются обыденными. По этим же причинам многими людьми игнорируются профилактические мероприятия.

На этапе «паника – гнев» психика человека уже по-другому реагирует на происходящие события. Данные интернет-исследований свидетельствуют, что 44 % опрошенных воспринимают болезнь как «угрозу, ставшей вызовом всему человечеству» и «пандемией, с которой необходимо бороться», 39 % отождествляют эпидемию с биологическим оружием, а 32 % считают «спланированным шагом политических и экономических элит отдельных стран». Для этого этапа характерны повышенная тревога при нахождении среди заболевших; страх; острое стрессовое расстройство; бессонница; повышенная утомляемость и плохая концентрация внимания; раздражительность, злость и др. Такие реакции следует рассматривать как проявление защитного механизма, который запускается на бессознательном уровне при трактовке ситуации как возможной угрозы [1].

Работа в условиях повышенного риска, отсутствие социальной поддержки и стигматизация приводят к развитию психических нарушений у людей младшего возраста и женщин, а также у медицинских работников. Основными причинами психологических заболеваний у медицинского персонала являются: длительный рабочий день, высокий риск заражения, нехватка необходимых средств индивидуальной защиты, постоянное одиночество в связи с нахождением в медицинских учреждениях, а также нарастающая усталость и длительная разлука с семьей. Наблюдения показывают, что большинство медицинских работников испытывают более выраженную тревогу, которая сопровождается постоянным переживанием стресса, ухудшением качества и продолжительности сна, а также ухудшением социального взаимодействия и профессионализма.

Медики в период пандемии столкнулись с высокими требованиями к результатам своей деятельности и недостаточной социальной поддержкой со стороны общества. Для многих из них при работе в «красной зоне» психотравмирующими факторами стали: физическое дистанцирование, социальная стигматизация, недостаточная информация о воздействии COVID-19 на людей, страх передачи инфекции своей семье и др.

Для поддержания психического здоровья медработников возникла необходимость проанализировать источники возможных беспокойств и страхов. Одним из таких исследований был опрос Stanford University (Калифорния) и Icahn School of Medicine (Нью Йорк) среди 69 практикующих врачей, ординаторов, медсестер и интернов, участвующих в лечении больных COVID-19. Согласно результатам этого исследования, основными источниками тревоги являются:

- недоступность в полном объеме необходимых средств индивидуальной защиты;
- страх принести инфекцию домой и заразить членов семьи;
- отсутствие доступа к экспресс-тестированию на COVID-19 при появлении симптомов и беспокойство о высокой вероятности распространения инфекции на рабочем месте;
- неуверенность в том, что руководство лечебного учреждения позаботится о их семьях в случае, если они будут инфицированы;
- организация ухода за детьми во время карантина при увеличении продолжительности рабочего дня;
- поддержка других личных и семейных потребностей по мере необходимости увеличения рабочего времени (питание, проживание, транспорт);

– сомнения в собственной профессиональной компетенции при переводе в COVID-отделения и отделения интенсивной терапии из обычных;

– доступ к необходимой информации и возможности обмена информацией.

Таким образом, в условиях предельной нагрузки, выходящей за границы имеющихся клинических знаний, навыков и умений, медперсонал нуждается в разнообразной психологической поддержке и помощи [11].

В период борьбы с пандемией COVID-19 участились случаи профессионального выгорания у представителей медицинского сообщества. Профессиональное выгорание – синдром, развивающийся в условиях постоянного стресса и ведущий к истощению личностных и эмоционально-энергических ресурсов работника. Помимо стресса, фактором возникновения синдрома профессионального выгорания является накопление внутренних негативных эмоций без возможности «выплеска» или «освобождения» от них.

Немецкие специалисты-медики отмечают роль сильных негативных эмоций в росте уровня дистресса у медицинских работников. Ими было выявлено влияние тревоги, вины и одиночества на негативную оценку собственного здоровья и профессиональной успешности. Все это способствовало деморализации и уверенности в неизбежности инфицирования коронавирусом. В качестве факторов-протекторов психологического благополучия, согласно проведенному исследованию, выступают:

– 64,3 % – поддержка дома;

– 45,3 % – время и возможность для отдыха вне стен больницы;

– 22,6 % – поддержка на работе, в первую очередь со стороны коллег, пациентов и профессиональное признание;

– 13,1 % – личностные особенности, например, оптимизм, юмор, психологическая гибкость, опыт [12].

Работа медиков в сложных условиях, с огромным количеством больных и умерших по всему миру, неизбежно сказывается на эмоциональном здоровье. Пандемия COVID-19 «научила» многих людей взаимодействовать с новыми условиями работы и заставила пересмотреть свою дальнейшую повседневную жизнь. Умение контролировать себя и ситуацию, поддерживать свое душевное состояние на положительном уровне – один из важнейших факторов профилактики профессионального выгорания.

Долгосрочные психологические последствия пандемии пока еще неясны, хотя уже можно предположить рост депрессии, стрессовых расстройств и аддиктивного поведения в ближайшем будущем. Поддаваясь панике из-за негативных новостей, переживая неуверенность в себе и будущем, испытывая эмоциональное опустошение, человек доводит иммунитет до истощения, подталкивает себя к обострению хронических болезней и провоцирует возникновение других соматических проблем.

Вышеперечисленные психоэмоциональные аспекты влияния пандемии COVID-19 на качество жизни людей в большом городе не отражают полностью специфику психосоциальной ситуации пандемии. Многомерность стрессовых воздействий на жителя мегаполиса, которые соединила в себе пандемия коронавируса, очевидно, еще будет предметом многочисленных научных исследований. Однако уже можно предположить, что на смену проблемам и задачам, характеризующие всплеск распространенности реактивных психоэмоциональных расстройств, а также неинфекционных заболеваний, прежде всего сердечно-сосудистой системы, связь которых со стрессом неоднократно подтверждена.

Во многих развитых странах проблема отрицательного воздействия урбанизированной среды на психоэмоциональное состояние человека становится особенно актуальна для жителей мегаполисов в период пандемии. Некоторые страны пытаются решить ее путем создания «зеленых зон». Зеленая зона – это естественно природная полоса, довольно плотно облегающая город или городской район, где планировка должна быть постоянной или, по крайней мере, ее очень трудно изменить. К примеру, в Республике Южная Корея зеленые зоны разработаны как буферы для защиты открытого пространства, дикой природы, экосистем и для более компактного развития городов и районов городов. К ним относятся области (районы), в которых существует необходимость ограничить урбанизацию, предотвратить хаотическое разрастание городов или подключение городских районов к соседним городам, а также, области, которые необходимо сдерживать в разрастании, чтобы сохранить природную среду и экосистему вокруг города и обеспечить здоровую окружающую среду для граждан [13].

Бесспорно, человек и окружающая среда – это единое целое, но урбанизация неоднозначно действует на человеческое общество: с одной стороны, мегаполисы дают человеку ряд общественно-экономических, социально-бытовых и культурных преимуществ, что положительно сказывается на его интеллектуальном развитии и дает возможность для лучшей реализации профессиональных и творческих способностей. С другой стороны, человек попадает в среду с вредными воздействиями, с большим риском заболевания COVID-19, отдален от природы, получая загрязненный воздух, шум и вибрации, зависимость от транспорта. Все эти факторы отрицательно сказываются на физическом и психическом здоровье индивида в условиях пандемии COVID-19, снижают резистентность организма, приводят к более раннему возникновению тех заболеваний, к которым предрасположен тот или иной человек, и ухудшают течение уже имеющихся.

Библиографические ссылки

1. Акименко ГВ, Кирина ЮЮ, Начева ЛВ. Психология эпидемии: как пандемия (COVID-19) влияет на психику людей. *Вестник общественных и гуманитарных наук*. 2020;1(4):45–54.
2. Лучина ВН, Сивуха ВВ. Некоторые социально-психологические аспекты влияния пандемии COVID-19 на качество жизни людей. В: *Сахаровские чтения 2021: экологические проблемы XXI века. Часть 1*. с. 24–28. DOI: 10.46646/SAKH-2021-1-24-28.
3. Лучина ВН, Сивуха ВВ. Влияние фактора урбанизации на психофизиологическое состояние здоровья жителей современных мегаполисов. В: *Сахаровские чтения 2021: экологические проблемы XXI века. Часть 1*. с. 21–24. DOI: 10.46646/SAKH-2021-1-21-24.
4. Сивуха ВВ, Родькин АС. Загрязнение атмосферного воздуха в Республике Беларусь и возможные последствия для здоровья человека. *Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология – 2021)*. Москва: [б. и.]; выпуск 1. с. 298–305.
5. Ивженко ТВ. Железнодорожный транспорт как источник акустического загрязнения населенных мест. *Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности*. 2018;5:117–119.
6. Конкурентоспособность территорий. В: *Материалы XX Всероссийского Экономического Форума молодых ученых и студентов, Екатеринбург, 27–28 апреля 2017 г.* Екатеринбург: УГЭУ; 2017. 254 с.
7. Сукиасяна АА, редактор. *Тенденции и перспективы развития науки XXI века*. Екатеринбург: Омега Сайнс; 2015. 263 с.
8. Маркелов ВИ. Психическое здоровье и окружающая среда. *Сервис в России и за рубежом*. 2011;4:207–213.
9. Мошкарлова ИВ, Бегунова ОЮ. Влияние природных факторов и катаклизмов на увеличение роста самоубийств. В: *Молодая наука – 2013. Материалы IV Открытой международной молодежной научно-практической конференции*. Москва: [б. и.]; 2013. с. 167–170.
10. Робертсон Дж, Робертсон С, Хрущка П. *Балдеющие от адреналина и зомбированные шаблонами. Паттерны поведения пректных команд*. Санкт-Петербург: Символ-Плюс; 2010. 288 с.
11. Верна ВВ, Иззетдинова АА. Профилактика профессионального выгорания медицинских работников в период распространения пандемии коронавирусной инфекции COVID-19. *Азимут научных исследований: экономика и управление*. 2020;9(4):91–94
12. Zerbini G, Ebigbo A, Reicherts P. Psychosocial burden of healthcare professionals in times of COVID-19 – a survey conducted at the University Hospital Augsburg [Internet, cited 2021 October 15]. Available from: <https://doi.org/10.3205/000281>.
13. Maskevich SA, editor. Actual environmental problems. Proceedings of the VII International Scientific Conference of young scientists, graduates, master and PhD, Minsk, 2017 November 23–24. Minsk: ISEI BSU; 2017. 221 p.

References

1. Akimenko GV, Kirina YuYu, Nacheva LV. *Psikhologiya epidemii: kak pandemiya (COVID-19) vliyaet na psikhiku lyudei* [Psychology of the epidemic: how the pandemic (COVID-19) affects the psyche of people]. *Vestnik obshchestvennykh i gumanitarnykh nauk*. 2020;1(4):45–54. Russian.
2. Luchina VN, Sivukha VV. *Nekotorye sotsial'no-psikhologicheskie aspekty vliyaniya pandemii COVID-19 na kachestvo zhizni lyudei* [Some socio-psychological aspects of the impact of the COVID-19 pandemic on the quality of life of people]. In: *Sakharovskie chteniya 2021: ekologicheskie problemy XXI veka. Part 1*. p. 24–28. DOI: 10.46646/SAKH-2021-1-24-28. Russian.
3. Luchina VN, Sivukha VV. *Vliyanie faktora urbanizatsii na psikhofiziologicheskoe sostoyanie zdorov'ya zhitelei sovremennykh megapolisov* [Influence of the urbanization factor on the psychophysiological state of health of the inhabitants of modern megacities]. In: *Sakharovskie chteniya 2021: ekologicheskie problemy XXI veka. Part 1*. p. 21–24. DOI: 10.46646/SAKH-2021-1-21-24. Russian.
4. Sivukha VV, Rod'kin AS. *Zagryaznenie atmosfernogo vozdukh v Respublike Belarus' i vozmozhnye posledstviya dlya zdorov'ya cheloveka* [Air pollution in the Republic of Belarus and possible consequences for human health]. *Nauka, obrazovanie, proizvodstvo v reshenii ekologicheskikh problem (Ekologiya – 2021)*. Moscow: [publisher unknown]; volume 1. p. 298–306. Russian.
5. Ivzhenko TV. *Zheleznodorozhnyi transport kak istochnik akusticheskogo zagryazneniya naseleennykh mest* [Railway transport as a source of acoustic pollution of populated areas]. *Aktual'nye problemy stroitel'stva, ZhKKh i tekhnosfernoi bezopasnosti*. 2018;5:117–119. Russian.
6. *Konkurentosposobnost' territorii* [Competitiveness of territories]. In: *Materialy XX Vserossiyskogo Ekonomicheskogo Forumu molodykh uchennykh i studentov, Ekaterinburg, 27–28 aprelya 2017 g.* . Ekaterinburg: UGEU; 2017. 254 p. Russian.
7. Sukiasyana AA. *Tendentsii i perspektivy razvitiya nauki XXI veka* [Trends and prospects for the development of science in the XXI century]. Ekaterinburg: Omega Sains; 2015. 263 p. Russian.
8. Markelov VI. *Psikhicheskoe zdorov'e i okruzhayushchaya sreda* [Mental health and environment]. *Servis v Rossii i za rubezhom*. 2011;4:207–213. Russian.
9. Moshkarova IV, Begunova OYu. *Vliyanie prirodnnykh faktorov i kataklizmov na uvelichenie rosta samoubiistv* [The influence of natural factors and cataclysms on the increase in the growth of suicides]. In: *Molodaya nauka – 2013. Materialy IV Otkrytoi mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow: [publisher unknown]; 2013. p. 167–170. Russian.
10. Robertson Dzh, Robertson S, Khrushchka P. *Baldeyushchie ot adrenalina i zombirovannyye shablonami. Patterny povedeniya prektnykh komand* [Adrenaline addicted and zombified by templates. Behavior patterns of project teams]. Saint Petersburg: Simvol-Plyus; 2010. 288 p. Russian.
11. Verna VV, Izzetdinova AA. *Profilaktika professional'nogo vygoraniya meditsinskikh rabotnikov v period rasprostraneniya pandemii koronavirusnoi infektsii COVID-19* [Prevention of professional burnout of medical workers during the spread of the pandemic coronavirus infection COVID-19]. *Azimut nauchnykh issledovaniy: ekonomika i upravlenie*. 2020;9(4):91–94. Russian.
12. Zerbini G, Ebigbo A, Reicherts P. Psychosocial burden of healthcare professionals in times of COVID-19 – a survey conducted at the University Hospital Augsburg [Internet; cited 2021 October 15]. Available from: <https://doi.org/10.3205/000281>.
13. Maskevich SA, editor. Actual environmental problems: proceedings of the VII International Scientific Conference of young scientists, graduates, master and PhD, Minsk, 2017 November 23–24. Minsk: ISEI BSU; 2017. 221 p.

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 639.517:591.526

ОПЫТ НЕПРЕРЫВНОГО ПОДРАЩИВАНИЯ СЕГОЛЕТКОВ ШИРОКОПАЛОГО РАКА *ASTACUS ASTACUS* ДЛЯ ПОТРЕБНОСТЕЙ АКВАКУЛЬТУРЫ

А. П. ГОЛУБЕВ¹⁾, А. В. АЛЕХНОВИЧ²⁾, О. А. БОДИЛОВСКАЯ¹⁾, Е. А. УЛАЩИК¹⁾, АНИЛКУМАР ГОПИНАТХАН³⁾

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

²⁾Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам,
ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Беларусь

³⁾Веллорский технологический институт,
632014, г. Веллору, штат Тамилнаду, Индия

Образец цитирования:

Голубев АП, Алехнович АВ, Бодилловская ОА, Улащик ЕА, Гопинатхан А. Опыт непрерывного подращивания сеголетков широкопалого рака *Astacus astacus* для потребностей аквакультуры. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;2:12–25 (на англ.).
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-12-25>

For citation:

Golubev AP, Alekhovich AV, Bodilovskaya OA, Ulashchik EA, Gopinathan A. The experience of perennial growing up of fingerlings of noble crayfish *Astacus astacus* for aquaculture needs. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;2:12–25.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-12-25>

Авторы:

Александр Петрович Голубев – доктор биологических наук, доцент; профессор кафедры экологического мониторинга и менеджмента.

Анатолий Васильевич Алехнович – кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории гидробиологии.

Ольга Александровна Бодилловская – кандидат биологических наук; доцент кафедры общей биологии и генетики.

Екатерина Александровна Улащик – аспирантка.

Анилкумар Гопинатхан – кандидат биологических наук, профессор.

Authors:

Alexander P. Golubev, doctor of science (biology), docent; professor at the department of environmental monitoring and management.

algiv@rambler.ru

Anatoly V. Alekhovich, PhD (biology), leading researcher of hydrobiology laboratory.

alekhovichav@gmail.com

Olga A. Bodilovskaya, PhD (biology), associate professor at the department of general biology and genetics.

_olga_iseu@tut.by

Ekaterina A. Ulashchik, graduate student.

ulasikekaterina@gmail.com

Anilkumar Gopinathan, PhD (biology), professor.
dganilkumar@vit.ac.in

Разработан метод ускоренного искусственного выращивания в аквакультуре сеголетков *Astacus astacus* в климатических условиях Беларуси. Первоначально новорожденных личинок *A. astacus* выращивали с начала июля до начала октября (летний период) в открытых лотках при температуре 12–25 °С. В последующий зимний период (начало октября – начало апреля) подросшие особи выращивались в аквариумах в отапливаемом помещении при температуре 18–20 °С.

Средняя масса особей в конце летнего периода снижалась от 392 до 265 мг с увеличением конечной плотности посадки от 6 до 54 особей·м⁻². Средняя масса особей в конце зимнего периода закономерно изменялась от 688 до 939 мг в градиенте конечной плотности посадки 58–122 особей·м⁻². Эти показатели близки к аналогичным данным для молоди в естественных водоемах в конце первого и второго лета жизни.

Уравнение зависимости между средней плотностью посадки (N , экз·м⁻²) за весь период выращивания и средней массой (W , мг) для особей в возрасте 3,5–4 мес., рассчитанное по результатам настоящего исследования и данным других авторов, имеет вид: $W = 424 - 103 \cdot \lg N$. Аналогичное уравнение для особей в возрасте 9–10 мес. в конце зимнего выращивания имеет вид: $W = 1376 - 278 \cdot \lg N$. Эти уравнения представляют собой альтернативные стратегии аквакультуры, позволяющие производить больше молоди с меньшей массой тела или меньшее количество более крупных особей.

В целом интродукция 9-месячных *A. astacus* в пруды позволяет получать в Беларуси экземпляры товарной массы (~10 г) в возрасте двух лет, или на один-два года раньше, чем в естественных водоемах. Максимальную начальную плотность (N_0) выращивания в аквакультуре новорожденных личинок *A. astacus* и особей в возрасте 3–4 мес. можно рассчитать по уравнению: $N_0 = \frac{N_{lim}}{\sqrt{S}}$, где N_{lim} – плотность особей в конце периода выращивания, рассчитанная по приведенным выше уравнениям, при которой их масса будет соответствовать таковой для особей в естественных водоемах в конце их первого или второго лета жизни; S – выживаемость особей в аквакультуре, выраженная в долях единицы. Согласно этому уравнению, N_0 для первой и второй возрастных групп составляет 423 экз·м⁻² и 33 экз·м⁻² соответственно.

Ключевые слова: *Astacus astacus*; высшие ракообразные; аквакультура; молодь раков; коммерческое рыболовство; плотность посадки.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках двух международных научных проектов: Белорусско-Индийский проект «Эколого-биохимические подходы в регуляции роста и размножения у жаброногих и десятиногих раков в аспекте их потенциального использования в аквакультуре» (2015–2016 гг.) (DST/INT/BLR/P-6/2014 от 15 апреля 2015 г.), выполненный Международным государственным экологическим институтом им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета (Минск, Беларусь) и Школой биологических наук и технологий Университета ВИТ (Веллур, Индия). Проект финансировался Государственным комитетом по науке и технологиям Республики Беларусь и Департаментом науки и технологий правительства Индии. Белорусско-российский молодежный проект «Разработка подходов к созданию лабораторных культур эндемичных амфипод озера Байкал, аборигенных и инвазивных видов амфипод и десятиногих раков Беларуси» (Б19РМ-097: 2019–2021), выполненный Международным государственным экологическим институтом им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета (Минск, Беларусь) и Иркутским государственным университетом (Иркутск, Россия). Проект финансировался Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований и Российским фондом фундаментальных исследований.

THE EXPERIENCE OF PERENNIAL GROWING UP OF FINGERLINGS OF NOBLE CRAYFISH *ASTACUS ASTACUS* FOR AQUACULTURE NEEDS

A. P. GOLUBEV^a, A. V. ALEKHNOVICH^b, O. A. BODILOVSKAYA^a, E. A. ULASHCHYK^a, ANILKUMAR GOPINATHAN^c

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

^bScientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources,
27 Akademičnaja Street, Minsk 220072, Belarus

^cVellore Institute of Technology,
Vellore 632014, Tamil Nadu, India
Corresponding author: A. P. Golubev (algiv@rambler.ru)

The method of accelerated artificial rearing in aquaculture of *Astacus astacus* fingerlings in climatic conditions of Belarus has been elaborated. Initially, newborn *A. astacus* larvae were reared from early July to early October (*summer period*) in open-air trays at temperatures 12–25 °С. In successive *winter period* (early October – early April) grown up individuals were reared in aquaria in a heated room at temperatures 18–20 °С. The average weight of specimen at the end of summer period decreased from 392 to 265 mg with the increase of final stocking density from 6 to 54 ind·m⁻². The average

weight of individuals at the end of winter rearing changed irregularly from 688 mg to 939 mg within the final density gradient 58–122 ind. \cdot m⁻². It is close to similar data for juveniles in natural reservoirs at the end of the first and second summer of their life.

The equation between geometric mean (N , ind. \cdot m⁻²) of density on the whole period of rearing and average body weight (W , mg) for individuals aged 3.5–4 months calculated from the results of present investigations and the relevant literature data as follows: $W = 424 - 103 \cdot \lg N$. A similar equation for individuals aged 9–10 months after winter rearing is follows: $W = 1376 - 278 \cdot \lg N$. These equations provide an alternative in aquaculture strategy to produce more juveniles with lower body weight or fewer larger ones.

Generally, the introduction of 9-month-old *A. astacus* into ponds makes it possible to obtain specimens of marketable weight (~10 g) in Belarus at the age of two years, or one-two years earlier than those in natural reservoirs.

The maximal initial density (N_0) of rearing in aquaculture of newborn larvae *A. astacus* and specimen at the age 3–4 months can be calculated according to the equation: $N_0 = \frac{N_{lim}}{\sqrt{S}}$, where N_{lim} is the density of individuals at the end of period of rearing calculated from the above equations at which their weight will correspond to those for individuals in natural reservoirs at the end of their first or second summer of their life; S – survival of individuals in aquaculture expressed in fraction of unity. According to this equation, N_0 for the first and second age groups are 423 and 33 ind. \cdot m⁻² respectively.

Keywords: *Astacus astacus*; noble crayfish; aquaculture; crayfish juveniles; commercial fishery; planting density.

Acknowledgements. These studies were performed in the framework two International Scientific Projects: Belarusian-Indian Project «Ecological and biochemical aspects of the regulation of growth and reproduction in decapod crustaceans and anostracans for the revelation of their potentials in an aquaculture» (2015–2016) (DST/INT/BLR/P-6/2014 dated 15 April 2015) carried out by the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University (Minsk, Belarus) and the School of Biosciences and Technology, VIT University (Vellore, India). The project was funded by the State Committee on Science and Technologies of the Republic of Belarus and the Department of Science and Technology, Government of India. Belarusian-Russian Project «Development of approaches to the maintaining of laboratory cultures of endemic amphipods of Lake Baikal, indigenous and invasive species of amphipods and decapod crayfish in Belarus» (B19RM-097: 2019–2021) carried out by the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University (Minsk, Belarus) and the Irkutsk State University (Irkutsk, Russia). The project was funded by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research and Russian Foundation for Fundamental Research.

Introduction

Noble crayfish *Astacus astacus* Linnaeus, 1758 is one of the most important commercial species of aquatic invertebrates in Europe, where it has been used as a fishery source for over 2000 years [1; 2]. Belarus was reported to be exceptionally rich in *A. astacus* until the mid-20th century. During the 1930–1950's, its annual catch in Belarus reached as high as 40 tons, a significant part of which was exported to Western Europe [3]. However, in the second half of the 20th century, the *A. astacus* population in Belarus began to decline rapidly, and its fishing came almost to a halt, due to economic unitability.

Reasons for the decline in the *Astacus* population in Belarus have been numerous, such as the uncontrolled fishing, large-scale hydromeliorative measures, and anthropogenic pollution of water bodies. Another significant reason has been the gradual replacement of *A. astacus* by a more aggressive and competitive species – the narrow-clawed crayfish *Astacus leptodactylus*, that penetrated into Belarus at the beginning of the 20th century from the reservoirs of the Northern Black Sea region [4]. A similar situation is reported to exist in other European countries as well, where *A. leptodactylus* has been widespread almost everywhere, although its abundance varies from region to region. Whereas *A. astacus* is a rare and even endangered species in most European countries, it still remains as a commercial species in Scandinavian and the Baltic states, although its catch is strictly regulated. In general, the *A. astacus* population in Western Europe decreased to the tune of 50–70 % during the past 20–35 years [2; 5].

Significantly, the market value of *A. astacus* from Western Europe is over 5 times higher than those of other crayfish species, such as the native *A. leptodactylus*, and the invasive *Pacifastacus leniusculus* and *Orconectes limosus* [6]. Nevertheless, the demand for *A. astacus* products remains stable and high. In this situation, the only way to meet the demand for *A. astacus* products is to promote its aquaculture, which is being attempted in a number of European countries [2].

In Swedish ponds, the productivity of sexually mature individuals reaches 60–430 kg \cdot ha⁻¹, whereas in Germany, it scales up to even 600 kg \cdot ha⁻¹ [7]. Previous investigations have revealed that the high productivity of *A. astacus* seen in some European countries is entrained by several favorable climatic factors [8]. In the prevailing climatic conditions of France and southern Germany (Bavaria), for instance, the year-olds attain sexual maturity and commodity size by the end of the third summer of their life, i.e., at the age of 3 years [8; 9].

This is contrary to what is existing in Belarus, wherein the growth of *A. astacus* in natural water bodies is possible only during a short span of time of the year when the ambient temperature exceeds 10 °C [10; 11]. In the natural reservoirs of Belarus and adjacent territories (Baltic states, Poland, southern Scandinavia for example), the conducive temperature does not last for more than 5–5.5 months in a year – i. e., from April end/early May to early October; for the yearlings born in the natural reservoirs of Belarus during late June - early July, the first season of vegetation will be even shorter, spanning only up to 3–3.5 months.

Compared with the situations in France, where the vegetation season in the natural reservoirs lasts for at least 6 months – from mid-April to mid-October, while the same is restricted to 3–3.5 months in Belarus. Resultantly, the Belarus population of *Astacus* reaches sexual maturity and commodity size only in the fifth season of vegetation, i. e. a year later than that in France [8], obviously, leading to increased financial expenditure.

Further, even under intensive pond cultivation, the young crayfishes show a perceptibly high mortality rate, due to various factors such as cannibalism, predators permeated in ponds diseases, and other extrinsic factors. Keeping these factors in view, we propose to develop ways to optimize aquaculture of the Belarus population of *A. astacus*, taking into account, the natural and climatic realities.

One of the potential strategies to offset the «unfavourable» environmental factors could be to grow the newborn larvae of *A. astacus* in open-air fishponds during summer up to the age of 3–3.5 months. The adolescent juveniles could subsequently be grown in autumn and winter for 5 to 6 months in an enclosed room under regulated temperature (18–20 °C), which could avoid slackened growth of juveniles during the prolonged autumn-winter period (~6 months). Growing the juveniles under controlled conditions could also significantly reduce mortality and, thus, could save the number of egg-bearing females used for producing planting material.

Stocking density has been identified as one of the most important parameters in intensive aquaculture inasmuch as it may greatly influence growth and productivity of the candidate species of aquaculture.

Earlier, we showed that the specific growth rate of *Astacus leptodactylus* before the age of 3 to 3.5 months decreases linearly with increasing planting density [12]. In the present paper, the results of our laboratory experiments have been processed through computational means, so as to bring out a mathematical expression that could be used as a tool for assessing the initial stocking density for the desired output.

Further, it is a matter of concern that since 1984, *A. astacus* has been included in the Red Data Book of Belarus, where it is currently classified as Category III («Vulnerable» species, but not directly under the threat of extinction). Hence optimization of *A. astacus* aquaculture, as described in the paper, is also aimed at the improvement of the stock from conservational perspectives.

Materials and methods

Summer rearing up of newborn larvae of *A. astacus* was carried out in 2015 in a private enterprise located in the village Korovchino (54°02'54" N; 30°49'22" E, Dribin district, Mogilev Province, Belarus) on the shore of a small artificial reservoir. Here, an experimental base was created of four rectangular plastic trays (4.3×0.74×0.37 m), with a bottom area of 3.18 m². The trays were filled with water from the reservoir using an electric pump, so as to maintain an excellent flow-through system.

At the bottom of the trays was placed a layer of clay (3–5 cm thick), wherein the year-olds could build burrows. In addition, short (10–14 cm in length) plastic tubes of 5 cm diameter were placed on the bottom of the trays as shelters for egg-bearing females and subsequently for housing their larvae. To prevent the crayfish from exposure to direct sunlight, a wooden canopy was constructed, covered with branches of trees, and the trays themselves were covered with slate sheets for about 2/3 of their length.

During April 24–28, 2015, 30 egg-bearing females of *A. astacus* with embryos at the final stage of development (ocellus stage) were sampled from one of the water bodies in the Dribin district. Two to three hours after the capture, the females were planted in one of the trays to complete the incubation of eggs. Between 21 and 30 June 2015, there was a massive outbreak of larvae (Stage I) from the eggs, which still remained attached to the pleopods of the mother crayfish. These larvae were relying on the yolk materials as alimentary resources, and hence did not need any feeding from an external source. After 5–8 days, the larvae were molted and transformed to Stage II. At this stage, except for the telson structure, the larvae looked quite comparable with the adult individuals. The Stage II larvae, although switched over to external nutrition, remained attached to the females.

On July 4, 2015, the larvae were removed from the females very carefully through a shaking process within the water tank. The females, soon after the removal of the larvae, were returned to the natural water body.

The larvae (Stage II) were then placed in four trays as described below:

- I. 50 individuals per tray, with initial density of planting – 15.7 ind.·m⁻².
- II. 100 individuals per tray, with initial density of planting – 31.4 ind.·m⁻².

III. 450 individuals per tray, with initial density of planting – 141.5 ind. \cdot m⁻².

IV. 500 individuals per tray, with initial density of planting – 157.2 ind. \cdot m⁻².

During the experimental period, the larvae in the trays were regularly fed *ad libitum* on concentrated zooplankton from the nearby reservoir, as well as on finely chopped boiled carrots and potatoes. Further, a periphyton community of filamentous algae, formed on the walls of the trays by mid-July, was also well consumed by the larvae. Interestingly, the filamentous algae were also functioning as a biological filter, which helped maintain water quality. The temperature during the growing period in the trays varied between from 20–25 °C in July – August and 12–15 °C in late September – early October 2015.

During the experimental period, samples of 15 specimens were chosen at random from each tray every fortnight to determine the size and body weight. Measurements of size were carried out using a caliper through standard procedure – beginning from the tip of the rostrum up to the end of the telson to the nearest 1 mm. Weighing was carried out on electronic balance ALS-220 (KERN, Germany) to the nearest 0.1 mg. After the measurements, the individuals were returned to the trays. At the end of the experimental period (October 5, 2015), the surviving specimens in each tray were counted and the size- body weight measurements of 15–20 crayfish specimens from each tray were made as described previously.

Winter cultivation. At the end of the summer rearing, 44 specimens were chosen at random for further experimentation. The next day (6 October 2015), these specimens were taken to the laboratory premises of the International Sakharov Environmental Institute (Minsk). On the same day, these individuals were randomly placed in laboratory containers maintained as another four variants, as shown below:

V. 5 individuals in an aquarium with an area of 690 cm²; initial density of planting – 72.5 ind. \cdot m⁻².

VI. 10 individuals in an aquarium with an area of 690 cm², the initial density of planting is 145 ind. \cdot m⁻².

VII. 19 individuals in an aquarium measuring 900 cm²; initial density of planting of 211 ind. \cdot m⁻².

VIII. 10 individuals singly in cylindrical vessels with a diameter of 8.0 cm and a bottom area of 50 cm²; planting density of 200 ind. \cdot m⁻².

All the vessels and the aquaria were filled with standing tap water to the height of 6–7 cm. Fragments of plastic tubes, 5–7 cm in length, and 2 cm in internal diameter were used as shelters for crayfishes. Their number corresponded to the number of crayfishes contained in vessels and aquaria. The individuals were fed *ad libitum* on live larvae of *Chironomus sp.* and *Daphnia sp.*; the uneaten remains of the feed were removed by changing the water, 2–3 times a week in the vessels, and twice in tanks in the aquaria.

The duration of winter cultivation was a few more than 6 months, from October 6, 2015 to April 9, 2016. The water temperature in the vessels and aquaria during this period varied within 18–21 °C, close to the optimum temperature for *A. astacus* [13]. At the beginning and soon after the termination of the experiment, the length (L) – body weight (W) measurements of all the individuals were made by the methods described earlier. Measurements were also taken before and after molting (as applicable). The mean of size – body weight measurements and standard deviation (σ) for these indices were determined. The reliability of the differences in mean values was estimated from the nonparametric Mann – Whitney criterion. For winter growth, data were collected from the juveniles (aged from 3.5–4.5 to 10–11 months) grown under laboratory conditions at temperature close to 20 °C, grown in aquaria and individual vessels. In all the experiments, *A. astacus* juveniles were provided with optimal conditions for its maintenance and feeding.

Statistical analysis

The present study involved statistical analysis such as the conduct of «t» test, calculation of regression equations and Spearman correlation coefficients (r) for them. In all these instances, the calculations were performed using the software package *Statistica 8.0*.

Results

The body length of Stage II larvae separated from females (as described above) and placed in trays at the age of 8–12 days varied within 8–10 mm (mean length, 8.53 mm), and body weight within 28–43 mg (mean weight, 36.9 mg). After the second molt, at the age of 15–20 days, the larvae completed their metamorphosis and individuals were outwardly quite identical with the sexually mature individuals. From this time onwards, until the end of their growing season in trays they were referred to as «fingerlings». The average weight of fingerlings in different trays after the end of summer cultivation varied between 268.7 and 391.9 mg (table 1; fig. 1, variants I–IV).

Among fingerlings grown at low densities (variants I and II), the mean body weight at 3–4 months old was significantly higher ($p < 0.05$) than in individuals grown at higher densities (variants III and IV) (table 1, fig. 1). Differences between the average weight of the fingerlings in variants I and II, as well as in III and IV, were statistically insignificant ($p > 0.1$). The survival rate of fingerlings in all rearing variants varied between 28–38 %. This is significantly higher than similar indicators in natural water bodies – usually not more than 3–5 %.

Table 1

The growth and survival of *Astacus astacus* fingerlings in summer-autumn period at rearing in experimental conditions from larvae II stage till the age of 3–4 months

Conditions of rearing	Terms of rearing	Duration of rearing, days	Initial density (N ₀), ind·m ⁻²	Average initial body weight (W ₀), mg	Final density (N _d), ind·m ⁻²	Average final body length, mm	Average final body weight (W _d), mg	Survival, %	Author
Group rearing									
Open-air fishing trays, area 3.18 m ² ; average ≈19 °C	04.07.2015 – 06.10.2015	90; I**	15.7	21.0	5.9	24.2	391.6	38.0	Present study
		90; II**	31.4	21.0	9.1	23.1	327.9	29.0	
		90; III**	141.5	21.0	51.5	21.5	265.4	36.4	
		90; IV**	157.2	21.0	54.1	22.2	268.7	34.4	
Two glass aquaria total area 0.31 m ² , indoor; 18.0 °C	27.06.1966–31.10.1966	126	1468.0	20.0	297.4	19.0***	182.2	25.5	[14]
Concrete basin area 3.9 m ² , indoor; 19.1 °C	29.06.1966–23.10.1966	116	256.0	22.7	166.0	20.0	212.0	64.9	
Wooden cages, installed on the bottom of lake littoral zone; area 1.9 m ² ; 18.5–19.7 °C	Summer 1966	95	22.4	21.6	9.0	24.1	348.1	40.2	[15]
	Summer 1967	87	30.3	21.6	16.0	21.9	258.6	52.8	
	Summer 1968	90	≈ 100	21.6	49.0	19.4	170.7	≈49.0	
Aquaria, area 0.06 m ² , indoor: 20.6 °C	May – October	112	666	44.4	300.0	21.0	229.9	83.7	[16]
Aquaria, area 0.16 m ² , indoor, 8–16 °C	August – October	90	187.5	38.0	143.1	13.9***	76.3	76.3	[17]
Trough, area 0.16 m ² , indoor; 20.5 °C	10 May – 7 September	120	400	59.0	76.4	21.3	305.0	19.1	[18]
Tank, area 1.6 m ² , indoor; ≈20.0 °C.	September – November	91	270.0	21.0	140.4	17.9***	153.3	52.0	[11]
Plastic basin, area 4 m ² , indoor	Summer	100	100		58.5	15.3***	100.0	58.5	[19]
		100	300		150.9	14.4***	84.0	50.3	
Open-air pond with natural food, area 15 m ²	Summer	100	100		67.5	20.2***	221.0	67.5	[19]
		100	300		97.2	18.3***	166.0	32.4	
Aquaria, area from 0.06 to 0.12 m ² , indoor; 3.5–21.5 °C (average – 13.4 °C)	15.07.1985 – 15.11.1985	125	250	63.7	16.8–100.0	19.3–22.3***	190.0–290.0	6.7–40.0	[20]
		125	500	63.7	33.5–83.0	17.7–20.2***	150.0–220.0	6.7–16.6	
		125	1000	63.7	50.0–150.0	16.3–18.8***	120.0–180.0	3.3–15.0	
Individual rearing									
Holding cells area 0.0024 m, indoor, 20.5 °C	Summer 2004	90	416.6	21.3	416.6	19.9	188.8	44.4	[21]
Compartments, area 0.00275 m ² , indoor, ≈20.0 °C	Mid July – Mid October	78	363.6	29.0	363.6	18.2***	170.0	66.6	[22]
		83	363.6	34.0	363.6	20.1***	220.0	79.2	
		82	363.6	38.0	363.6	19.9***	210.0	58.3	

Note. *age of specimen at the end of experiments; **I–IV – variants of experiments, given in the section «Material and Methods»; ***recalculated by equation (1).

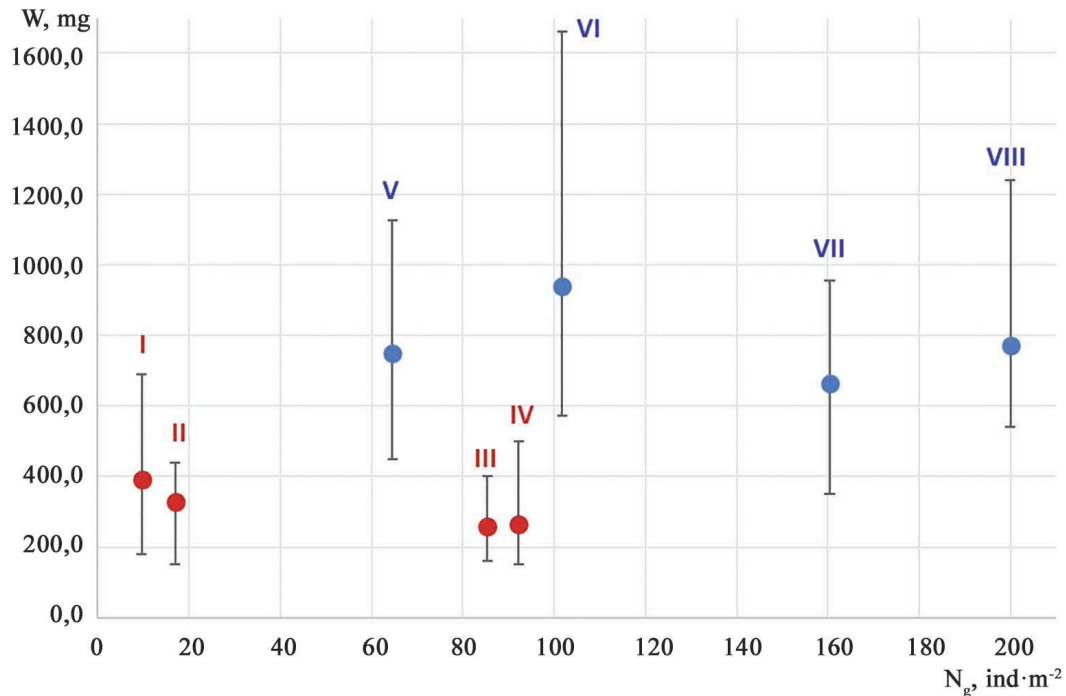


Fig. 1. Variation in body weight (W, mg) in juveniles *Astacus astacus* at the end of the summer (variants I–IV) and winter (variants V–VIII) periods of rearing at different values of geometric mean of their density (N_g , ind·m⁻²) per cultivation period. Features of separate variants are given in the «Material and Methods» Chapter. «Whiskers» – limits of changes in body weight, points – their average values

During winter cultivation, the average weight of individuals at group rearing (table 2, fig. 1; variants V–VII) at the end of the experiment differed statistically insignificantly ($p > 0.5$).

Table 2

The growth and survival of *Astacus astacus* yearlings in autumn – winter period at rearing in experimental conditions from the age of 3–4 months till the age of 9–10 months

Conditions of rearing	Terms of rearing	Duration of rearing, days	Initial density (N_0), ind·m ⁻²	Average initial body weight (W_0), mg	Final density (N_d), ind·m ⁻²	Average final body length, mm	Average final body weight (W_d), mg	Survival, %	Author
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Group rearing									
Aquarium, area 0.069 m ² , indoor; 17–19 °C	07.10.15–09.04.16	185 ^{V*}	72.0	258.1	58.0	31.1***	749.3	80.6	Present study
Aquarium, area 0.069 m ² , indoor; 17–19 °C		185 ^{VI*}	142.0	348.6	73.0	33.7***	939.1	51.4	
Aquarium, area 0.090 m ² , indoor; 17–19 °C		185 ^{VII*}	211.0	262.3	122.0	29.9***	668.3	57.8	

Ending table 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fiberglass basins, area 0.86 m ² , indoor, 18–19 °C	11.09.1987– 11.03.1988	182	40.0	279.4	5.1	32.2	525.8	50.0	[23]
		182	86.0	279.4	9.5	33.2	573.0	40.0	
		182	86.0	279.4	8.6	33.3	580.7	40.0	
		182	86.0	279.4	12.0	34.0	613.4	45.0	
		182	86.0	279.4	14.6	34.8	655.2	45.0	
		182	86.0	279.4	25.8	32.4	535.2	50.0	
		182	86.0	279.4	20.6	38.9	898.2	35.0	
		182	86.0	279.4	27.5	36.1	726.5	30.0	
		182	86.0	279.4	24.1	32.6	544.6	40.0	
Plexiglas aquaria, area 0.16 m ² , indoor, 22 °C	May – July 2002	70	125	420.0	100.0	32.5***	840.0	80.0	[24]
		70	125	420.0	100.0	29.3***	630.0	80.0	
Concrete basin 3.9 m ² , indoor; 19,1 °C	March – August	127	≈120.0	234.5	≈60.0	32.9	960.1	≈50.0	[14]
Individual rearing									
Glasses, area 0.005 m ² , indoor; 17–19 °C	07.10.15– 09.04.16	185 ^{VIII*}	200.0	283.0	200.0	30.8	778.1	90.0	Present study
Cages, area 0.00663 m ² , indoor; ≈20 °C	01.12.1990– 30.05.1991	181	151.0	153.3	151.0	28.0	553.1	no data	[11]
		181	151.0	153.3	151.0	30.0	672.4	no data	
Compartments, area 0.00275 m ² , indoor; ≈20 °C	Mid October – Mid April	172	363.6	170.0	363.6	27.0***	500.0	75.0	[22]
		162	363.6	220.0	363.6	29.3***	630.0	94.5	
		148	363.6	210.0	363.6	29.2***	625.0	75.0	

Note. *V–VIII – variants of experiments, given in the section «Material and Methods»; ** recalculated by equation (1).

By the end of the winter growing period, we obtained individuals with body sizes at 26–34 mm range (mean size 30.3 mm), and with the mean body weight in different variants reaching up to 668–931 mg, while the weight of the largest individuals reached 1400 mg. In individual rearing (variant VIII), where the area per individual was significantly higher than in groups, the average weight of individuals at the end of experiment rearing was within the same limits – 778.1 mg.

Generally, the continuous growth of *A. astacus* newborns for 9 months (early July to the succeeding April) i. e., slightly over three months under «summer rearing up» exposed to natural conditions, followed by six months of «winter cultivation» under controlled conditions.

The survival rate of *A. astacus* period was 50–80 %; no definite relationship was found to exist between this index and the planting density. Interestingly, the survival rate of individuals kept singly in separate containers (variant VIII) was significantly high – 90 %. The number of molts in specimens at individual rearing (variant VIII of the experiment) varied within 2–4 in the 6-month period of the experiment, with no instances of molt or postmolt mortality. The total number of molts in all the 10 individuals grown under variant VIII was seen to be 26. Significantly, all 9 out of the 10 individuals under variant VIII survived the entire duration of the experiment. The death of a single crayfish (from variant VIII), which occurred shortly after the commencement of the experiment, was most likely due to the injury inflicted up on her during weighing. However, to our observation, the major causes for mortality among the individuals reared in groups could be postmolt cannibalism, and/or the inevitable clashes between individuals.

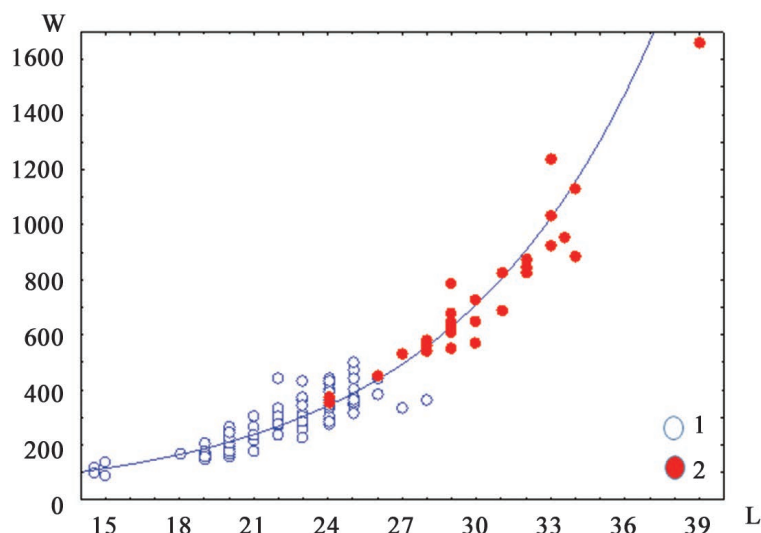


Fig. 2. Dependence of wet body mass in juvenile *Astacus astacus* (W, mg) on their body length (L, mm).
1. Individuals under the age of 3 months. 2. Individuals aged from 3 to 9 months. Curve 1 is the line of equation (1)

The body length (L, mm) – body weight (W, mg) relationship of *A. astacus* juveniles from 2 weeks to 9 months of age is shown in fig. 2. The functional relationship between W and L follows the equation:

$$W = 0,0441L^{2,832}. \quad (1)$$

The Spearman correlation coefficient (r) for the equation (1) is +0.960, implicating a high degree of correlation between the two variables. Thus, the equation (1) enables to calculate the body weight of juvenile *A. astacus* by their body size, or vice versa.

Discussion

As noted earlier, the growth of *A. astacus* in natural water bodies stops at water temperatures below 10–12 °C. Therefore, the cultivation of this species in open-air aquaculture (fishing trays, concrete basins, small ground ponds, etc.) is possible only in a relatively short period of the year (growing season), when the air temperature stably exceeds 10–12 °C.

In Belarus and the adjacent regions, its duration does not exceed an average of 5 months (May – September). For newborn *A. astacus* larvae hatching in late June – early July, the growth period in its first summer of life becomes even shorter – no more than 3 months. Hence, the further growth of the specimen is possible only in a closed premises, in which the temperature is maintained within the range of 18–20 °C, which is close to the average temperature in the littoral zone of water bodies in temperate latitudes in the growing season. The growing period under such conditions can be carried out until mid-late April when individuals reach the age of 9–10 months. Thus grown juveniles can be transferred to further cultivation to marketable sizes in open-air reservoirs, for example, in earthen ponds, the water temperature in which at the end of April already exceeds 10–12 °C.

The biotechnology of pond growing of yearlings and older age groups of *A. astacus* to marketable sizes is quite well developed [9; 25]. However, many issues of growing yearlings in enclosed spaces remain clearly not studied enough, first of all, the influence of planting density on their growth and survival.

To this end, we have analyzed the results of our own research and the available literature data on the cultivation of *A. astacus* juveniles at different densities under experimental conditions – in fish trays, laboratory aquarium and individual vessels, open wooden cages established in the littoral zone of the lake, concrete pools and small earthen ponds, both for single and group keeping.

Two age groups of *A. astacus* were selected for analysis: I. Newborn stage II larvae growing up to the age of 3–3.5 months; II. Yearlings aged 3 to 5 months, bred to the age of 9 to 11 months.

These age groups correspond to those in our experiments on summer and winter growing, respectively. Data on the size and average weight of individuals, as well as their planting density in both groups at the beginning and end of the growing period are presented in tables 1 and 2.

In experiments conducted on individuals of group I (table 1), the initial density of stage II larvae changed by almost two orders of magnitude – from 16 to 1468 ind.·m⁻². The survival of individuals by the age of 3–3.5 months varied over a wide range – 3.3 to 83.7 %, which had a significant impact on their growth rate. That's why, as the average arithmetic mean of planting density could give a significant overestimate of the

density at the end of the sprouting period, when the density effect impacts the growth of larger individuals most strongly [26]. Therefore, the planting density of individuals for the entire period of their growth in both the series of experiments was determined through geometric mean (N_g):

$$N_g = (N_o \cdot N_d)^{0.5}, \quad (2)$$

where N_o and N_d represent the density of individuals respectively at the beginning and end of their growing period.

Pertinently, correlation analysis revealed the existence of a significant negative correlation between increased values of N_g and a decline in the average body weight of fingerlings at the end of their growing season (fig. 3). At minimal N_g values (up to about 16 ind. \cdot m⁻²), the average weight of fingerlings (3–4 months old) reached 350–390 mg (table 1; fig. 3). Approximately the same weight is reached by fingerlings of *A. astacus* at the end of their first growth season in natural reservoirs of Belarus and adjacent territories with similar natural and climatic conditions [4; 27].

On the other hand, with an increased N_g to 100 ind. \cdot m⁻², the average weight of the individuals declined to 160–260 mg. Survival rate during the period of summer growth in different versions of the experiment, varied within the limits of 29–38 %. A clear dependence of the survival rate on the density of planting of individuals, however, was not established ($p > 0.5$).

The relationship between the average body weight of individuals aged 3–4 months (W_d , mg) and their geometric mean density (N_g , ind. \cdot m⁻²) during the cultivation period at group rearing is best approximated by the empirical equation:

$$W_d = A - \beta \cdot \lg N_g, \quad (3)$$

where A – is an empirical constant corresponding to the average weight of individuals at the age of 3 to 4 months when grown at a density close to zero; β – is an empirical constant characterizing the rate of decrease W_d with increase of $\lg N_g$.

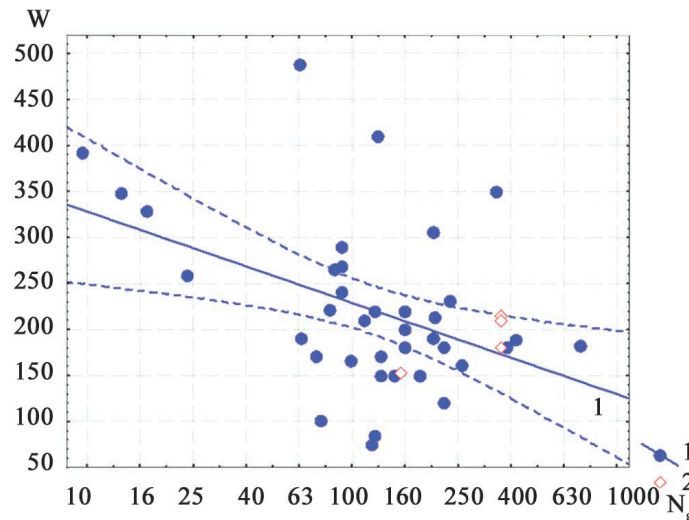


Fig. 3. The dependence of the body weight of fingerlings *Astacus astacus* (W , mg) by the age of 3–4 months on the geometric mean of their density (N_g , ind. \cdot m⁻²) during the cultivation period. N_g values are presented on a logarithmic scale. 1. Group rearing; 2. Individual rearing. Straight line 1 is the regression line of equation (3); broken lines – significance level $P = 0.95$

In numerical form, equation (3) calculated on the results of our research and the relevant data of other authors (table I) for individuals aged 3–4 months is as follows:

$$W_d = 424 - 103 \cdot \lg N_g. \quad (4)$$

The correlation coefficient (r) between W_d and $\lg N_g$ for equation (4) is equal to -0.5210 , implicating a weak negative correlation existing between the variables.

The equation (4), if applied to the cultured population of *A. astacus*, during summer rearing would ensure juveniles of better quality, compared to those in the wild. In water bodies of Belarus and the Baltic states, their sizes at the end of the first growing season, were 15–22 mm [1; 4], which, according to the equation (3), corresponds to their body weight ranging between 100 and 280 mg.

According to available experimental data (table 1; fig. 3), a similar weight of fingerlings at the end of summer rearing could be achieved if the N_g is maintained at the range 150–300 ind. \cdot m⁻².

From equation (2), it is easy to derive formula (5) for calculating the maximum stocking density of Stage II larvae at the beginning of rearing period:

$$N_{\max} = \frac{N_{g\text{lim}}}{\sqrt{S}}, \quad (5)$$

where N_{lim} – limited density of rearing is equivalent to 300 individuals·m⁻² when the average weight of juveniles at the end of the summer season reaches 170–230 mg; S – survival of individuals during the growing period, expressed in fraction of unity.

The average survivability of fingerlings over a period of summer growth is equivalent to 50 % (i.e. S = 0.5), which corresponds to the available experimental data (table 1). Hence, the maximum limit for the optimal planting density for Stage II larvae for summer cultivation will be close to

$$N_{\text{max}} = \frac{300}{\sqrt{0,5}} \approx 423 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (6)$$

Thus, this mathematical expression has a predictive value inasmuch as it offers us a cue for the initial planting density to obtain the desired output. On the other hand, this dependence provides an alternative in aquaculture strategy to produce more juveniles with lower body weight or fewer larger ones.

In individuals at the age of 9–11 months, despite a considerable scatter of the experimental data, a definite tendency for a decreased average weight, in consonance with an increase in their planting density was observed (fig. 4).

The dependence of the final weight of individuals (W_d , mg) aged 9–11 months, on their planting density (N_g , individuals·m⁻²) under group rearing can be approximated by equation (3), the numerical form of which is:

$$W_d = 1376 - 278 \cdot \lg N_g. \quad (7)$$

The correlation coefficient (r) between W_d and $\lg N_g$ for equation (5) is equal to -0.4517.

At planting densities less than 100 ind·m⁻² in group rearing, the maximal weight of the specimen reached 1,400 mg by the end of the rearing period (table 2, fig. 4).

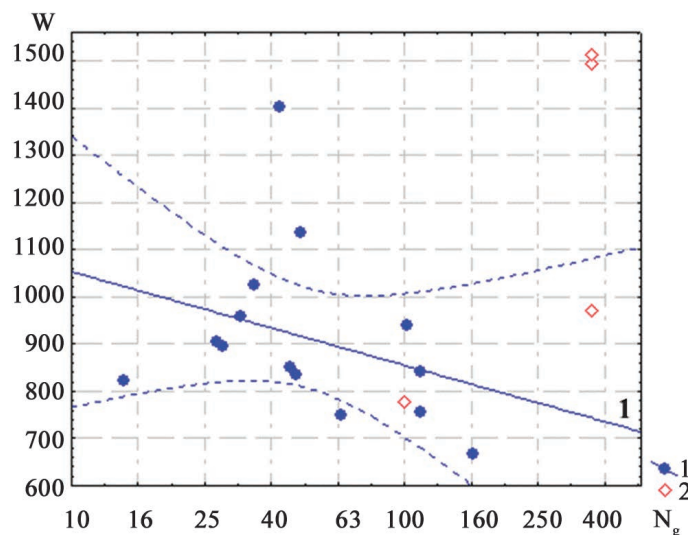


Fig. 4. The dependence of the body weight of juvenile *Astacus astacus* (W, mg) by the age of 9–11 months on the geometric mean of their density (N_g , ind·m⁻²) during the cultivation period. N_g values are presented on a logarithmic scale.

1. Group rearing; 2. Individual rearing. Straight line 1 is the regression line of equation (5); broken lines – significance level P = 0.95

In natural reservoirs of Belarus, the body weight of *A. astacus* juveniles by the end of the second summer of their life reaches an average of 1000 mg. According to (5) and fig. 4 at cultivation in laboratory conditions, this weight corresponds to the average rearing density of 25 ind·m⁻². At maximal density in experiments in group rearing for the winter growing season exceeded 200 ind·m⁻². But maximum body weight by the end of rearing at such densities only reached 700 mg.

The survival rate of juvenile *A. astacus* at the end winter rearing period reached 30–95 % (table 2). It is slightly higher than in summer cultivation but far superior to that in natural water bodies [4]. The average survival value of juveniles over a period of winter growth season is equivalent to 60 % (i. e. S = 0.6). Hence, the maximum limit for the optimal initial planting density for *A. astacus* at the age of 3–4 months for winter cultivation, will be close to

$$N_{\text{max}} = \frac{25}{\sqrt{0,6}} \approx 33 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (8)$$

If the average survival rates of the experimental individuals were approximately 35 %, and 63 % during summer and winter rearing respectively the overall survival of juveniles over the entire 9-month period will be 0.35×0.60×100 % = 22 %. On the other hand, in natural water bodies, the survival of yearlings, according

to rough estimates has never exceeded 5–8 % of the total number of newly born larvae [4], thus making it explicit the advantage of crayfish culturing under controlled conditions. To a considerable extent, the results of our studies, in unison with those from other authors (table 2) would offer valuable clues to optimizing the aquaculture of *A. astacus* fingerlings at industrial levels.

Notwithstanding the previous demonstrations on the existence of a negative relationship between the planting densities and the body mass in some crayfish species such as *Astacus leptodactylus* and *Pasifacetus leniusculus* [12; 28], the present study is the first of its kind where a quantitative estimate is made to define the correlation between planting density and optimal growth rate among crayfishes.

The phenomenon of growth inhibition in conditions of increased density was confirmed in experiments of so-called «battery culture», i. e. the growth of the juveniles, one by one in separate small cells [29], thus eliminating a number of negative effects of increasing density in aquaculture, such as intraspecific competition for food resources and postmolt cannibalism. However, contrarily, it would demand a concurrent increase in the area of cells as the individuals grow, which may not always be profitable from economic standpoints. Therefore, in most cases, rearing of juvenile crayfish in aquaculture is done in groups, with ample consideration of the effect of limiting factors on the growth and survival of individuals. At this juncture, the established dependencies, as per equations (3) and (5) would be very useful as it provides options for either getting a larger number of smaller individuals or a smaller number of larger ones per unit area.

Another important aspect to be considered at this juncture is molting, a hormone-driven phenomenon for growth among crustaceans, even after attaining puberty [30]. Post-molting cannibalism is one of the most important mortality factors in crayfish aquaculture, especially at high crayfish rearing densities. And the molting itself is reported to create immense stress and anxiety in crayfishes due to the high energy costs for it [31].

In crustaceans, the duration of intervals between successive molts increases in parallel with their increasing body weight and with decreasing temperature [32]. Among *A. astacus* fingerlings, the number of molts in natural water bodies is known to depend on the duration of the vegetation season and the average temperature. Its number varies between five and seven for smaller age groups, though it does not exceed three for yearlings [1; 10]. Pertinently, asynchrony of molt would increase with the age of the juveniles.

Therefore, when they are grown in high density, with limited shelters, the early postmolt specimens with their soft exoskeleton could become easy prey for other individuals with harder a exoskeleton (at the intermolt stage, for instance). Since the number of molts in larvae is higher than that of juveniles, the probability of death of the latter due to postmolt cannibalism is substantially lower than those of fingerlings, a contention that was confirmed by our studies and those of other authors (tables 1 and 2).

This part of the study reveals that the survival rate of juveniles over the period of winter growth under controlled conditions (within the range of 30.0–94.5 %) was substantially higher than that of autumn-winter period in natural reservoirs (not more than 10–15 %) thus reinforcing the relevance of the present study; significantly, maximum survival was observed at the instances of individual rearing (variant VIII). As per the data from the present study, the mortality of individuals during the process of exuviation has been generally very low. Among the individuals of variant VIII, mortality was not observed at all both at exuviation proper and immediate post-exuviation.

A very serious limiting factor for *A. astacus* aquaculture is relatively late terms for the appearance of planting material of fingerlings in nature, namely at the end of June – beginning of July, i.e. approx. in the middle of the growing season. To overcome this limiting factor, a method has been proposed for the early production of *A. astacus* fingerlings in aquaculture [33], which is as follows. The egg-bearing females are to be transferred from natural reservoirs to basins/trays located indoors as early as February – March. In the first 15 days after transfer, females are to be kept at 2–3 °C, and in the next 45 days, at 8–9 °C. During this time, the release of eggs from embryonic diapause would take place. After this, the eggs are to be incubated at 18–20 °C before the release of the larvae directly on females or, after removing them from the females, in special incubation devices. It is also obvious that early transfer of the gravid females to controlled indoor conditions would not only shorten the span of time required for the individuals to reach marketable size, it could as well ensure a better quality of the stock.

This method was previously tested by us successfully on closely related crayfish species *Astacus leptodactylus* [34]. We obtained the larvae at Stage II as early as in the first decade of May, i. e. 1.5–2 months earlier than in reservoirs with a natural thermal regime. The success of this experiment on *A. leptodactylus* encourages us to recommend the same procedure in *A. astacus* as well. Resultantly, it can be expected that by using this method the period of growth of *A. astacus* fingerlings in open-air aquaculture could be prolonged by the same 1.5–2 months. This makes it possible to obtain aquaculture at the end of the summer season *A. astacus* fingerlings of a larger size than those in natural reservoirs. In its turn with their further winter rearing indoors, it will be possible to obtain larger underyearlings. If these grown-up individuals are introduced into fish ponds

in the spring, it is quite possible that they will reach marketable sizes by the end of this growing season, as how it shows the experience of breeding crayfish in aquaculture in Germany [9].

Conclusion

To conclude, the results of our present study demonstrated that culturing of *A. astacus* larvae under controlled conditions would accelerate its growth to reach commodity size, one year earlier than the controls; while the wild population required 4 years, the experimental ones attained comparable size and body weight in 3 years. Significantly, this growth rate corresponds to that of the *Astacus* populations in Germany and France with a warmer climate and longer season of vegetation.

The culture methods under the controlled conditions (adopted in the present study) offer proper protection to the *A. astacus* juveniles at a time as they pass through the most vulnerable (to factors such as predation, abrasion, and infection) stages of postembryonic development. Maintenance of optimal environmental conditions for the juveniles could thus be a major contributory factor for its higher survival rate (reaching up to 90 %; table 2) in comparison with natural water bodies.

The present study is also relevant in terms of designing the optimal stocking densities for culture. The series of experiments with varying densities under the summer and winter growth periods have helped us obtain valuable clues regarding the optimized stocking densities under a given situation. This would indeed help a farmer to predict the density of the individual and the total space required to attain maximum productivity within the minimum span of time.

Finally, but importantly. The optimized pattern of culture under a natural environment (summer growth) interspersed with the culture under controlled conditions (winter growth), as envisaged in the present study, would not only help us to have grown-outs of *A. astacus* with improved quality, and optimization of its commercial fishery, but it would as well foster the restoration of the natural reserves of the species within the country, with the prospect of its conservation leading to its possible withdrawal from the Red Data Book of Belarus.

Библиографические ссылки / References

1. Cukerzisz J. *Astacus astacus* in Europe. In: Freshwater crayfish: biology, management and exploitation. London: Chapman & Hall; 1988. p. 309–340.
2. Skurdal J, Taugbøl T. Biology of freshwater crayfish. In: Holdich DM, editor. Biology of Freshwater Crayfish. Oxford: Blackwell Science Ltd.; 2002. p. 467–510.
3. Golubev A, Kulesh V. The state of aquaculture in Belarus. In: Future Trends of Aquaculture Development in Eastern Europe. Extended abstracts of contributions and national reports in Eastern European countries presented at the International Conference on aquaculture development in Eastern Europe, Budapest, Hungary. 1996 September 1–5. Budapest: [publisher unknown]; 1996. p. 13–117.
4. Alekhovich A. Crayfishes in Belarus in modern reality. Minsk: Belarusskaya navuka; 2016. 303 p. Russian.
5. Edsman L, et al. *Astacus astacus*. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2014.3 [Internet; cited 2015 January 17]. Available from: www.iucnredlist.org.
6. Gherardi F. Towards a sustainable human use of freshwater crayfish (Crustacea, Decapoda, Astacidea). *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2011;401. DOI: 10.1051/kmae/2011038.
7. Ackefors H. Freshwater crayfish farming technology in the 1990s: a European and global perspective. *Fish and Fisheries*. 2000;1:337–359.
8. Neveu A. Comparaison de la croissance des différentes espèces d'écrevisses présentes en France en région Bretagne. *L'Aquaculteur de France*. 1997;51:71–80.
9. Keller MM, Keller M. Yield experiments with freshwater crayfish *Astacus astacus* (L.) in aquaculture. *Freshwater Crayfish*. 1995;10:506–511.
10. Ackefors H. Observations on the yearly life cycle of *Astacus astacus* in a small lake in Sweden. *Freshwater Crayfish*. 1999;12:413–429.
11. Henttonen P, Huner JV, Lindqvist OV, Henttonen L, Pitkaniemi J. Moulting, growth, survival and color of crayfish *Astacus astacus* (L.) juveniles fed diets with and without green plant material and maintained in individual cages and communal tanks. *Freshwater Crayfish*. 1993;9: 426–441.
12. Golubev AP, Alekhovich AV, Bodilovskaya OA, Gopinathan Anilkumar. Some methodological approaches to the definition of limiting density for aquaculture of freshwater crayfish fingerlings. *Aquaculture International*. 2016; 25:715–725.
13. Lowery RS. Growth, molting and reproduction. In: Freshwater crayfish: biology, exploitation and culture. London: Chapman & Hall; 1988. p. 83–113.
14. Cukersis J, Tamkjavichene E. Artificial breeding of noble crayfish. In: The Problems of Fish and Crustacean Breeding in Lithuanian Water Bodies. Vilnius: Mintis Publishing House; 1972. p. 219–228. Russian.
15. Tamkjavichene E. The growth and development of juveniles of noble crayfish. In: The Problems of Fish and Crustacean Breeding in Lithuanian Water Bodies. Vilnius: Mintis Publishing House; 1972. p. 229–234. Russian.
16. Kozák P, Buřič M, Polícar T, Hamáčková I, Lepičová. The effect of inter- and intra-specific competition on survival and growth rate on native juvenile noble crayfish *Astacus astacus* and alien spiny-cheek crayfish *Orconectes limosus*. *Hydrobiologia*. 2007;595:85–94.
17. Jonsson A. Life history differences between crayfish *Astacus astacus* and *Pacifastacus leniusculus* in embryonic and juvenile development, laboratory experiences. *Freshwater Crayfish*. 1995;8:170–178.
18. Polícar T, Simon V, Kozák P. Egg incubation in the noble crayfish (*Astacus astacus* L.): the effect of controlled laboratory and outdoor ambient condition on hatching success, growth and survival rate of juveniles. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. 2004;411–423.

19. Pursiainen M, Järvenpää T, Westman K. A comparative study on the production of crayfish (*Astacus astacus* L.) juveniles in natural food ponds and by feeding in plastic basins. *Freshwater Crayfish*. 1983;392–402.
20. Ackefors H, Gydemo R, Westin L. Growth and survival of juvenile crayfish, *Astacus astacus* in relation to food and density. In: *Biotechnology in Progress*. Bredene, Belgium: European Aquaculture Society. 1989. p. 365–373.
21. Kouba A, Kanta J, Buřič M, Polícar T, Kozák P. The effect of water temperature on the number of moults and growth of juvenile noble crayfish *Astacus astacus* (Linnaeus). *Freshwater Crayfish*. 2010;17:37–41.
22. Ackefors H, Gydemo R, Keyser P. Growth and moulting in confined juvenile noble crayfish *Astacus astacus* (L.) (Decapoda, Astacidae). *Freshwater Crayfish*. 1995;10:396–409.
23. Taugbøl T, Skurdal J. Growth, mortality and molting rate on noble crayfish, *Astacus astacus* L., juveniles in aquaculture experiments. *Aquaculture and Fisheries Management*. 1992; 23:411–420.
24. Renai B, Gherardi F, D'Agaro E. Effect of ration size and temperature on moult increment and metabolic parameters of juvenile noble crayfish, *Astacus astacus*. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. 2007;1:39–54.
25. Piwernetz D., Balg J. Growth experiments with *Astacus astacus* in a 6,000 m² pond previously used for extensive farming of carp. *Freshw. Crayfish*. 1999;12:535–539.
26. Kulesh VF, Alekhnovich AV. Farming of the juvenile narrow-clawed crayfish (*Astacus leptodactylus*) in cages and ponds in polyculture with fish in the heated waste water of the thermal power plan. *Hydrobiological Journal*. 2010;46:45–59.
27. Westman K, Savolainen R, Pirsainen M. A Comparative study on the growth and molting of the noble crayfish, *Astacus astacus* (L.), and the signal crayfish, *Pacifastacus leniusculus* (Dana), in a small forest lake in southern Finland. *Freshwater crayfish*. 1993;9:451–465.
28. Harlioğlu MM. A comparison of the growth and survival of two freshwater crayfish species, *Astacus leptodactylus* Eschscholtz and *Pacifastacus leniusculus* (Dana), under different temperature and density regimes. *Aquaculture International*. 2009;17:31–43.
29. Barki A, Karplus I, Manor R, Parnes S, Aflalo ED, Sagi A. Growth of redclaw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in a three-dimensional compartments system: Does a neighbor matter? *Aquaculture*. 2006;252:348–355.
30. Shyamal S, Das S, Guruacharya A, Mykles DL, Durical DS. Transcriptomic analysis of crustacean molting gland (Y-organ) regulation via mTOR signaling pathway. *Scientific Reports*. 2018;8(1):7307.
31. Chang EC. Physiological and biochemical changes during the molt cycle in decapod crustaceans: an overview. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 1995; 193:1–14.
32. Khmeleva N, Golubev A. La production chez les Crustacés. Rôle dans les écosystèmes et utilisations IFREMER. Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer. Brest: [publisher unknown]; 1986. p. 144 p.
33. Cukerzis JM, Shashtokas IA. Embryonic diapause in noble crayfish (*Astacus astacus* L.). *Journal of General Biology*. 1977;38: 929–933. Russian.
34. Golubev A, Bakulin A. The experience of obtaining and growing up of larvae of crayfish *Astacus leptodactylus* in recycling system in Belarus. In: International Conference. Aquaculture and Waters: fish culture, shellfish culture and water usage. 1998 October 7–10. Bordeaux, France. Aquaculture Europe'98. European Aquaculture Society. Special publication. Bordeaux: [publisher unknown]; 1998. p. 99–100.

Статья поступила в редколлегию 15.04.2022.
Received by editorial board 15.04.2022.

УДК 581.524.2/3

ФЛОРИСТИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИДОРОЖНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ЭКСПОЗИЦИИ «ВЫЕМКА» НА ПРИМЕРЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ Г. МИНСКА И МИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Е. С. ШАВАЛДА^{1), 2)}, И. М. СТЕПАНОВИЧ¹⁾

¹⁾Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича, Национальная академия наук Беларуси,
ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь

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

Приведены результаты эколого-флористических исследований придорожных фитоценозов при прохождении автодороги в экспозиции «выемка». Выполнено описание растительности по линии трансекты с представленной структурой и видовым разнообразием путем разделения на 5 секторов в зависимости от удаленности от дорожного полотна и конструкции полосы отвода. 5-й сектор в данной работе не учитывался из-за интереса к растениям антропогенно нарушенной территории полосы отвода. Составлен и проанализирован список сосудистых растений и мохообразных, насчитывающий 225 видов, которые относятся к 54 семействам, 167 родам.

Семействами с наибольшим количеством видов являются *Asteraceae*, *Poaceae*, *Fabaceae*, *Rosaceae* и *Brassicaceae*, что соответствует таксономической характеристике городских ландшафтов и придорожных фитоценозов. Отмечается значительная роль инвазионных видов: *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv., *Coryza canadensis* (L.) Cronq., *Festuca arundinacea* Schreb., *Lepidotheca suaveolens* (Pursh) Nutt. и др. Секторальное разделение позволило проследить влияние отдаленности от автодороги и изменения эдафических условий на видовой и эколого-ценотический состав растительности, их биоморфологический спектр по системе К. Раункиера. Так, переувлажнение и сток солевых противогололедных реагентов в секторах 2 способствует развитию гигрофитных форм растений и видов-нитрофилов: *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Aegopodium podagraria* L. и др.

Эрозионные процессы и недоразвитие почвенного покрова в секторах 3 положительно сказываются на произрастании галофитов и псаммофитов: *Oenothera biennis* L., *Sedum acre* L. и др. По эколого-ценотическим группам с указанием сеgetально-рудеральной принадлежности преобладают лесные (41 или 18,2 %) и луговые (40 или 17,8 %) виды, выражен вклад растений, характерных для рудеральных и луговых местообитаний (24 или 10,7 %), отмечаются сеgetально-рудеральные (23 или 10,2 %), рудеральные (20 или 8,9 %), сеgetальные (15 или 6,7 %) и рудерально-сеgetальные (10 или 4,4 %) виды.

Ключевые слова: придорожная растительность; синантропизация флоры; инвазионные и заносные виды; экологические группы растений.

Образец цитирования:

Шавалда ЕС, Степанович ИМ. Флористический состав и пространственные изменения придорожной растительности в экспозиции «выемка» на примере автомобильных дорог г. Минска и Минской области. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;2:26–38. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-26-38>

For citation:

Shavaldya YaS, Stepanovich IM. Floristic composition and spatial changes of roadside vegetation in the exposition *notch* on the example of Minsk and Minsk region highways. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;2:26–38. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-26-38>

Авторы:

Евгений Сергеевич Шавалда – аспирант; младший научный сотрудник.

Иосиф Михайлович Степанович – доктор биологических наук, доцент; главный научный сотрудник.

Authors:

Yauheni S. Shavaldya, postgraduate student; junior researcher. e.shavaldya@gmail.com

Iosif M. Stepanovich, doctor of science (biology), docent; chief researcher. jazep.st@hotmail.com

FLORISTIC COMPOSITION AND SPATIAL CHANGES OF ROADSIDE VEGETATION IN THE EXPOSITION NOTCH ON THE EXAMPLE OF MINSK AND MINSK REGION HIGHWAYS

Ya. S. SHAVALDA^{a, b}, I. M. STEPANOVICH^a

^aV. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany, National Academy of Sciences of Belarus
27 Akademičnaja Street, Minsk 220072, Belarus

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

Corresponding author: Ya. S. Shavalda (e.shavalda@gmail.com)

The results of ecological and floristic studies of roadside phytocenoses during the passage of the road in the «notch» exposition are presented. The description of the vegetation along the transect line with the presented structure and species diversity was performed by dividing into 5 sectors depending on the distance from the roadway and the design of the right-of-way (ROW). The 5th sector was not taken into account in this work due to the interest in the plants of the anthropogenically disturbed territory of the ROW. A list of vascular plants and bryophytes has been compiled and analyzed, numbering 225 species that belong to 54 families, 167 genera.

The families with the largest number of species are *Asteraceae*, *Poaceae*, *Fabaceae*, *Rosaceae*, and *Brassicaceae*, which corresponds to the taxonomic characteristics of urban landscapes and roadside phytocenoses. A significant role of invasive species is specified: *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv., *Conyza canadensis* (L.) Cronq., *Festuca arundinacea* Schreb., *Lepidotheca suaveolens* (Pursh) Nutt. et al. Sectoral division made it possible to trace the effect of remoteness from the highway and changes in edaphic conditions on the species and ecological-coenotic composition of vegetation, their biomorphological spectrum according to the system of Ch. Raunkiær. For example, waterlogging and runoff of salt anti-icing agents in sectors 2 promotes the development of hygrophytic forms of plants and nitrophilic species: *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Aegopodium podagraria* L. et al. Erosion processes and soil underdevelopment cover in sectors 3 have a positive effect on the growth of halophytes and psammophytes: *Oenothera biennis* L., *Sedum acre* L. et al.

According to the ecological-coenotic groups with the segetal-ruderal affiliation, forest (41 or 18,2 %) and meadow (40 or 17,8 %) species predominate, the contribution of plants characteristic of ruderal and meadow habitats is expressed (24 or 10,7 %), there are segetal-ruderal (23 or 10,2 %), ruderal (20 or 8,9 %), segetal (15 or 6,7 %) and ruderal-segetal (10 or 4,4 %) species.

Keywords: roadside vegetation; synanthropization of flora; invasive and alien species; ecological groups of plants.

Введение

Процессы строительства, эксплуатации и реконструкции автомобильных дорог, как правило, сопровождаются уничтожением естественной растительности (лесной, луговой, болотной) и изменением экологических режимов в полосе отвода и на примыкающих площадях. Трансформируются и прилегающие к автотранспортным коммуникациям природно-растительные комплексы. Распространение растений вдоль дорог (линейная миграция) – важная составляющая антропогенной трансформации. Именно развитая транспортная сеть и система коммуникаций с большими площадями нарушенных территорий, занятых синантропными сообществами с режимом ослабленной ценотической замкнутости, служит плацдармом для внедрения и закрепления неофитов, откуда они в дальнейшем распространяются в различные естественные экосистемы с последующим негативным изменением местной флоры [1; 2]. Благодаря географическому расположению Беларуси на пути множества торговых путей из Европейского союза, СНГ и стран «дальней дуги» проблема внедрения чужеродной растительности остается актуальной.

Несмотря на существующие методы предотвращения эрозионных процессов, придорожная растительность в сложившихся условиях развивается в направлении ксерофитизации, псаммофитизации и галофитизации с преобладающей долей рудерального компонента вследствие постоянного вымывания почвогрунта и песка осадками с откосов искусственно созданных насыпей и использования противогололедных солевых реагентов. Образующиеся антропогенно трансформированные растительные сообщества обладают различной устойчивостью и видовым составом из аборигенной и адвентивной фракций, на которое также оказывает влияние интенсивность дорожного движения, количество сезонного кошения и периодическая реконструкция дорожного полотна и инфраструктуры. Данные условия измененной природной среды приводят к появлению и нередкому преобладанию сеgetальной и рудеральной растительности с частой подавляющей долей инвазионных видов [2; 3]. На заключительном этапе строительства дорог, как правило, территория засыпается почвогрунтом и засеивается специальной травосмесью из многолетних злаков различных жизненных форм (дерновинных, длиннокорневищных, столонообразующих), в частности, *Festuca rubra* L., *Lolium perenne* L., *Phleum pratense* L., *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, *Schedonorus arundinaceus* (Schreb.) Dumort. и др., с целью снижения процессов эрозии почвы. Следует отметить, что

Рудеральные (Р) – синантропные растения, чаще всего эксплоренты, заселяющие различные свалки, придорожные полосы и селитебные территории (*Malva pusilla* Sm., *Leonurus cardiaca* L.);

Отмечались культивируемые (адвентивные) виды (К), растения болотных (Б), прибрежно-водных (Пр), лесных (Ле) и луговых (Лу) сообществ. Комплексно отмечались виды, характерные для фитоценозов из нескольких экосистем. Например, *Stachys palustris* L. в большинстве случаев характерен для луговых обычно влажных фитоценозов, встречается на заболоченных территориях, в лесных сообществах, вблизи дорог и посевов культур (ЛуБЛеС) [1; 6].

Результаты исследования и их обсуждение

Всего выявлено 243 вида сосудистых растений (сектора 1–5), в том числе 225 видов в полосе отвода и начальных участков придорожной полосы (сектора 1–4), которые относятся к 54 семействам, 167 родам. По количеству видов ведущими семействами являются *Asteraceae*, *Poaceae*, *Fabaceae*, *Rosaceae* и *Brassicaceae* (табл. 1).

Таблица 1

Ведущие семейства придорожной растительности секторов 1–4

Table 1

Leading families of roadside vegetation for sectors 1–4

Семейство	Количество видов		Количество родов	
	Абсолютное	%	Абсолютное	%
Asteraceae	35	15,6	27	16,2
Poaceae	30	13,3	21	12,6
Fabaceae	20	8,9	10	6,0
Rosaceae	14	6,2	11	6,6
Brassicaceae	10	4,4	10	6,0
Caryophyllaceae	8	3,6	7	4,2
Lamiaceae	8	3,6	8	4,8
Polygonaceae	8	3,6	4	2,4
Apiaceae	6	2,7	6	3,6
Scrophulariaceae	6	2,7	5	3,0
Остальные	80	35,4	58	34,6
Всего	225	100,0	167	100,0

В исследованной флоре больше всего видов приходится на род *Trifolium*, куда вошли такие представители, как: *T. repens* L., *T. aureum* Pollich, *T. campestre* Schreb., *T. spadiceum* L., *T. arvense* L., *T. medium* L. и *T. pratense* L. Также многочисленны виды родов *Galium* (*G. album* Mill., *G. aparine* L., *G. boreale* L., *G. mollugo* L. и *G. verum* L.) и *Poa* (*P. angustifolia* L., *P. annua* L., *P. compressa* L., *P. nemoralis* L. и *P. pratensis* L.). Следует обратить внимание, что количество видов и родов в ведущих семействах соответствует таксономической характеристике городских ландшафтов и придорожных фитоценозов [10].

Сектора 1L, 1R – обочина и верхняя часть откоса насыпи (рис. 2). Здесь выявлены 74 вида растений, из которых 44,6 % приходится на семейства *Poaceae* и *Asteraceae* (табл. 2). Низкая выраженность межвидовой конкуренции и высокая антропогенная нагрузка, проявляющаяся в сильном вытаптывании и вследствие этого уплотнении нарушенного почвенного покрова, способствуют распространению и высокой встречаемости таких видов, как *Plantago major* L., *Polygonum aviculare* L. s.l., *Potentilla anserina* L., *Poa annua* L., а также *Lolium perenne* L., *Poa compressa* L. и др.

Следует обратить внимание, что из видов, используемых в травосмесях, плевел многолетний (*L. perenne* L.) характеризуется способностью наиболее длительно поддерживать свою численность и, вероятно, выраженную устойчивость к загрязнению по сравнению с другими искусственно внедряемыми видами. Отмечается высокое обилие таких инвазионных видов, как *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv. и *Setaria viridis* (L.) P. Beauv. На одном из участков исследования (Дзержинский р-н, д. Волковичи) были обнаружены *S. Viridis* subsp. *pachystachys* (Franch. et Savat.) Masam. et Yanag. и *S. viridis* subsp. *pyncocoma* (Steud.) Tzvel. Единично встречены *Amaranthus retroflexus* L., *Galinsoga ciliata* (Rafin.) Blake и *Lepidotheca*

suaveolens (Pursh) Nutt. Среди инвазионного компонента также встречаются *Conyza canadensis* (L.) Cronquist и *Galinsoga parviflora* Cav. *Juncus tenuis* Willd. обнаружен только на 1 из 21 (4,8 %) участков исследования, *Lactuca serriola* L. – на 15 из 21 (71,4 %) [4].

Таблица 2

Ведущие семейства придорожной растительности для секторов 1L и 1R (обочина)

Table 2

Leading families of roadside vegetation for sectors 1L and 1R (road shoulder)

Семейство	Количество видов		Количество родов	
	Абсолютное	%	Абсолютное	%
Poaceae	17	23,0	11	18,0
Asteraceae	16	21,6	14	23,0
Brassicaceae	6	8,1	6	9,8
Fabaceae	6	8,1	4	6,6
Caryophyllaceae	5	6,8	5	8,2
Polygonaceae	3	4,1	3	4,9
Chenopodiaceae	3	4,1	2	3,3
Остальные	18	24,2	16	26,2
Всего	74	100,0	61	100,0

Сектора 2L, 2R – нижняя часть откоса насыпи и кювет (рис. 2). В этих условиях было обнаружено 117 видов с преобладанием семейств *Asteraceae*, *Poaceae* и *Fabaceae* (табл. 3). Водоотводящая функция территории, на которой заложены данные сектора, характеризуется частым переувлажнением, что приводит к появлению гигрофитных форм растений: *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Myosotis palustris* (L.) Nathh., *Alnus incana* (L.) Moench и др. На обнажениях грунта отмечается наличие мха *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid.

Таблица 3

Ведущие семейства для секторов 2L и 2R (кювет)

Table 3

Leading families for sectors 2L and 2R (ditch)

Семейство	Количество видов		Количество родов	
	Абсолютное	%	Абсолютное	%
Asteraceae	25	21,2	21	22,6
Poaceae	20	16,9	15	16,1
Fabaceae	15	12,7	7	7,5
Polygonaceae	7	5,9	4	4,3
Остальные	50	43,3	45	49,5
Всего	117	100,0	92	100,0

Сток солевых противогололедных реагентов со стороны дорожного полотна и минеральных соединений с гумусом от искусственно созданных песчаных насыпей обеспечивают питание растений азотом и неорганическими солями. В результате встречаются растения-нитрофилы: *Aegopodium podagraria* L., *Arctium lappa* L., *Galium aparine* L., *Cirsium vulgare* (Savi) Ten. и *Urtica dioica* L. Отмечается постоянное присутствие *Achillea millefolium* L. s.l., *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth, *Dactylis glomerata* L., *Schedonorus pratensis* Huds., *Festuca rubra* L., *Lolium perenne* L., *Plantago lanceolata* L., *Polygonum aviculare* L., *Potentilla anserina* L., *Setaria viridis* (L.) P. Beauv и *Sonchus arvensis* L. На некоторых участках продолжает сохраняться на довольно высоком уровне обилие *Lolium perenne* L. Из инвазионных видов незначительна

встречаемость *Arctium lappa* L., *Cichorium intybus* L., *Conyza canadensis* (L.) Cronq., *Galinsoga parviflora* Cav. и *Solidago canadensis* L. [4].

Сектора 3L, 3R – откосы выемки (рис. 2), представленные склонами 45–65° и высотой от 1,5 до 15 м с наиболее выраженными эрозионными процессами, постоянным стоком осадков и нарушениями почвенного покрова. Растительность данных секторов испытывает угнетение из-за недоразвития или отсутствия почвы, появляются типичные галофиты и псаммофиты: *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth, *Pilosella officinarum* F.Schultz et Sch.Bip., *Oenothera biennis* L., *Rumex acetosella* L., *Sedum acre* L. и др.

Несмотря на относительно экстремальные условия произрастания насчитывается 137 видов растений с типичным доминированием семейств *Asteraceae*, *Poaceae*, *Fabaceae* и *Rosaceae* (табл. 4). Из мхов преобладает *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid., также встречаются *Brachythecium albicans* (Hedw.) Schimp. и *Rhytidiadelphus squarrosus* (Hedw.) Warnst.

Таблица 4

Ведущие семейства для секторов 3L и 3R (откос, или склон выемки)

Table 4

Leading families for sectors 3L and 3R (slope, or notch slope)

Семейство	Количество видов		Количество родов	
	Абсолютное	%	Абсолютное	%
Asteraceae	31	22,6	25	23,6
Poaceae	19	13,9	12	11,3
Fabaceae	15	10,9	6	5,7
Rosaceae	8	5,8	7	6,6
Остальные	64	46,8	56	52,8
Всего	137	100,0	106	100,0

Отмечены ксерофильные и псаммофильные виды: *Artemisia absinthium* L., *A. campestris* L., *Thymus serpyllum* L. Также широко встречаются мезофиты: *Carex hirta* L., *Dactylis glomerata* L., *Plantago lanceolata* L., *Taraxacum officinale* (L.) Weber ex F. H. Wigg., *Artemisia vulgaris* L., *Vicia cracca* L., виды рода *Galium* и *Festuca* и др. На 2 из 21 участка (9,5 %) найден вид, относящийся к категории профилактической охраны – солнцезвезд монетолистный (*Helianthemum nummularium* (L.) Mill.) [11].

Из адвентивных видов, в том числе с большим инвазионным потенциалом, встречаются *Solidago canadensis* L., *Conyza canadensis* (L.) Cronq., *Lupinus polyphyllus* Lindl., *Schedonorus arundinaceus* Schreb., *Galinsoga parviflora* Cav., *Oenothera biennis* L., *Lepidotecha suaveolens* (Pursh) Nutt., *Phalacrolooma annuum* (L.) Dumort., *Acer tataricum* L., *Cichorium intybus* L., *Euphorbia esula* L., *Cornus alba* L., *Lactuca serriola* L. и *Setaria viridis* (L.) P. Beauv. Это самое большое количество чужеродных видов (14), выявленных на обследованных ключевых участках. Следует отметить растения, используемые для озеленения придорожных территорий или проникающие из прилегающих естественных сообществ: *Picea abies* (L.) H. Karst., *Pinus sylvestris* L., *Rosa pendulina* L. и *Cornus alba* L. [4].

Сектора 4L, 4R – краевая часть полосы отвода (рис. 2). Пространство от вершины откоса выемки до границы полосы отвода служит буфером между придорожной и естественной растительностью и агрофитоценозами. Здесь выявлено 168 видов сосудистых растений (табл. 5). В данных секторах аборигенная фракция более конкурентоспособна по сравнению с предыдущими. Широко встречаются типичные лесные и луговые виды: *Acer platanoides* L., *Betula pendula* Roth, *Hypericum perforatum* L., *Picea abies* (L.) H. Karst., *Pinus sylvestris* L., *Poa pratensis* L., *Rubus idaeus* L., *Veronica chamaedrys* L. Иногда заходят представители сельскохозяйственных культур, в частности, *Triticum aestivum* L.

Из чужеродных и заносных видов имеют место *Acer tataricum* L., *Solidago canadensis* L., *Amelanchier spicata* (Lam.) C. Koch, *Cichorium intybus* L., *Conyza canadensis* (L.) Cronq., *Schedonorus arundinaceus* Schreb., *Galinsoga parviflora* Cav., *Oenothera biennis* L., *Lepidotecha suaveolens* (Pursh) Nutt., *Lactuca serriola* L., *Rorippa austriaca* (Crantz) Bess., *Setaria viridis* (L.) P. Beauv., *Lupinus polyphyllus* Lindl. и *Sambucus racemosa* L. [4].

Мохообразные представлены луговым (*Brachythecium albicans* (Hedw.) Schimp.), лугово-рудеральным (*Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid.) и лесными видами (*Plagiomnium affine* (Blandow ex Funck) T. J. Kop. и *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.).

Ведущие семейства для секторов 4L, 4R (краевая часть полосы отвода)

Table 5

Leading families for sectors 4L, 4R (right-of-way edge)

Семейство	Количество видов		Количество родов	
	Абсолютное	%	Абсолютное	%
Asteraceae	27	16,1	21	16,8
Рoaceae	24	14,3	16	12,8
Fabaceae	16	9,5	8	6,4
Rosaceae	12	7,1	10	8,0
Caryophyllaceae	7	4,2	6	4,8
Остальные	82	48,8	64	51,2
Всего	168	100,0	125	100,0

Сектора 5L, 5R представляют коренные лесные, луговые сообщества и агрофитоценозы на пашне, примыкающие к полосе отвода. В луговых сообществах были обнаружены такие инвазионные виды, как *Solidago Canadensis* L., *Conyza canadensis* (L.) Cronq., *Schedonorus arundinaceus* Schreb., *Oenothera biennis* L., *Lepidoteca suaveolens* (Pursh) Nutt.

В лесных фитоценозах встречаются: *Solidago canadensis* L., *Acer tataricum* L., *Amelanchier spicata* (Lam.) C. Koch, *Conyza canadensis* (L.) Cronq., *Schedonorus arundinaceus* Schreb., *Lupinus polyphyllus* Lindl. и *Sambucus racemosa* L. Также был обнаружен второй вид, относящийся к категории профилактической охраны – волчегонник обыкновенный, или волчье лыко (*Daphne mezereum* L.) [11].

На сельскохозяйственных территориях совместно с культурами произрастают 3 инвазионных вида: *Conyza canadensis* (L.) Cronq., *Lactuca serriola* L. и *Setaria viridis* (L.) P. Beauv. На заброшенных (временно неиспользуемых) участках отмечалось одно из наибольших количеств чужеродных растений – 13: *Heracleum sosnowskyi* Manden., *Solidago canadensis* L., *Helianthus tuberosus* L., *Amelanchier spicata* (Lam.) C. Koch, *Conyza canadensis* (L.) Cronq., *Schedonorus arundinaceus* Schreb., *Galinsoga parviflora* Cav., *Amaranthus retroflexus* L., *Lepidoteca suaveolens* (Pursh) Nutt., *Sambucus nigra* L., *Lactuca serriola* L., *Setaria viridis* (L.) P. Beauv. И *Lupinus polyphyllus* Lindl.

Придорожные растения в системе жизненных форм К. Раункиера. Общий биоморфологический спектр придорожной растительности обследованной территории представлен на рис. 3.

Доля фанерофитов (нанофанерофитов) и хамефитов в исследуемых секторах очевидно возрастает в зависимости от удаления от дорожного полотна несмотря на регулярное кошение. Увеличение количества фанерофитов на склоне выемки (сектора 3L, 3R) и непосредственно прилегающей части полосы отвода (сектора 4L, 4R) к естественным фитоценозам (агрофитоценозам) связано с самосевом или искусственной посадкой при озеленении с целью предотвращения процессов эрозии склонов и создания лесозащитных полос преимущественно из *Betula pendula* Roth, *Picea abies* (L.) H. Karst., *Fraxinus excelsior* L. и др.

Среди жизненных форм наиболее представительными оказались гемикриптофиты, что соответствует климатическим особенностям центральной геоботанической подзоны Беларуси и условиям произрастания вблизи автомобильной дороги. Данные виды обладают высокой конкурентоспособностью и возможностью переносить неблагоприятные периоды заморозков и засухи благодаря развитию большого количества побегов, хорошо защищенных почек и обильного семяношения (напр., *Polygonum aviculare* L. s.l.), что актуально для открытых участков непосредственно примыкающей придорожной полосы с постоянным потоком воздушных масс от движения автотранспорта и выраженным антропогенным загрязнением.

Геофиты являются единственными представителями обнаруженных криптофитов. Их количество незначительно, но выше в кювете (сектора 2L, 2R) и на краях полосы отвода (сектора 4L, 4R). Небольшое количество видов в непосредственно прилегающем к дорожному полотну фитоценозу и в верхней части склонов дорожной насыпи (сектора 1L, 1R) обусловлено сильным уплотнением почвы, а в секторах 3L и 3R – неспособностью укореняться и развиваться на рыхлом нарушенном и подвижном песчаном субстрате. Гелофиты и гидрофиты на исследуемых участках отсутствуют несмотря на сезонное переувлажнение в кювете. Однако, благодаря приспособительным возможностям встречаются некоторые виды, характерные для влажных местообитаний (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Juncus effusus* L. и др.).

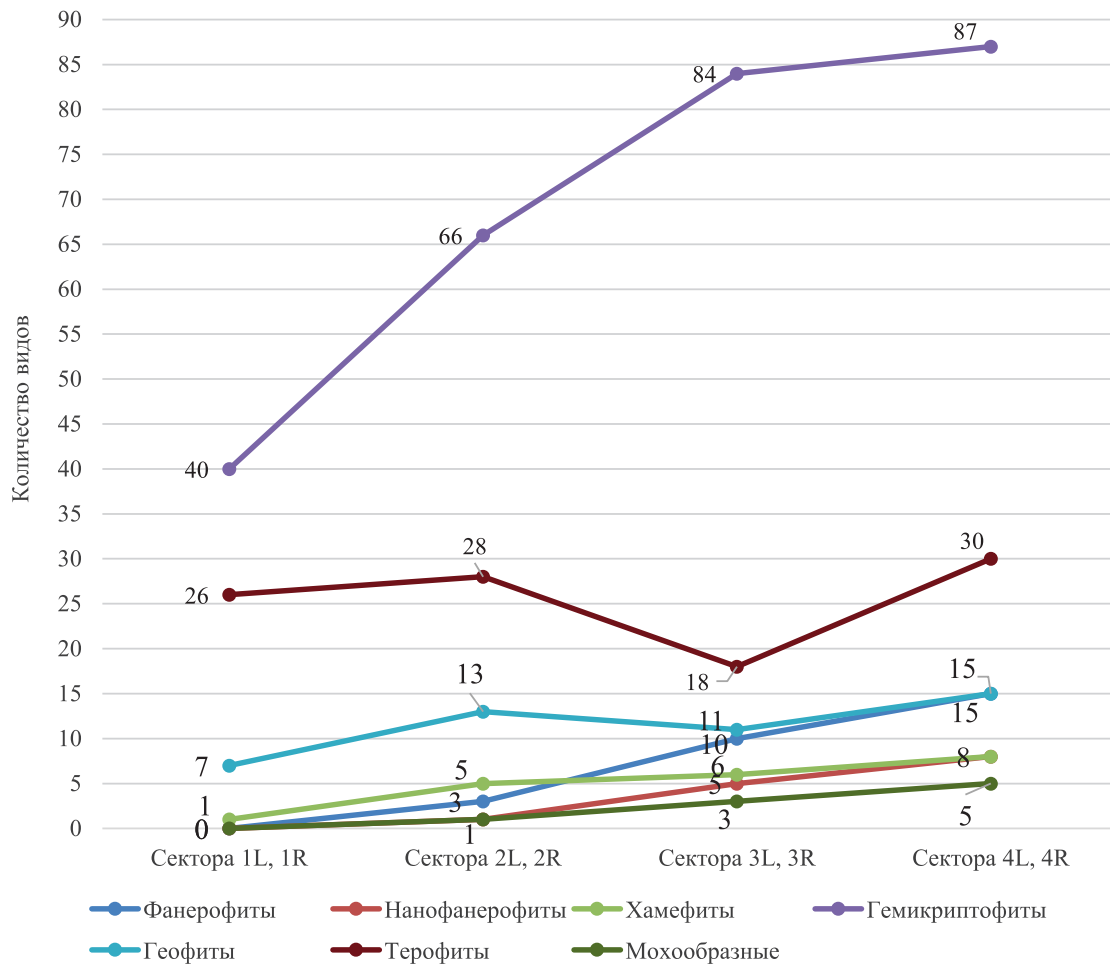


Рис. 3. Динамика придорожных биоморф по системе К. Раункиера

Fig. 3. Dynamics of roadside biomes according to C. Raunkier's system

В большинстве своем терофиты относятся к рудеральной растительности и возобновляются только семенным путем (*Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch.Bip. и др.). Все терофиты – однолетники, но встречаются и зимующие растения, чье развитие начинается осенью и возобновляется в летний сезон, давая семена (*Erysimum cheiranthoides* L., *Veronica arvensis* L.). Большое количество терофитов (после гемикриптофитов) свидетельствует о сильном антропогенном нарушении местообитания. Однако следует обратить внимание на низкое количество видов для секторов 3L и 3R, вызванное эрозией склона из-за осенне-весеннего смыва семян терофитов с осадками.

Распределение придорожных растений по эколого-ценотическим группам – типам растительности. Среди всех определенных видов растений (сосудистых и мохообразных) преобладают типичные лесные (Ле) (*Dryopteris filix-mas* (L.) Schott, *Fragaria vesca* L. и др.) и луговые (Лу) (*Leontodon hispidus* L., *Ranunculus acris* L. и др.). Их суммарное количество составляет 81 вид (36,0 % от общего числа) (табл. 6). Луговые рудеральные (ЛуР) (24 вида, или 10,7 %) растения – типичные виды сенокосов и пастбищ, лесных опушек (*Vicia sepium* L., *Hieracium umbellatum* L. и др.), однако широко встречаются и на урбанизированных территориях, свалках и вдоль дорог. Следует отметить большой вклад в структуру придорожных фитоценозов сегетально-рудеральной растительности (СР) – 23 вида, или 10,2 %. Данные виды слабо уступают ЛуР по количеству и представлены исключительно растениями антропогенно нарушенных территорий (*Erodium cicutarium* (L.) L'Hér., *Persicaria scabra* (Moench) Moldenke и др.). Количество рудеральных (Р) и сегетальных (С) видов составляет, соответственно, 20 (8,9 %) и 15 (6,7 %), что также подчеркивает нарушение почвенного покрова придорожной полосы. Доля рудерально-сегетальной (РС) группы (*Lepidoteca suaveolens* (Pursh) Nutt., *Trifolium arvense* L. и др.) представлена наименьшим количеством – 10 видов (4,4 %). Остальные категории незначительны и единичны.

По общему количеству обнаруженных видов доля отмеченных растений сегетальных и рудеральных местообитаний уступает только типичным лесным (17,8 %), луговым (17,8 %) и лугово-рудеральным

(10,7 %) (табл. 6). Наблюдается незначительное снижение динамики видов, характерных для полей (С и СР) в группе секторов 1–3, а также их увеличение в секторах 4L и 4R, что вызвано влиянием прилегающих сельскохозяйственных территорий в отмеченных пунктах наблюдения.

Таблица 6

Количество видов по эколого-ценотическим группам для секторов 1–4

Table 6

The number of species by ecological-cenotic groups for sectors 1-4

Название группы	Количество видов		Количество видов		Количество видов		Количество видов		Количество видов	
	общее	%	сектора 1L, 1R	%	сектора 2L, 2R	%	сектора 3L, 3R	%	сектора 4L, 4R	%
Лесные (Ле)	41	18,2	1	1,4	4	3,4	14	10,2	34	20,2
Луговые (Лу)	40	17,8	13	17,6	24	20,5	34	24,8	31	18,5
Луговые рудеральные (ЛуР)	24	10,7	9	12,2	18	15,4	20	14,6	19	11,3
Сегетально-рудеральные (СР)	23	10,2	14	18,9	12	10,3	10	7,3	15	8,9
Рудеральные (Р)	20	8,9	10	13,5	15	12,8	13	9,5	16	9,5
Сегетальные (С)	15	6,7	9	12,2	7	6,0	5	3,6	8	4,8
Рудерально-сегетальные (РС)	10	4,4	7	9,5	10	8,5	8	5,8	9	5,4
Луговые рудерально-сегетальные (ЛуРС)	8	3,6	6	8,1	5	4,3	8	5,8	7	4,2
Лугово-лесные рудеральные (ЛуЛеР)	7	3,1	2	2,7	5	4,3	5	3,6	5	3,0
Лесные рудеральные (ЛеР)	6	2,7	1	1,4	2	1,7	3	2,2	4	2,4
Лугово-лесные (ЛуЛе)	6	2,7	–	–	3	2,6	5	3,6	4	2,4
Культивируемые (К)	5	2,2	–	–	–	–	3	2,2	4	2,4
Лугово-болотные (ЛуБ)	4	1,8	–	–	3	2,6	2	1,5	1	0,6
Луговые сегетально-рудеральные (ЛуСР)	3	1,3	–	–	3	2,6	2	1,5	2	1,2
Болотные рудеральные (БР)	2	0,9	–	–	1	0,9	–	–	1	0,6
Лугово-лесо-болотные (ЛуЛеБ)	2	0,9	–	–	1	0,9	1	0,7	1	0,6
Лугово-лесные сегетальные (ЛуЛеС)	2	0,9	–	–	1	0,9	1	0,7	1	0,6
Культивируемые рудеральные (КР)	1	0,4	–	–	–	–	–	–	1	0,6
Лесо-болотные (ЛеБ)	1	0,4	–	–	–	–	–	–	1	0,6
Лесные сегетально-рудеральные (ЛеСР)	1	0,4	–	–	–	–	1	0,7	1	0,6
Лугово-болотно-лесные (ЛуБЛеС)	1	0,4	–	–	1	0,9	1	0,7	–	–
Лугово-лесные рудерально-сегетальные (ЛуЛеРС)	1	0,4	1	1,4	1	0,9	–	–	1	0,6
Луговые сегетальные (ЛуС)	1	0,4	1	1,4	1	0,9	1	0,7	1	0,6
Прибрежно-водные (Пр)	1	0,4	–	–	–	–	–	–	1	0,6
Общее количество видов	225	–	74	–	117	–	137	–	168	–

Эколого-ценотическое распределение видов по линии трансект (распределение по секторам) выглядит следующим образом:

Сектора 1L, 1R. Основными являются представители сегетально-рудеральной (СР) и луговой (Лу) растительности. Их доля в фитоценозе составляет 36,5 %. Довольно часты и обильны сегетало-рудералы (СР) *Chenopodium album* L., *Ch. glaucum* L. и *Setaria viridis* (L.) P. Beauv. Среди луговых растений постоянно встречаются *Achillea millefolium* L. s.l., *Festuca rubra* L. и *Poa pratensis* L. Следует отметить нетипичное произрастание на территории, испытывающей самое выраженное антропогенное воздействие, единственного лесного вида – *Poa nemoralis* L.; его наличие и поддержание в фитоценозе вызвано прилегающим к дорожному полотну лесным массивом.

Сектора 2L, 2R. Условия частого переувлажнения почвы и ее обогащения гумусом и минеральными соединениями в результате водной эрозии со склонов придорожной насыпи в определенной степени положительно влияют на преобладание луговых (Лу) и лугово-рудеральных (ЛуР) видов. Наибольшее распространение получили: *Dactylis glomerata* L., *Vicia cracca* L., *Lolium perenne* L. и *Galium album* Mill. Также встречаются виды заболоченных местообитаний (Луб, ЛубЛеС, ЛуЛеБ): *Juncus effusus* L., *Lysimachia vulgaris* L. и *Stellaria palustris* L.

Сектора 3L, 3R. Удаление от дорожного полотна и приближение к естественным фитоценозам приводят к снижению количества терофитов и эксплерентов и резкому возрастанию видов естественных луговых (Лу) и лесных (Ле) сообществ до 35 %. Повсеместно отмечаются такие виды, как *Betula pendula* Roth, *Centaurea jacea* L., *Schedonorus pratensis* Huds. и *Solidago virgaurea* L. Также большое количество видов ЛуР и Р групп: *Lactuca serriola* L., *Medicago lupulina* L. и *Leontodon autumnalis* (L.) Moench. Среди видов, занесенных случайно или используемых в озеленении – культивируемые (К), встречаются *Cerasus vulgaris* Mill., *Cotoneaster lucidus* Schltldl. и *Cornus alba* L.

Сектора 4L, 4R. Растительность данных секторов самая богатая по видовому составу. Наблюдается межвидовая конкуренция растений типичных лесных (Ле) и луговых (Лу) сообществ с растениями сегетальной и рудеральной групп (ЛуР, Р, СР, РС и С). Также присутствует культивируемый рудеральный (КР) вид *Rosa pendulina* L. Встречается единственный прибрежно-водный вид (Пр) – *Salix purpurea* L.

Дополнительно эколого-ценотические группы растений были распределены на 3 основные фракции: сорная фракция представлена видами, характерными только для сегетально-рудеральных территорий (Р, РС, СР, С); переходная фракция состоит из растений, встречающихся на нарушенных, а также естественных луговых, лесных и болотных территориях; дополнительно включены культивируемые виды (ЛуР, ЛуС, ЛуРС, ЛуСР, ЛуЛеР, ЛуЛеС, ЛуЛеРС, ЛеР, ЛеСР, БР, ЛубЛеС, К, КР); типичная, или естественная фракция характеризуется наличием исключительно лесных, луговых, болотных и прибрежно-водных видов (Ле, Лу, ЛуЛе, ЛеБ, Луб, ЛуЛеБ и Пр) (рис. 4–5).

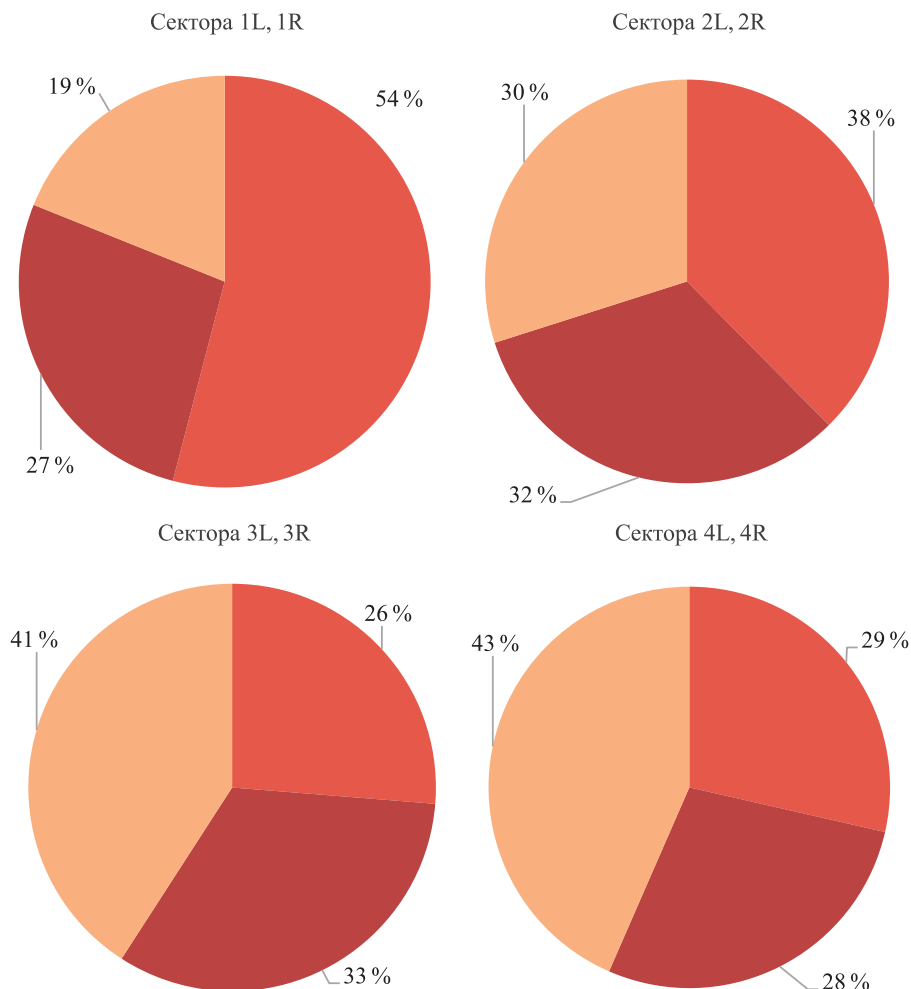


Рис. 4. Процентное соотношение трех фракций растений для каждой группы секторов: красный – сорная фракция, оранжевый – переходная фракция, зеленый – типичная фракция

Fig. 4. The percentage of three plant fractions for each group of sectors: red – weed fraction, orange – transitional fraction, green – natural fraction

Как следует из рис. 4, процентное соотношение сорных видов постепенно уменьшается за счет увеличения переходной и типичной фракций с учетом приближения к естественным сообществам растений, однако ее видовое количество значительно не изменяется и сохраняется в пределах 36–48 видов (рис. 5).

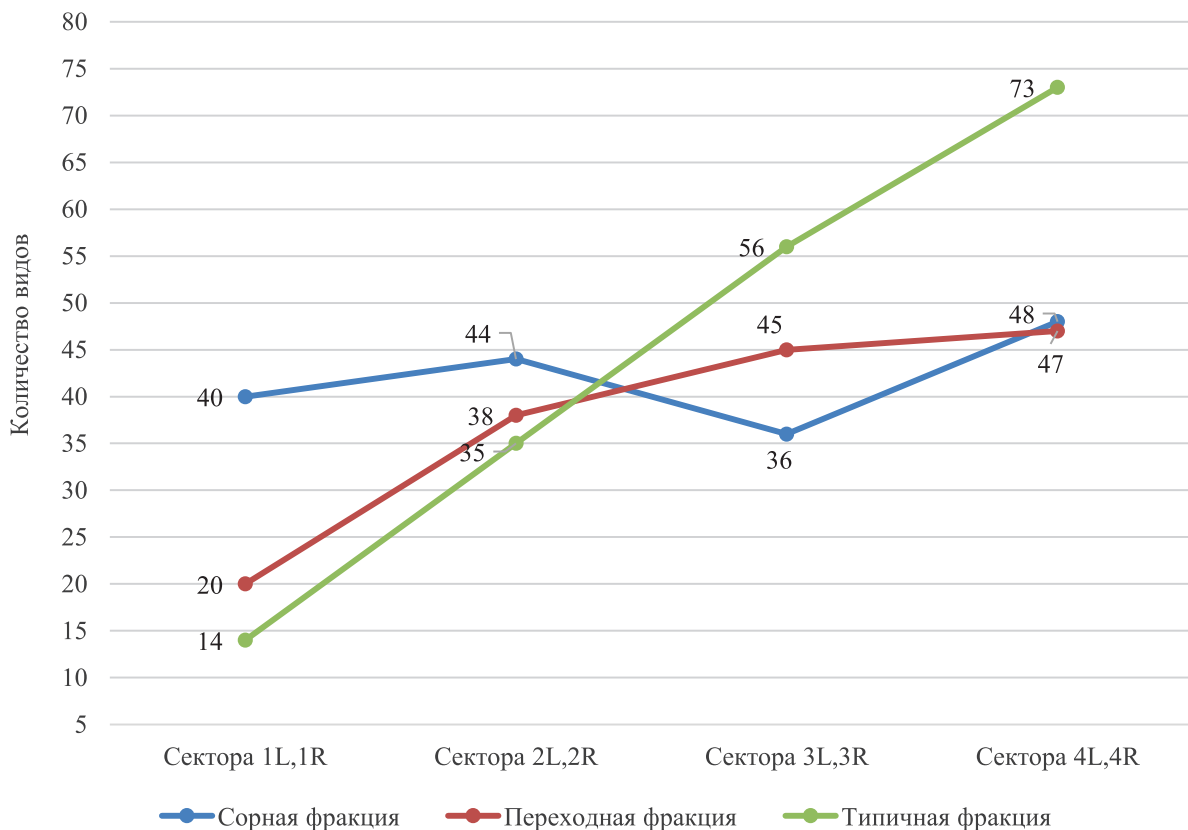


Рис. 5. Динамика придорожной растительности по фракциям видов

Fig. 5. Dynamics of roadside vegetation by species fractions

Следует отметить минимальное процентное увеличение сорной фракции (сектора 4L, 4R) за счет снижения переходной, что, вероятно, вызвано влиянием прилегающих агрофитоценозов и временно незасеваемых полей (10 из 20 участков наблюдений), а также наличием противопожарной полосы как места внедрения сегетально-рудеральной растительности между лесным массивом и полосой отвода (6 из 20 участков наблюдений) (рис. 4).

Упомянутое процентное снижение переходной фракции в секторах 4L и 4R также характеризуется сложной межвидовой конкуренцией с растениями увеличивающейся типичной (наиболее характерно для лесной местности) и высокоактивными видами сорной фракций (*Solidago canadensis* L., *Conyza canadensis* (L.) Cronq. и *Lupinus polyphyllus* Lindl.), вероятно, из-за меньшего количества кошений за сезон (рис. 4, 5).

Если ранее говорилось о постепенном снижении доли видов рудерально-сегетальной принадлежности, то на рис. 5 показано такое увеличение их количества, как и видов других фракций (особенно для лесных сообществ). Однако их увеличение (сорная фракция) не так значительно при удалении от дорожного полотна по сравнению с представителями типичной фракции.

Заключение

Таким образом, придорожная растительность г. Минска и его окрестностей отличается значительным разнообразием сегетально-рудеральных, луговых, лесных и болотных видов. В полосе отвода выявлено 225 видов сосудистых растений. Наибольшее количество видов имеют семейства Asteraceae, Rosaceae, Fabaceae и Rosaceae, что характерно для исследованных фитоценозов. Преобладание гемикриптофитов и терофитов по сравнению с другими биоморфами подтверждается антропогенно измененными эдафическими условиями и регулярным кошением придорожной полосы.

Наличие таких придорожных конструкций, как кюветы (водоотводящая функция) и склоны выемки, увеличивают разнообразие придорожной флоры – появляются растения переувлажненных и типичных

ксерофитных территорий. Отмечается явное снижение флористического состава в зависимости от приближения к дорожной полосе.

Выявлено снижение доли сеgetальных и рудеральных видов, а также увеличение количества видов естественной флоры с удалением от дорожной полосы. Так, если количество видов типичной (естественной) и сорной фракций в секторах 1L, 1R было, соответственно, 14 и 40, то в секторах 4L, 4R – уже 73 и 48.

Культивирование растений, постоянное движение автомобилей и трансграничный поток грузов по автомобильным дорогам положительно влияют на распространение сорных растений, среди которых встречаются заносные и опасные виды, в частности, *Heracleum sosnowskyi* Manden. Из адвентов наиболее часты и обильны *Solidago canadensis* L., *Conyza canadensis* (L.) Cronq. и *Lupinus polyphyllus* Lindl. Они распространяются не только на нарушенных территориях, но и расширяют свою экспансию на отдаленных от автомобильной дороги участках.

Библиографические ссылки

1. Орлов ДС, Садовникова ЛК, Лозановская ИН. *Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении*. Москва: Высшая школа; 2002. 334 с.
2. Сцепановіч ЯМ, Ганцоўская МА. Сінтаксанамічная структура і экалагічны стан прыдарожных фітацэнозаў г. Мінска. У: *Антропогенная трансфармацыя ландшафтаў*. Мінск: БДПУ: 2012. с. 122–124.
3. Куликова ЕЯ. Эколого-флористические особенности синантропной растительности г. Минска. *Вестні НАН Беларусі. Серыя біялагічных навук*. 2010;2:13–18.
4. Судник АВ, Вознячук ИП. Последствия воздействия загрязнения придорожных территорий компонентами солевых реагентов на экологическое состояние почвы и растений в лесных биогеоценозах. *Лесной вестник*. 2020;2(6):83–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-83-95
5. Масловский ОМ, и др. Государственный кадастр растительного мира Республики Беларусь. Основы кадастра. Первичное обследование 2002–2017 гг. Минск: Беларуская навука; 2019. 599 с.
6. Сцепановіч ЯМ. Трансект-метад як аснова маніторынгу раслінных экасістэм (з нямецкага досведу). У: *Міжнародны экалагічны досвед і яго выкарыстанне на Беларусі. Зборнік навуковых артыкулаў* [International Environmental Experience: Applications for Belarus]. Віцебск: ВФ УА ІСВ; 2003. с. 226–230.
7. Сцепановіч ЯМ. Фітацэнаразнастайнасць расліннасці Беларусі. *Ботаника (исследования)*. 200;34:264–281.
8. Миркин ВМ. *Классификация растительности СССР (с использованием флористических критериев)*. Москва: Издательство Московского университета; 1986. 200 с.
9. Никитин ВВ. *Сорные растения флоры СССР*. Ленинград: Наука; 1983. 454 с.
10. Raunkiaer C. *The life forms of plants and statistical plant geography*. Oxford: Clarendon Press; 1934. 632 p.
11. Бекетова ОА, Старикова ЕА. Анализ распределения видов сорных растений на сеgetальных и рудеральных местообитаниях. *Вестник КрасГАУ: Сельскохозяйственные науки*. 2016;11:3–9.
12. *Красная книга Республики Беларусь. Растения: редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды дикорастущих растений*. 4-е издание. Минск: Беларус. Энцыкл. імя П. Броўкі; 2015. 448 с.

References

1. Orlov DS, Sadovnikova LK, Lozanovskaya IN. *Ekologiya i ohrana biosfery pri khimicheskom zagryaznenii* [Ecology and protection of the biosphere in case of chemical pollution]. Moscow: Higher School; 2002. 334 p. Russian.
2. Stepanovich YM, Gantsovskaya MA. *Sintaksanamichnaja struktura i ekalahichny stan prydarozhnych fitacenozaŭ h. Minska* [Syntaxonomic structure and ecological state of roadside phytocenoses of Minsk]. In: *Anthropogenic transformation of landscapes*. Minsk: BDPU; 2012. p. 122–124. Belarusian.
3. Kulikova EYa. Ecological and floristic features of synanthropic vegetation of Minsk. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Sciences Serie*. 2010;2:13–18. Russian.
4. Sudnik AV, Voznyachuk IP. Consequences of pollution on roadside territories by salt reagents on soil and plants ecological state in forest biogeocenoses. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin]. 2020;2(6):83–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-83-95. Russian.
5. Maslovsky OM, et al. State Cadastre of Flora of the Republic of Belarus. Basics of cadastre. Primary survey 2002–2017 Minsk: Belaruskaja Navuka; 2019. 599 p. Russian.
6. Stepanovich YM. Transect method as a basis for monitoring plant ecosystems (from the German experience). In: *Mizhнародny ekalahichny dosvied i jaho vykarystannie na Bielarusi* [International ecological experience and its use in Belarus]. Vitsebsk: VF UA ISV; 2003. p. 226–230. Belarusian.
7. Stepanovich YM. Phytocenidiversity of vegetation of Belarus. *Botanika (issledovaniya)* [Botany (research)]. 200;34:264–281. Belarusian.
8. Mirkin VM. *Klassifikatsiya rastitel'nosti SSSR (s ispol'zovaniem floristicheskikh kriteriyev)* [Classification of vegetation of the USSR (using floristic criteria)]. Moscow: Moscow University Press; 1986. 200 p. Russian.
9. Nikitin VV. *Sornyye rasteniya flory SSSR* [Weeds of flora of the USSR]. Leningrad: Nauka; 1983. 454 p. Russian.
10. Raunkiaer C. *The life forms of plants and statistical plant geography*. Oxford: Clarendon Press; 1934. 632 p.
11. Beketova OA, Starikova EA. Analysis of the distribution of weed species in segetal and ruderal habitats. *Vestnik KrasGAU. Agriculture sciences*. 2016;11:3–9. Russian.
12. *Krasnaya kniga Respubliki Belarus'. Rasteniya: redkiye i nakhodyashchiesya pod ugrozoy ischeznoveniya vidy dikorastushchikh rasteniy* [Red Book of the Republic of Belarus. Plants: rare and endangered species of wild plants]. 4th edition. Minsk: Belarus. Entsykl. imia P. Brovki; 2015. 448 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 25.01.2022.
Received by editorial board 25.01.2022.

УДК 504.5:549.25/.29:594.1:556.5(476.2-2)Гомель)

АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ МЯГКИХ ТКАНЕЙ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ В ВОДОЕМАХ Г. ГОМЕЛЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Т. В. МАКАРЕНКО¹⁾, А. В. ХАДАНОВИЧ¹⁾, О. В. ПЫРХ¹⁾, А. С. ПАРФЕНКОВА¹⁾

¹⁾Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины,
ул. Советская, 104, 246028, г. Гомель, Беларусь

В настоящее время особое значение приобретают наблюдения за компонентами водных экосистем – гидробионтами и донными отложениями, обладающими способностью к депонированию загрязняющих веществ. Актуальными являются комплексные исследования поведения тяжелых металлов в водных экосистемах, которые позволяют давать интегральную оценку состояния водного объекта, определять вероятность вторичного загрязнения, выяснять пути миграции загрязняющих веществ. В статье рассмотрены вопросы, посвященные анализу количественных данных по содержанию тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий. Получен массив данных за период исследований 2010–2021 гг., на основании которого обоснован выбор перловицы (*Unio pictorum* L.) обыкновенной в качестве объекта мониторинговых исследований экологического состояния водных объектов. Изменение содержания меди, свинца и никеля в тканях изучаемых видов моллюсков с 2010 по 2021 г. свидетельствует об изменении физико-химических условий в изучаемых водоемах, а также содержания биологически доступных форм металлов в воде и донных отложениях водных экосистем. Данный факт подтверждает наличие различных путей поступления тяжелых металлов в организм разных видов двустворчатых моллюсков, а также доступности соединений металлов в компоненты одной и той же водной экосистемы для разных видов моллюсков. В результате проведения анализа массива данных, полученных с 2010 по 2021 г., авторы определили фоновые концентрации содержания тяжелых металлов в тканях перловицы обыкновенной, обитающей в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий: для свинца – 0,17 мг/кг, цинка – 19,20 мг/кг, меди – 0,71 мг/кг, марганца – 1084,22 мг/кг, кобальта – 0,25 мг/кг, хрома – 0,71 мг/кг, никеля – 0,95 мг/кг. Показаны закономерности изменения количественного содержания тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков.

Ключевые слова: тяжелые металлы; перловица обыкновенная; беззубка двустворчатая; донные отложения; водоемы; водотоки; медь; цинк; хром; никель; свинец; марганец; ряды содержания.

Благодарность. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограмма 1 «Природные ресурсы и их рациональное использование», задание «Природные ресурсы и окружающая среда 1.02», тема «Комплексная оценка экологического состояния и выявление пространственно-временных изменений водных экосистем урбанизированных территорий (на примере юго-восточной части Беларуси)».

Образец цитирования:

Макаренко ТВ, Хаданович АВ, Пырх ОВ, Парфенкова АС. Анализ загрязнения тяжелыми металлами мягких тканей двустворчатых моллюсков в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;2:39–47.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-39-47>

For citation:

Makarenko TV, Khadanovich AV, Pyrkh OV, Parfenkova AS. Analysis of heavy metal contamination of soft tissues of bivalve mollusks in water bodies of Gomel and adjacent territories. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;2:39–47. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-39-47>

Авторы:

Татьяна Викторовна Макаренко – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры химии.
Альбина Викторовна Хаданович – кандидат химических наук, доцент; доцент кафедры химии.
Ольга Викторовна Пырх – старший преподаватель кафедры химии.
Анастасия Сергеевна Парфенкова – студентка биологического факультета.

Authors:

Tatyana V. Makarenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of chemistry.
tmakarenko1968@bk.ru
Albina V. Khadanovich, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of chemistry.
hadanovich@gsu.by
Olga V. Pyrkh, senior lecturer at the department of chemistry.
korytko@gsu.by
Anastasia S. Parfenkova, sstudent at the faculty of biology.
n.parfenkova@mail.ru

ANALYSIS OF HEAVY METAL CONTAMINATION OF SOFT TISSUES OF BIVALVE MOLLUSKS IN WATER BODIES OF GOMEL AND ADJACENT TERRITORIES

T. V. MAKARENKO^a, A. V. KHADANOVICH^a, O. V. PYRKH^a, A. S. PARFENKOVA^a

*^aFrancisk Skorina Gomel State University,
104 Saveckaja Street, Gomel 246028, Belarus
Corresponding author: T. V. Makarenko (tmakarenko1968@bk.ru)*

Currently, observations of the components of aquatic ecosystems – hydrobionts and bottom sediments with the ability to deposit pollutants – are of particular importance. Comprehensive studies of the behavior of heavy metals in aquatic ecosystems are relevant and make it possible to provide an integral assessment of the state of the water body, determine the probability of secondary pollution, find out the migration paths of pollutants, and therefore their implementation is relevant. The article deals with the analysis of quantitative data on the content of heavy metals in the soft tissues of mollusks living in the reservoirs of Gomel and adjacent territories. An array of data was obtained for the period of research in 2010–2021, on the basis of which the choice of an ordinary pearl barley (*Unio pictorum* L.) as an object of monitoring studies of the ecological state of water bodies was justified. The change in the content of copper, lead and nickel in the tissues of the studied mollusk species during the period of research from 2010 to 2021 indicates a change in the physicochemical conditions in the studied reservoirs, as well as a change in the content of biologically accessible metal forms in water and bottom sediments of aquatic ecosystems. This fact confirms the presence of different routes of entry of heavy metals into the body of different species of bivalve mollusks, as well as the different availability of metal compounds in components of the same aquatic ecosystem for different species of mollusks. As a result of the analysis of the array of data obtained from 2010 to 2021, the authors determined the background concentrations of heavy metals in the tissues of common pearl barley living in the reservoirs of Gomel and adjacent territories: for lead – 0.17 mg/kg, zinc – 19.20 mg/kg, copper – 0.71 mg/kg, manganese – 1084.22 mg/kg, cobalt – 0.25 mg/kg, chromium – 0.71 mg/kg, nickel – 0.95 mg/kg. Patterns of change in the quantitative content of heavy metals in the soft tissues of molluscs are shown.

Keywords: heavy metals; common barley; bivalve toothless; bottom sediments; reservoirs; streams; copper; zinc; chromium; nickel; lead; manganese; content series.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the SPNI «Natural Resources and Environment», subprogram 1 «Natural Resources and their Rational Use», Task «Natural Resources and Environment 1.02», topic «Comprehensive assessment of the ecological state and identification of spatial and temporal changes in aquatic ecosystems of urbanized territories (on the example of the south-eastern part of Belarus)».

Введение

При проведении экологического мониторинга одним из приоритетных направлений являются исследования окружающей среды городов и близлежащих к ним территорий, так как деятельность промышленно-индустриальных центров приводит к деградации, а иногда и к полному уничтожению природных экосистем. Негативное воздействие города на природную среду находится в прямой зависимости от уровня развития промышленных предприятий и их функционирования. Немаловажное значение имеют источники и формы поступления поллютантов [1–3]. Антропогенные источники загрязнения оказывают значительное влияние на накопление тяжелых металлов в водных экосистемах. В связи с этим одной из актуальных задач является изучение распределения загрязнителей и уровня их накопления с целью установления механизмов их миграции в водную среду, получения необходимой информации для использования прибрежных территорий в качестве рекреационных зон. В последние годы серьезную озабоченность вызывает повышение уровня тяжелых металлов, обнаруживаемых в донных отложениях и гидробионтах [4]. В связи с этим большой интерес представляет изучение состояния организмов, обитающих на территориях с повышенным антропогенным влиянием.

Техногеохимические аномалии чаще всего отмечаются в районах водных артерий, дренирующих города, и водоемов городской зоны. В городах имеется категория водных объектов, которые не имеют определенного статуса и используются неконтролируемо. Малые водоемы и водотоки городов не включены в систему мониторинга поверхностных вод, они практически не контролируются санитарно-эпидемиологическими службами. Особенности функционирования экосистем такого типа в условиях урбанизированных территорий исследованы недостаточно и, следовательно, неясны перспективы их дальнейшего сосуществования с городскими ландшафтами. До недавнего времени система контроля за состоянием водных объектов базировалась только на анализе водной среды. Однако динамичность и вариабельность содержания химических элементов в воде значительно снижают информативность

данных. Поэтому к наиболее актуальным проблемам Национальной системы мониторинга окружающей среды относятся проблемы расширения методологической базы контролируемых сред, позволяющие реализовать принципы экосистемного подхода к охране окружающей среды. Все большее значение приобретают наблюдения за компонентами водных экосистем (в том числе гидробионтами и донными отложениями), обладающими способностью к депонированию загрязняющих веществ [5].

Комплексные исследования в области поведения тяжелых металлов в водных экосистемах позволяют давать интегральную оценку состояния водного объекта, определять вероятность вторичного загрязнения, выяснять пути миграции загрязняющих веществ. В отдельных исследованиях показано [6; 7], что в моллюсках по сравнению с другими гидробионтами отмечается наибольшее накопление большинства тяжелых металлов. Моллюски как бентосные организмы обладают повышенной восприимчивостью на загрязнение водных экосистем и, прежде всего, донных отложений.

Цель исследования – мониторинговое исследование загрязнения тяжелыми металлами мягких тканей двустворчатых моллюсков в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий, установление фоновых концентраций для мягких тканей перловицы обыкновенной водоемов изучаемого региона.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны представители класса двустворчатых моллюсков – перловица обыкновенная – *Unio pictorum* L. и беззубка обыкновенная – *Anodonta cygnea* L., образцы которых отбирались в летний период (июль – август) в водоемах и водотоках г. Гомеля и прилегающих территорий, а также р. Сож. Выбранные водоемы с близкими физико-географическими условиями (географическое положение, климат, почвы, геологическое строение, растительность), но с существенным различием в степени и специфике хозяйственного освоения и техногенной нагрузки.

Водоемы Дедно, Шапор, Любенское, Малое, У-образное, Волотовское располагаются на территории города. В пригородной зоне отдыха находятся озера Володькино и Гребной канал. Озера Любенское, Дедно, Шапор и старица вблизи д. Поляновка – это пойменные водоемы, не утратившие связь с коренным руслом р. Сож. Гребной канал, связанный с р. Сож, – водоем, искусственно созданный для отвода излишка воды в половодье от д. Якубовка. Озеро Володькино – русловой водоем, возникший в результате расширения коренного русла р. Сож в месте впадения в него р. Ипуть. Озера Малое и Круглое – водоемы, образовавшиеся на месте карьеров по добыче глины, а озера Волотовское и У-образное некоторое время имели связь с р. Сож и остались после осушительной мелиорации в виде отдельных водоемов.

Для оценки влияния Гомельской городской агломерации на качество воды р. Сож и способности реки к самоочищению выполнялся отбор проб из реки выше города в районе д. Кленки, в городской черте в районе парковой набережной и ниже административной черты города по течению в районе Гомельского объездного моста. Старица у д. Поляновка расположена на 10 км выше по течению от точки отбора проб на р. Сож у д. Кленки (рис. 1, 2).

Изучаемые водоемы отличаются различным гидрологическим режимом. Озера Малое, Круглое, У-образное, Волотовское являются полностью замкнутыми непроточными водоемами. Имеющие выход в р. Сож озера Шапор, Дедно, Любенское, Гребной канал обладают неодинаковой степенью проточности в зависимости сезона, которая достигает своего максимума во время половодий. Для оз. Володькино, которое представляют собой расширение русла реки, характерна наибольшая скорость течения. Глубина водоемов существенно колеблется: от 1 до 6–8 м [8] в Гомеле глубина водоемов после добычи песка достигает 10–19 м.

Организованные выпуски промышленных и хозяйственно-бытовых стоков производятся только в оз. Дедно (Прудковский и Хатаевичский коллекторы, принимающие стоки нескольких автопредприятий, фабрики «Спартак», речного порта и др.). Все водоемы г. Гомеля в той или иной степени могут быть являться объектом насанкционированного поступления загрязняющих веществ. В оз. Роповское осенью 2021 г. отмечен массовый мор рыбы, произошедший вследствие загрязнения акватории водоема.

Оз. Володькино принимает воду р. Ипуть, в которую выше по течению поступают стоки предприятий г. Добруша. На участке реки выше города по течению (д. Кленки) вдоль берега располагается большое количество дачных участков, огороды которых в отдельных случаях подходят близко к обрывистому берегу, что дает возможность поверхностному стоку беспрепятственно поступать в реку. В парковой зоне водоток принимает стоки ливневых канализаций города, а также поверхностный сток с территории Гомельского городского порта. На участке ниже парковой зоны и до административной черты города р. Сож принимает воду из оз. Шапор и нескольких речных заливов, что может являться дополнительным источником загрязнения речной системы.

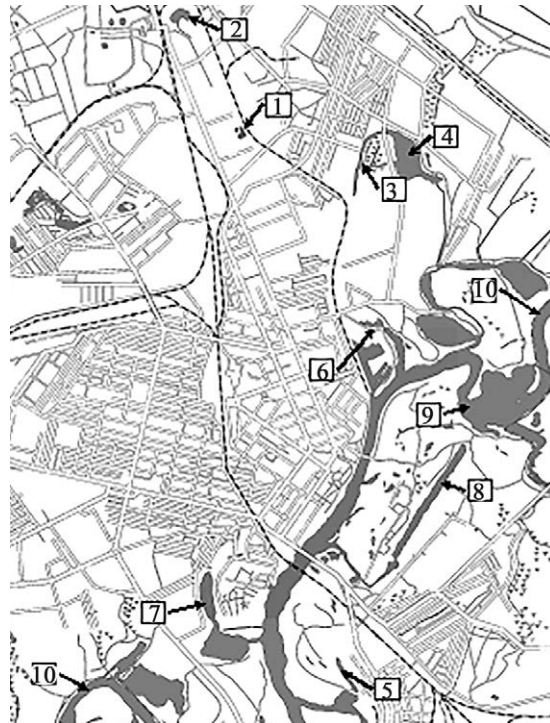


Рис. 1. Схема расположения водоемов г. Гомеля: 1) оз. Малое; 2) оз. Круглое; 3) оз. У-образное; 4) оз. Волотовское; 5) оз. Шапор; 6) оз. Дедно; 7) оз. Любенское; 8) гребной канал; 9) оз. Володькино; 10) р. Сож

Fig. 1. The layout of the reservoirs of Gomel: 1) Maloye; 2) Krugloye; 3) U-obraznoye; 4) Volotovskoye; 5) Shapor; 6) Dedno; 7) Lyubenskoye; 8) Grebnoy kanal; 9) Volodkino; 10) Sozh

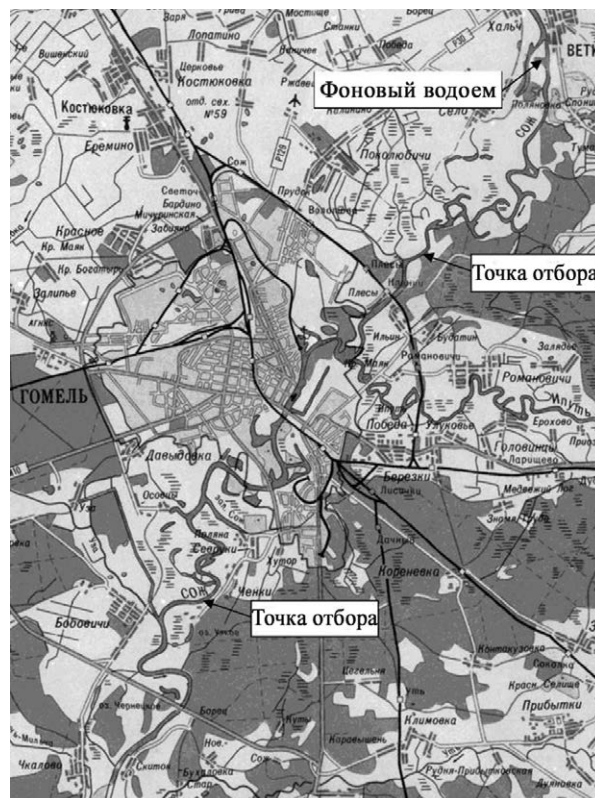


Рис. 2. Схема отбора проб (точки отбора проб представляют собой участки р. Сож в районе д. Кленки и ниже административной черты города по течению в районе Гомельского обьездного моста)

Fig. 2. Sampling scheme (sampling points are sections of r. Sozh in the area of the village of Klenka and below the administrative line of the city downstream in the area of the Gomel bypass bridge)

В оз. Шапор поступают поверхностный сток с территории предприятий ОАО «Гомельдрев», ЧПУП «Фанерно-спичечный комбинат» и «Гомельобои». В оз. Малое поступает поверхностный сток с территории троллейбусного парка № 1 и проходящих вдоль берега железной дороги и оживленной автомагистрали. Можно предположить о поступлении в оз. Малое ливневых либо других стоков, так как в озеро встроена труба, из которой в водоем постоянно поступает вода. Несмотря на то, что оз. Круглое находится практически в пригороде, вдоль берега водоема проходит железная дорога и оживленная автомагистраль. Кроме того, учитывая расположение водоема (узкая часть озера, так называемый «хвост», подходит прямо к ул. Федюнинской): в оз. Круглое может поступать поверхностный сток с ул. Федюнинской, где расположены промышленные предприятия города.

Вдоль береговой линии водоемов У-образное и Волотовское расположены крупные городские автомагистрали и остановки городского транспорта. На берегу оз. У-образное располагается рынок «Прудковский». На отдельных участках берегов Гребного канала практически к урезу воды подходят огороды частного сектора и подворья жителей д. Якубовка. Такая же ситуация наблюдается по берегам оз. Любенское с той лишь разницей, что по берегам последнего расположен частный сектор 5-го микрорайона г. Гомеля и вдоль берега идут автомагистрали города. В оз. Любенское также, как и в оз. Малое, встроена труба, по которой, вероятно, сбрасываются в водоем ливневые стоки.

Влиянию выбросов в атмосферу предприятий Северного промузла подвержены озера Малое, Круглое, У-образное и Волотовское. Территория между водоемами обычно не спланирована, хотя имеется положительный опыт адаптации таких водоемов для рекреации. Все без исключения городские водоемы и водоемы пригородной зоны используются для рыбной ловли, отчасти полива и купания.

Определение содержания тяжелых металлов в пробах проводилось на базе Государственного научного учреждения «Институт радиобиологии НАН Беларуси» на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой с пробоподготовкой образцов в системе микроволнового вскрытия.

Статистическая обработка осуществлялась с помощью *Microsoft Office Excel 2007*. Проведен парный двухвыборочный t-тест для средних, в результате которого гипотеза о достоверности различий между содержанием металлов в мягких тканях моллюсков разных видов различных водоемов подтвердилась, что указывало о наличии высокой достоверности отличий между выборками при уровне значимости $p = 0,01$.

Результаты исследования и их обсуждение

У водных организмов обнаруживаются специфические черты, связанные с особенностями их существования в воде, в том числе и в проявлении откликов на воздействие различных токсикантов, включая тяжелые металлы. В организм гидробионтов тяжелые металлы попадают с пищей или через покровы. Токсичное действие тяжелых металлов на живые организмы проявляется на всех уровнях организации биологических систем – от молекулярно-биохимического до биоценотического. Они являются протоплазматическими ядами для всех живых объектов: грубо нарушают структуры коллоидных систем, денатурируют белки. При очень большом разведении тяжелые металлы связывают и блокируют активные центры ферментов [4]. Двустворчатые моллюски имеют фильтрационный тип питания, они питаются либо мелкими планктонными организмами, фильтруя большое количество воды, либо детритом. Пищевые частицы вместе с током воды, который вызывается работой микроскопических ресничек, покрывающих изнутри мантийные складки и некоторые органы мантийной полости, засасываются через вводный сифон в мантийную полость и с помощью тех же ресничек подводятся к ротовому отверстию, попадают в пищевод и далее в желудок. Они также ощупывают субстрат с помощью пары щупалец, образуемых краем мантии. Щупальца покрыты слизью и снабжены ресничками. Щупальца собирают со дна пищевые частицы и сортируют их, отбрасывая слишком крупные и направляя остальные в рот.

С целью обоснования выбора перловицы (*Unio pictorum* L.) обыкновенной в качестве объекта мониторинговых исследований экологического состояния водных объектов, расположенных на территории г. Гомеля и прилегающих к городу территорий, проведен сравнительный анализ большого объема экспериментальных данных по содержанию тяжелых металлов в тканях двух видов двустворчатых моллюсков – перловицы обыкновенной (*Unio pictorum* L.) и беззубки обыкновенной (*Anodonta cygnea* L.), полученного с 2010 по 2021 г. На рис. 3 представлены результаты количественного определения тяжелых металлов в мягких тканях двустворчатых моллюсков за период исследования.

Из семи изучаемых металлов с 2010 по 2021 г. только содержание меди в мягких тканях беззубки в 1,3 раза превышало концентрации этого же металла в сравнении с тканями перловицы и различия не являлись достоверными. Беззубка накапливала в тканях значительно больше никеля и свинца, чем перловица (полученные данные согласуются исследованиями ряда авторов (табл. 1)). Изменение содержания меди, свинца и никеля в тканях изучаемых видов моллюсков свидетельствует об изменении физико-химических условий в изучаемых водоемах, а также об изменении содержания биологически доступных форм

металлов в воде и донных отложениях водных экосистем. Данный факт подтверждает наличие различных путей поступления тяжелых металлов в организм разных видов двустворчатых моллюсков, а также о разной доступности соединений металлов в компоненты одной и той же водной экосистемы для разных видов моллюсков.

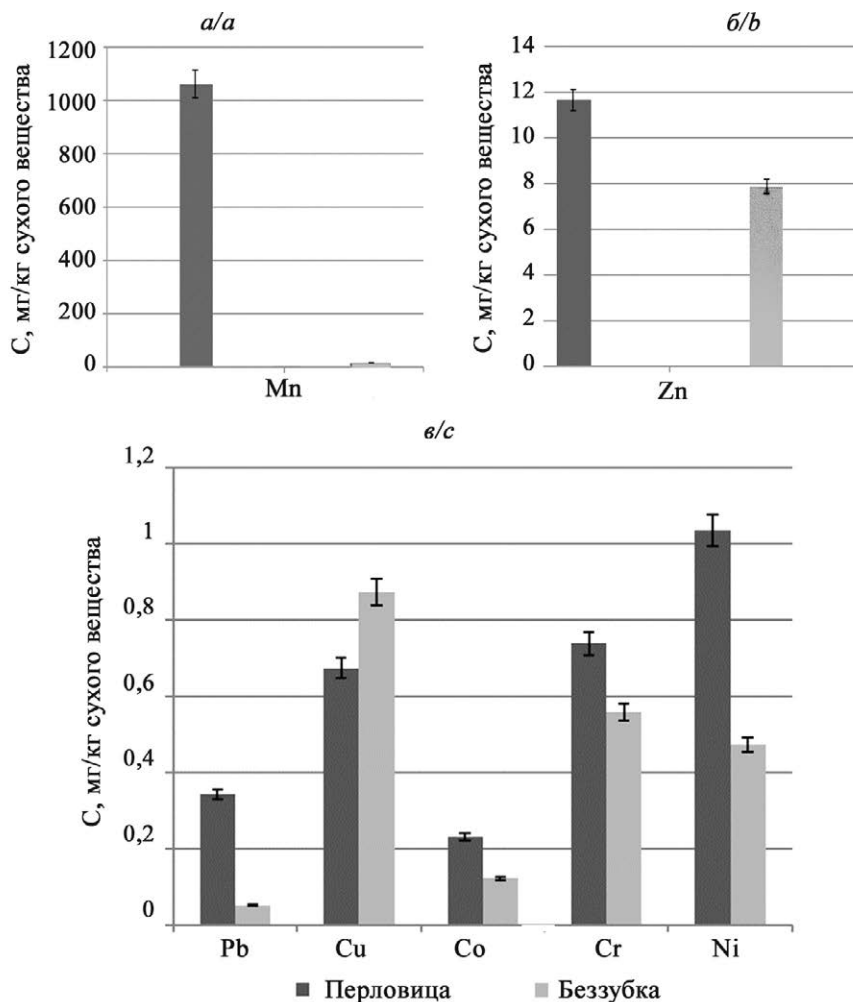


Рис. 3. Содержание тяжелых металлов в тканях беззубки и перловицы в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий (усредненные значения за 2010–2021 гг.): а – Mn; б – Zn; в – Pb, Cu, Co, Cr, Ni

Fig. 3. The content of heavy metals in the tissues of toothless and pearl barley in the reservoirs of Gomel and adjacent territories (averaged values in the period 2010–2021): a – Mn; б – Zn; в – Pb, Cu, Co, Cr, Ni

Таблица 1

Содержание (мг/кг сухого вещества) тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков [5; 11]

Table 1

Content (mg/kg of dry matter) of heavy metals in soft tissues of mollusks [5; 11]

Вид	Металлы						
	Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Ni	Pb
<i>Anodonta cygnea</i> L.*	9,62 ± 0,76	146,82 ± 10,28	2 431,97 ± 218,88	0,57 ± 0,05	1,33 ± 0,1	3,58 ± 0,32	1,80 ± 0,16
<i>Unio pictorum</i> L.*	11,11 ± 0,99	209,70 ± 16,78	2 518,28 ± 251,83	0,70 ± 0,05	1,94 ± 0,16	1,94 ± 0,14	1,08 ± 0,09
Фоновое по Беларуси** [5]	2,1–15,0	10,0–45,0	320–901	–	0,21–3,0	2,0–15,0	–
Фоновое по России*** [9]	25,0	80,0–200,0	10,4–120,0	0,04–0,40	0,7	1,8	–

Примечание. *Собственные исследования; **слабозагрязненные водоемы Беларуси; ***слабозагрязненные водоемы России.

В большинстве исследуемых водоемов отлов беззубки был затруднительным, так как она обитает на более глубоких частях, чем перловица, и в значительно меньшем количестве. Все вышесказанное делает беззубку менее привлекательным объектом для экологического мониторинга загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами. Таким образом, (*Unio pictorum* L.) для качественной оценки состояния водоемов г. Гомеля и прилегающих к нему территорий была выбрана перловица обыкновенная.

При проведении экологических исследований важно иметь фоновые величины содержания тяжелых металлов в водоемах и гидробионтах для оценки загрязненности водных экосистем и определения доступности соединений тяжелых металлов в водных объектах. В период с 2000 по 2010 г. в качестве фонового был выбран водоем, не имеющий видимой антропогенной нагрузки и расположенный на расстоянии 10 км выше города по течению (старица р. Сож возле д. Поляновка), который загрязняется только воздушными массами города. Данный водоем имел тесный контакт с водой р. Сож. Как известно, загрязненные воздушные массы городских агломераций могут оказывать влияние на территории, удаленные на 20–25 км [10; 11], загрязняя ближайшие к городу территории. В донных отложениях и в мягких тканях моллюсков, обитающих в водоеме, выявлено минимальное или близкое к минимальному значению содержание соединений изучаемых металлов [12]. Однако с 2010 г., вследствие снижения количества атмосферных осадков, наблюдалась тенденция снижения уровня воды в р. Сож, с которой связана старица, и в самой старице. В результате водоем утратил связь с р. Сож, исчезло течение, появилось большое количество водных растений, а в донных отложениях увеличилось содержание органических фракций. Значения потерь при прокаливании, характеризующих содержание органического вещества, указывают на его увеличение в донных отложениях с 3 до 11 %.

Результаты исследований, проводимых с 2010 по 2019 г., показали, что содержание отдельных тяжелых металлов в моллюсках старицы в различные временные промежутки было сравнимо с концентрациями исследуемых соединений в особях, обитающих в городских водоемах, а в некоторых случаях даже превышало таковое. Объяснение данным фактам может быть следующим – в относительно «чистых» зонах живые организмы накапливают практически все доступные формы тяжелых металлов, тогда как на загрязненных территориях включается механизм блокировки, который предотвращает поступление значительной концентрации в живые организмы. Высока вероятность, что при изменившихся физико-химических условиях водоема в донных отложениях и воде старичного комплекса изменилась доступность тяжелых металлов компонентам водной экосистемы. В организм гидробионта поступление металлов происходит 2 путями: из воды через покровные ткани (сорбция на поверхности раковины), через желудочно-кишечный тракт в результате усвоения пищи.

Таким образом, абиотические факторы могут рассматриваться как агенты воздействия на организм в качестве причин экологического неблагополучия. Транспорт металлов через клеточную мембрану может быть пассивный и активный. При пассивном транспорте перенос происходит путем диффузии по градиенту концентрации, фильтрации через поры в мембранах. Если бы ионы, атомы или молекулы, поступившие в клетку, оставались во внутренней среде в свободном виде, то равновесие с внешней средой при пассивном поступлении по градиенту концентрации наступало бы относительно быстро, и внутреннее содержание вещества не было бы высоким. Если происходит внутриклеточное связывание агента, то концентрация свободного вещества в клетке остается низкой. Градиент поддерживается и, следовательно, поступление вещества продолжается, даже если общее его содержание в клетке многократно превышает концентрацию в окружающей среде [13]. Это является фактом вторичного загрязнения, когда тяжелые металлы переходят в доступные формы для биологических объектов.

В сложившихся условиях встал вопрос о необходимости определения фоновых уровней содержания тяжелых металлов в тканях моллюсков с целью сравнительного анализа при изучении загрязнения водных экосистем. Для установления фоновых концентраций тяжелых металлов в мягких тканях перловицы обыкновенной (*Unio pictorum* L.) был использован статистический метод¹. Согласно данному методу, отдельно в каждом выделенном периоде (сезоне) исключаются непоказательные экстремальные значения концентрации, затем рассчитывают средние значения концентрации тяжелых металлов в исследуемых образцах. Период с наибольшей средней концентрацией вещества принимают в рассматриваемой версии за основную фоновую величину.

В результате проведения анализа массива данных, полученных с 2010 по 2021 г., авторы определили фоновые концентрации содержания тяжелых металлов в тканях перловицы обыкновенной (*Unio pictorum* L.), обитающих в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий: для свинца – 0,17 мг/кг, цинка – 19,20 мг/кг, меди – 0,71 мг/кг, марганца – 1084,22 мг/кг, кобальта – 0,25 мг/кг, хрома – 0,71 мг/кг, никеля – 0,95 мг/кг.

Полученные данные по содержанию исследуемых тяжелых металлов в тканях моллюсков, обитающих в водоемах г. Гомеля, сравнили с результатами исследований, проведенных в 2010 г. (табл. 2).

¹ТКП 17.06-04-2012 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Правила установления фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Гідрасфера. Правілы ўстанаўлення фонавых канцэнтрацый хімічных рэчываў у вадзе водных аб'ектаў: введ. 17.06.2012. Минск: Госстандарт, 2012. 23 с.

Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в тканях перловицы в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий

Table 2

The content of heavy metals (mg/kg) in pearl barley tissues in the reservoirs of Gomel and adjacent territories

Год	Тяжелые металлы						
	Pb	Zn	Cu	Mn	Co	Cr	Ni
2010	1,08 ± 0,09	209,70 ± 18,87	11,11 ± 0,99	2518,28 ± 176,28	0,70 ± 0,05	1,94 ± 0,14	1,94 ± 0,16
2019	0,22 ± 0,02	24,83 ± 1,74	0,92 ± 0,06	1195,61 ± 95,65	0,26 ± 0,02	0,60 ± 0,05	0,96 ± 0,07
2020	0,44 ± 0,04	12,86 ± 0,9	0,67 ± 0,05	1060,13 ± 74,21	0,24 ± 0,02	0,74 ± 0,05	1,04 ± 0,09
2021	0,55 ± 0,04	37,19 ± 3,35	1,05 ± 0,07	1079,49 ± 97,15	0,49 ± 0,04	2,12 ± 0,15	3,19 ± 0,26

Изучая динамику содержания тяжелых металлов в тканях перловицы в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий с 2010 по 2021 г., следует отметить немонотонный характер варьирования концентраций изучаемых металлов. Так, для соединений цинка, меди, марганца и кобальта характерно значительное снижение содержания металлов с 2010 по 2020 г. в 16,3; 16,3; в 2,4; в 2,9 раза соответственно (различия являются достоверными). Далее прослеживается тенденция увеличения содержания цинка в 1,25 раза, меди – в 1,6; марганца – в 1,1; кобальта – в 2 раза в период с 2020 по 2021 г. (для марганца различия недостоверны).

Снижение концентраций металлов в тканях перловицы изучаемых водоемов отмечалось с 2010 по 2019 г. (все различия являются достоверными) для свинца в 4,9 раза; хрома – в 3,2; никеля – в 2 раза, что может быть обусловлено протеканием процессов самоочищения водоема и рядом других факторов. Например, известно, что основным источником поступления свинца и его соединений в окружающую среду являлись метилированный бензин и промышленные выбросы. В последние десятилетия в Республике Беларусь длительное время не использовался бензин с данными характеристиками, производственные выбросы в атмосферу сократились, а также в г. Гомеле отсутствуют предприятия, выбрасывающие соединения свинца в значительных количествах.

С 2019 по 2021 г. отмечена тенденция увеличения концентраций в тканях моллюсков свинца в 2,5 раза; хрома в 3,5; никеля в 3,3 раза, что свидетельствует об увеличении биологической доступности их форм в донных отложениях и изменениях внутриводоемных процессов, приводящих к доступности металлов для моллюсков, а также, вероятно, влиянием факторов вторичного загрязнения тяжелыми металлами. Различия в содержании соединений в тканях моллюсков являются достоверными.

Для соединений марганца отмечена тенденция снижения содержания металла в мягких тканях моллюсков на протяжении всего исследования. Двустворчатые моллюски являются активными концентраторами этого металла. Они постоянно накапливают его соединения в значительных количествах. Однонаправленное снижение концентрации металла свидетельствует как об отсутствии поступления соединений марганца в водоемы, так и о содержании их в донных отложениях в недоступных формах. Факт немонотонного характера варьирования содержания изучаемых металлов в мягких тканях моллюсков требует дальнейшего детального изучения.

Заключение

В ходе исследований установлено, что перловица обыкновенная (*Unio pictorum* L.) является приоритетным видом для качественной оценки состояния водоемов г. Гомеля и прилегающих к нему территорий.

Определены фоновые концентрации тяжелых металлов в тканях моллюсков за 2010–2021 гг. с целью сравнительного анализа при изучении загрязнения водных экосистем. Проведен анализ количественного содержания тяжелых металлов. Составлены ряды содержания тяжелых металлов в тканях перловицы:

2010 г.: Mn (2518) > Zn (209,7) > Cu (11,1) > Cr (1,9) > Ni (1,9) > Pb (1,0) > Co (0,7);

2019 г.: Mn (1195,6) > Zn (24,8) > Ni (1,0) > Cu (0,9) > Cr (0,6) > Co (0,3) > Pb (0,2);

2020 г.: Mn (1060,1) > Zn (12,9) > Ni (1,0) > Cr (0,7) > Cu (0,7) > Pb (0,4) > Co (0,2);

2021 г.: Mn (1079,5) > Zn (37,2) > Ni (3,2) > Cr (2,1) > Cu (1,1) > Pb (0,6) > Co (0,5).

Для указанных металлов отмечена тенденция к снижению содержания их соединений в тканях моллюсков, что свидетельствует об улучшении экологического состояния окружающей среды Гомельского региона, что связано с природоохранной политикой, проводимой в Республики Беларусь. Однако почвы, прилегающие к водным экосистемам и донным отложениям, накопили за длительное время значительные количества тяжелых металлов и могут служить вторичным источником загрязнения водных экосистем, что подтверждается повышением содержания всех изучаемых металлов в 2021 в сравнении с 2019 и 2020 годами. С учетом вышеприведенных фактов, быстрого очищения биологических компонентов водных экосистем в скором времени не ожидается.

Библиографические ссылки

1. Кадацкая ОВ, Санец ЕВ, Овчарова ЕП. *Гидрографическая сеть урбанизированных территорий как элемент формирования природного каркаса города*. В: Витченко АН и др. редакторы. Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии. Материалы VI Международной научной конференции. Минск: БГУ; 2018. с. 194–196.
2. Постева МА, Слуковский ЗИ. Анализ атмосферных выбросов в г. Мурманске и их связь с загрязнением городских озер. *Вестник МГТУ*. 2021;24(2):190–201.
3. Адаменко ВН. *Климат большого города*. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД; 1975. 70 с.
4. Силкина ЕН, Силкин ЮА, Силкин МЮ, и др. Влияние тяжелых металлов на функциональные и биохимические показатели морских гидробионтов как биоиндикаторов экологического состояния среды. *Современные проблемы науки и образования*. 2016;6:11.
5. Байчоров ВМ, Тищиков ГМ, Рощина НН. *Экологические риски и оценка состояния водотоков Беларуси*. Минск: Беларус. наука; 2006. 118 с.
6. Дерягин ВВ, Назаренко НН, Девятова ЕВ. Аккумуляция тяжелых металлов представителями семейства lymnaeidae как отклик на критические уровни техногенного загрязнения водоемов южного Урала. *Самарский научный вестник*. 2019;8(3):31–38.
7. Стеблевская НИ, Полякова НВ, Жадько ЕА, и др. Микроэлементный состав тканей некоторых видов гидробионтов залива Петра Великого (бухта Северная). *Вестник ДВО РАН*. 2013;5:127–132.
8. Хомич ВС, Какарека СВ, Кухарчик ТИ. *Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси*. Минск: Минсктиппроект; 2004. 260 с.
9. Никаноров АМ, Жулидов АВ. *Биомониторинг металлов в пресноводных системах*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1991. 312 с.
10. Давыдова НД, Шинкарева ГЛ, Касимов НС. *Выявление элементов-загрязнителей их нагрузки и распределение в объектах природной среды*. Иркутск: Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН; 2019. 44 с.
11. Михалевиц РВ и др. *Состояние природной среды Беларуси: ежегодное информационно-аналитическое издание*. Минск: Бел НИЦ «Экология»; 2020. 101 с.
12. Макаренко ТВ. *Распределение тяжелых металлов в биотических и абиотических компонентах водных экосистем Гомеля и прилегающих территорий* [автореферат диссертации]. Минск: [б. и.]; 2010. 28 с.
13. Гордеев ВВ. *Микроэлементы: Химия океана*. Москва: Наука; 1979. Том 1. с. 337–375.

References

1. Kadatskaya OV, Sanets EV, Ovcharova EP. *Gidrograficheskaja set' urbanizirovannyh territorij kak jelement formirovaniya prirodno karkasa goroda*. [Hydrographic network of urbanized territories as an element of the formation of the natural frame of the city]. In: Vitchenko AN, et al., editors. *Sovremennye problemy landshaftovedeniya i geojekologii. Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. [Modern problems of landscape science and geoecology: materials of the VI International scientific conference]. Minsk: BSU; 2018. p. 194–196. Russian.
2. Postevaya MA, Slukovsky ZI. *Analiz atmosferynyh vybrosov v g. Murmanske i ih svjaz' s zagrjazneniem gorodskih ozer*. [Analysis of atmospheric emissions in the city of Murmansk and their connection with the pollution of urban lakes]. *Vestnik MGTU*. [Bulletin of MSTU]. 2021;24(2):190–201. Russian.
3. Adamenko VN. *Klimat bol'shogo goroda*. [Big city climate]. Obninsk: VNIIGMI-MTsD; 1975. 70 p. Russian.
4. Silkina EN, Silkin YuA, Silkin MU, et al. *Vlijanie tjazhelyh metallov na funkcional'nye i biokhimicheskie pokazateli morskij gidrobiontov kak bioindikatorov jekologicheskogo sostojanija sredy*. [The influence of heavy metals on the functional and biochemical parameters of marine hydrobionts as bioindicators of the ecological state of the environment]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. [Modern problems of science and education]. 2016;6:11. Russian.
5. Baichorov VM, Tishchikov GM, Roshchina NN. *Jekologicheskie riski i ocenka sostojanija vodotokov Belarusi*. [Environmental risks and assessment of the state of watercourses in Belarus]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2006. 118 p. Russian.
6. Deryagin VV, Nazarenko NN, Devyatova EV. *Akkumuljacija tjazhelyh metallov predstaviteljami semejstva lymnaeidae kak otklik na kriticheskie urovni tehnogenogo zagrjaznenija vodoemov juzhnogo Urala*. [Accumulation of heavy metals by members of the lymnaeidae family as a response to critical levels of technogenic pollution of water bodies in the southern Urals]. *Samarskij nauchnyj vestnik*. [Samara Scientific Bulletin]. 2019;8(3):31–38. Russian.
7. Steblevskaya NI, Polyakova NV, Zhadko EA, et al. *Mikrojelementnyj sostav tkanej nekotoryh vidov gidrobiontov zaliva Petra Velikogo (buhta Severnaja)*. [Trace element composition of tissues of some hydrobiont species in Peter the Great Bay (Severnaya Bay)]. *Vestnik DVO RAN*. [Vestnik FEB RAS]. 2013;5:127–132. Russian.
8. Homich VS, Kakareka SV, Kuharchik TI. *Jekogeohimija gorodskih landshaftov Belarusi*. [Ecogeochemistry of urban landscapes of Belarus]. Minsk: Minsktipproekt; 2004. 260 p. Russian.
9. Nikanorov AM, Zhulidov AV. *Biomonitorng metallov v presnovodnyh sistemah*. [Biomonitoring of metals in freshwater systems]. Leningrad: Gidrometeizdat; 1991. 312 p. Russian.
10. Davydova ND, Shinkareva GL, Kasimov NS. *Ivyjavlenie jelementov-zagrjaznitelej ih nagruzki i raspredelenie v obektah prirodnoj sredy*. [Identification of pollutant elements of their load and distribution in the objects of the natural environment]. Irkutsk: Institute of Geography V. B. Sochava SB RAS; 2019. 44 p. Russian.
11. Mikhalevich RV, et al. *Sostojanie prirodnoj sredy Belarusi: ezhegodnoe informacionno-analiticheskoe izdanie*. [The state of the natural environment of Belarus: an annual information and analytical publication]. Minsk: BelNIC «Ecology»; 2020. 101 p. Russian.
12. Makarenko TV. *Raspredelenie tjazhelyh metallov v bioticheskij i abioticheskijh komponentah vodnyh jekosistem Gomelja i priliegajushhijh territorij* [Distribution of heavy metals in biotic and abiotic components of aquatic ecosystems of Gomel and adjacent territories] [PhD thesis]. Minsk: [publisher unknown]; 2010. 28 p. Russian.
13. Gordeev VV. *Mikrojelementy: Himija okeana* [Trace elements: Chemistry of the ocean]. Moscow: Nauka; 1979. Tom 1. p. 337–375. Russian.

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 539.163(546.36):630*164.4(630*176.321.5)

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ ¹³⁷Cs В ВЫСОКОВОЗРАСТНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ ОЛЬХИ ЧЕРНОЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Д. К. ГАРБАРУК¹⁾, А. В. УГЛЯНЕЦ¹⁾

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

Приводятся результаты изучения загрязнения ¹³⁷Cs древесины и коры ольхи черной в высоковозрастных насаждениях наиболее распространенных типов леса в ближней зоне Чернобыльской атомной электростанции. Определены параметры накопления радионуклида этими тканями по типам леса и в целом по формации. Установлена связь накопления ими ¹³⁷Cs с индексом почвенного увлажнения. Выявлены особенности распределения радионуклида в древесине деревьев по классам роста и развития по Крафту и по радиальному профилю ствола, а также в валежнике. Установлены корреляционные связи содержания данного радионуклида в древесине и коре с плотностью загрязнения почвы ¹³⁷Cs и расстоянием до места его выброса. Несмотря на высокие уровни загрязнения местности ¹³⁷Cs в спелых и перестойных насаждениях ольхи черной белорусскому нормативу РДУ/ЛХ-2001 для заготовки круглых лесоматериалов для строительства стен жилых зданий и топливной древесины соответствует неокоренная древесина в 7,7 % насаждений, для заготовки прочих круглых лесоматериалов – в 26,9 %.

Ключевые слова: ольха черная; древесина; кора; загрязнение радиоактивное; ¹³⁷Cs; зона отчуждения; Чернобыльская атомная электростанция.

Образец цитирования:

Гарбарук ДК, Углынец АВ. Загрязнение древесины и коры ¹³⁷Cs в высоковозрастных насаждениях ольхи черной в ближней зоне Чернобыльской атомной электростанции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;2:48–58.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-48-58>

For citation:

Garbaruk DK, Uglyanets AV. Wood and bark ¹³⁷Cs contamination in black alder high-age stands in the near zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;2:48–58. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-48-58>

Авторы:

Дмитрий Константинович Гарбарук – заведующий отделом экологии растительных комплексов.
Анатолий Владимирович Углынец – кандидат сельскохозяйственных наук; ведущий научный сотрудник отдела экологии растительных комплексов.

Authors:

Dmitriy K. Garbaruk, head of the department of ecology of vegetative complexes.
dima.garbaruk.77@mail.ru
Anatoliy V. Uglyanets, PhD (agriculture), leading researcher at the department of ecology of vegetative complexes.
uhlianets@mail.ru

WOOD AND BARK ^{137}Cs CONTAMINATION IN BLACK ALDER HIGH-AGE STANDS IN THE NEAR ZONE OF THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT

D. K. GARBARUK^a, A. V. UGLYANETS^a

^aPolesye State Radiation-Ecological Reserve,
7 Tserashkovaj Street, Khoiniki 247618, Belarus
Corresponding author: D. K. Garbaruk (dima.garbaruk.77@mail.ru)

The results of the study of ^{137}Cs contamination of wood and bark of black alder in high-age stands of the most common types of forest in the near zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant are presented. The parameters of the accumulation of radionuclide by these tissues by types of forest and in general by formation are determined. The connection of their accumulation of ^{137}Cs with the soil moisture index has been established. The features of the distribution of radionuclide in the wood of trees by classes of growth and development by Craft and by the radial profile of the trunk, as well as in the fallen deadwood, are revealed. Correlations of this radionuclide content in wood and bark with the density of soil contamination ^{137}Cs and the distance to the place of its release have been established. Despite the high levels of contamination of the area, the Belarusian hygienic standard for harvesting round timber for the construction of walls of residential buildings and fuel wood corresponds to black alder wood in 7.7 % of ripe and overripe stands, for harvesting other round timber – in 26,9 %.

Keywords: black alder; wood; bark; radioactive contamination; ^{137}Cs ; exclusion zone; Chernobyl Nuclear Power Plant.

Введение

Формация черноольховых лесов (черноольшаников, ольсов) является третьей по распространенности в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), в границах которой расположен Полесский государственный радиационно-экологический заповедник. По материалам лесоустроительного проекта заповедника на 2021–2030 гг. на долю черноольшаников приходится 10,6 % покрытой лесом площади. Общий запас стволовой древесины в них составляет 2991 тыс. м³, или 14,0 % от запаса всех лесов. Спелые и перестойные насаждения данной породы занимают 33,1 % площади формации, приспевающие – 15,9 %.

Почти 95 % насаждений ольхи черной произрастает на почвах полугидроморфного и гидроморфного типов увлажнения [1]. В этих условиях подвижность ^{137}Cs возрастает, что способствует более интенсивному его накоплению растительностью, в том числе и древесиной, в сравнении с автоморфными ландшафтами, и со временем сопутствует постоянному росту коэффициентов перехода (K_n) данного радионуклида в древесные породы [2]. Несмотря на то что K_n ^{137}Cs в древесину черноольшаников на торфяно-болотных почвах достиг максимума в 1990 г. [3], со второй половины 1990-х гг. до 2019 г. прослеживалась тенденция медленного его роста в древесину [4]. По результатам исследований, проведенных, как правило, в небольшом количестве насаждений выявлено повышение K_n ^{137}Cs в древесину ольхи с увеличением влагообеспеченности почв и снижение – при росте их плодородия [4–6].

Неотъемлемой частью древесного ствола является кора, которая в 1,5–5,5 раза интенсивнее, чем древесина, депонирует ^{137}Cs [3–7]. На начало 2000-х гг. при среднем вкладе коры в общую массу неокоренного ствола ольхи черной 10,6 % ее средний долевого вклад в активность ^{137}Cs составлял 47,8 % [6]. Несмотря на то что поступление радионуклида в кору этой породы в последние 20–25 лет стабилизировалось [4], данный компонент ствола следует учитывать при оценке загрязнения планируемых к заготовке неокоренных лесоматериалов и топливной древесины.

Учитывая преобладание черноольшаников в заповедной зоне, выделенной на территории заповедника с поверхностным загрязнением почвы (ПЗ) ^{137}Cs более 40 Ки/км², увеличение K_n ^{137}Cs в растительность в условиях гидроморфных ландшафтов на фоне снижения его содержания в лесных биогеоценозах в связи с естественным распадом, разрозненность данных во времени, полученных на небольших объемах выборок, делают весьма актуальным современную оценку загрязнения этим радионуклидом компонентов стволов ольхи черной. На необходимость уточнения параметров накопления радионуклидов в деревьях, произрастающих на почвах избыточного увлажнения, указывается и в работе [8].

Цель настоящей работы заключается в оценке современного загрязнения ^{137}Cs древесины и коры ольхи черной в приспевающих, спелых и перестойных древостоях ближней зоны ЧАЭС.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись древесина и кора приспевающих, спелых и перестойных насаждений ольхи черной, произрастающих в условиях избыточного увлажнения почв в ближней зоне ЧАЭС, которая несколько выходит за границы 30-километрового радиуса вокруг нее. Критерии выбора объектов: тип леса и тип лесорастительных условий (ТЛУ) – по таксационному описанию и в натуре по [9]; возраст не менее 50 лет – по таксационному описанию; отсутствие признаков интенсивной деградации древостоя – по визуальной оценке.

Всего подобрано и исследовано 26 насаждений ольхи черной снытевого (ТЛУ – Д₃), крапивного (Д₄), папоротникового (С₄) и осокового (С₅) типов леса, локализованных в заповедной зоне. В насаждениях заложены временные пробные площадки (ВПП) в соответствии с ТКП 498-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения» и с требованиями [10]. Их лесоводственно-таксационная характеристика подробно описана в работе [11]. Это чистые или с небольшой примесью березы, осины, дуба, реже других пород, 50–80-летние древостои Iа–III классов бонитета, средняя полнота которых по типам леса приближается к 1,0, а в ольсе крапивном составляет 1,2. Запасы стволовой древесины в них близки или выше запасов нормальных насаждений. Варьирование таксационных показателей древостоев обусловлено их возрастными различиями, условиями местопроизрастания, в меньшей степени причинами эндогенного характера.

На каждой ВПП производили отбор образцов почвы в 12 контрольных точках, отбор проб древесины и коры в соответствии с ТКП 499-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Обследование постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения» и работой [12]. Аналогичным образом отбирали древесину у деревьев I–V классов, по Крафту, отдельно по каждому классу в 9 насаждениях исследуемых типов леса. В этих же насаждениях отбирали пробы древесины валежника (без коры) с лежащих деревьев путем пропила ствола переносной цепной пилой до центра на расстоянии 1,3 м от корневых лап руководствуясь ТКП 239-2010 (02080) «Радиационный контроль. Обследование лесосек. Порядок проведения». На 9 ВПП трех типов леса керны древесины, отобранные у деревьев I–III классов, по Крафту, делили на три равные части – центральную, среднюю и периферийную.

Подготовку проб выполняли в соответствии с ТКП 251-2010 (02080) «Радиационный контроль. Отбор и подготовка проб лесной продукции. Порядок проведения». Удельную активность (A_y) ^{137}Cs в почве, древесине и коре определяли в лаборатории спектрометрии и радиохимии заповедника (аттестат аккредитации № ВУ/112 2.2203 от 30.01.2002 г.) на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315 (Беларусь) в соответствии с МВИ.МН 1181-2011 «Методика выполнения измерений объемной и удельной активности ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{40}K на гамма-бета-спектрометре типа МКС-АТ1315, объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов ^{137}Cs и ^{40}K на гамма-спектрометре типа ЕЛ 1309 (МКГ-1309) в пищевых продуктах, питьевой воде, почве, сельскохозяйственном сырье и кормах, продукции лесного хозяйства, других объектах окружающей среды».

Учитывая тесную зависимость содержания ^{137}Cs в компонентах древесных растений от уровня поверхностного загрязнения им почв [2, 3, 6 и др.], при расчетах и анализе показателей загрязнения древесины и коры ольхи черной этим радионуклидом использовался показатель ПЗ ^{137}Cs в насаждениях данной лесной породы.

Черноольховые леса ближней зоны ЧАЭС характеризуются преимущественно высокими уровнями ПЗ ^{137}Cs и высокой пестротой радиоактивных выпадений [13], которая обеспечила широкий разброс значений этого показателя по объектам исследований (174–5617 кБк/м²). По данным измерений, средняя арифметическая (средняя) величина ПЗ ^{137}Cs во всей совокупности исследованных насаждений (условно формации) составляла 1111 ± 292 кБк/м² при очень высоком коэффициенте вариации (134,1 %) и доверительном интервале 509–1713 кБк/м² (здесь и далее по тексту на 95 % уровне значимости). Это в 2,8 раза выше среднего срединного значения (медианы) ПЗ ^{137}Cs (398 кБк/м²).

Средние величины ПЗ ^{137}Cs по типам леса (табл. 1) характеризуются очень высокими коэффициентами вариации и широкими доверительными интервалами, выходящими за рамки выборок, что обусловлено большим разбросом частных значений данного показателя по насаждениям и малыми объемами выборок. Однако эти показатели неточны и не в полной мере характеризуют генеральную совокупность. Более значимы здесь медианные величины, которые по типам черноольховых лесов в 1,4–3,3 раза ниже средних.

Разница между средними величинами ПЗ ^{137}Cs в ольсах снытевом, папоротниковом и осоковом небольшая (10–24 %) и недостоверная на 95 %-ном уровне значимости. В ольсе крапивном ПЗ данным радионуклидом почти наполовину меньше из-за малочисленности выборки и случайно низких его величин по насаждениям. Первые три типа леса характеризуются относительной однородностью средних значений ПЗ ^{137}Cs и, представляя экологический ряд повышения гидроморфизма почв (от влажных

до сырых и мокрых), являются модельными. Однако тот факт, что медианные величины ПЗ ^{137}Cs относительно близки между собой в ольсах крапивном, папоротниковом и осоковом (в ольсе снытевом они в 1,5–1,7 раза выше), дает основание использовать все типы леса при сравнительном анализе.

Таблица 1

Характеристика поверхностного загрязнения почв ^{137}Cs , кБк/м²

Table 1

Characteristics of surface soil contamination ^{137}Cs , kBq/m²

Статистический показатель	Ольс снытевый	Ольс крапивный	Ольс папоротниковый	Ольс осоковый
<i>n</i>	7	3	9	7
<i>Min–max</i>	250–3293	333–1033	174–5556	232–5617
<i>M±m</i>	1200 ± 427	596 ± 220	1056 ± 575	1314 ± 732
<i>Cv</i>	94,2	64,0	163,5	147,4
<i>Ci</i>	155–2246	–352–1544	–271–2382	–478–3106
<i>Me</i>	656	421	375	401

Примечание. *n* – количество насаждений, шт., *M* – среднеарифметическое значение, $\pm m$ – стандартная ошибка среднего значения, *Cv* – коэффициент вариации, %, *Ci* – доверительный интервал на 95 % уровне значимости, *Me* – среднее срединное значение, медиана.

Обработка материалов выполнялась при помощи стандартных пакетов прикладных программ *Microsoft Excel*. В камеральных условиях рассчитывали K_n ^{137}Cs из почвы в компоненты ольхи черной как частное от их A_y (Бк/кг) к ПЗ (кБк/м²). Оценку достоверности различий (*t*) для двух сравниваемых малых выборок (*n* < 20) определяли по формуле и сопоставляли полученные величины с табличными значениями *t*-критерия Стьюдента:

$$t = (M_1 - M_2) \sqrt{\frac{1 - 2(n_1 + n_2)^{-1}}{\frac{\sigma_1^2}{n_2} + \frac{\sigma_2^2}{n_1}}}$$

где σ – стандартное отклонение.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что A_y ^{137}Cs в древесине ольхи черной по отдельным насаждениям изменяется в очень широком диапазоне (96–9031 Бк/кг). Ее средняя величина по формации составляет 2160 ± 413 Бк/кг при коэффициенте вариации 97,6 % и в 1,3 раза превышает медиану (1667 Бк/кг). Достаточно широко в пределах формации изменяются и K_n ^{137}Cs в древесину ($(0,1-8,1) \times 10^{-3}$ м²/кг), составляя в среднем $(3,56 \pm 0,51) \times 10^{-3}$ м²/кг при доверительном интервале $(2,52-4,60) \times 10^{-3}$ м²/кг и вариабельности 72,5 %. Среднее медианное значение данного показателя в ольсах $(3,80 \times 10^{-3}$ м²/кг) несущественно выше.

Частные величины A_y и K_n ^{137}Cs в древесине ольхи черной очень широко варьируют в пределах типов леса. Средние значения этих показателей имеют очень высокие коэффициенты вариации, а также очень широкие доверительные интервалы, выходящие за границы выборок в некоторых типах леса (табл. 2), указывающие на неточность средних величин отдельных показателей.

Медианные значения A_y ^{137}Cs в древесине исследуемой породы модельных типов леса ниже среднеарифметических на 9–41 %, в ольсе крапивном – в 2,7 раза. Медианы K_n ^{137}Cs в данный компонент деревьев отклоняются от них разносторонне и менее значимо (–8,9–12,9 %), кроме ольса крапивного (в 2,3 раза меньше).

В модельных типах леса средние и медианные значения A_y и K_n ^{137}Cs в древесине ольхи черной возрастают в ряду типов леса (ольс снытевый < ольс папоротниковый < ольс осоковый) и в ряду ТЛУ ($D_3 < C_4 < C_5$), представляющих ряд повышения индекса влажности эдафотопов. Данная тенденция

отмечалась нами и ранее [4; 14]. На закономерный рост накопления радионуклида с увеличением влагообеспеченности почв от свежих до мокрых гигротопов указывается в работах [3; 5; 6; 15].

Выявлены достоверные различия средних величин A_y ^{137}Cs в древесине исследуемой древесной породы на 95 %-ном уровне значимости между ольсами снытевым, крапивным и осоковым (табл. 3). Отсутствие достоверной разницы данного показателя между ними и ольсом папоротниковым обусловлено, вероятно, чрезвычайно высоким разбросом значений A_y радионуклида по отдельным насаждениям и большой ошибкой среднего значения. По K_n ^{137}Cs в древесину достоверно различаются между собой только ольсы крапивный и осоковый, характеризующиеся минимальной и максимальной величинами анализируемого показателя соответственно.

Таблица 2

Статистические показатели средних величин удельной активности и коэффициентов перехода ^{137}Cs в древесине ольхи черной

Table 2

Statistical indicators of average values of specific activity and transition coefficient ^{137}Cs in black alder wood

Статистический показатель	Ольс снытевый	Ольс крапивный	Ольс папоротниковый	Ольс осоковый
A_y , Бк/кг				
<i>Min-max</i>	583–2485	96–732	568–9031	1728–6947
<i>M±m</i>	1516 ± 281	315 ± 209	2205 ± 876	3535 ± 785
<i>Cv, %</i>	49,1	114,9	119,2	58,7
<i>Ci</i>	828–2204	–584–1213	184–4226	1615–5455
<i>Me</i>	1391	116	1564	2879
K_n , $n \times 10^{-3}$ м ² /кг				
<i>Min-max</i>	0,3–6,3	0,1–1,7	0,4–7,6	1,0–8,1
<i>M±m</i>	2,94 ± 0,97	0,70 ± 0,50	3,72 ± 0,80	5,19 ± 0,89
<i>Cv, %</i>	87,1	124,5	64,2	45,7
<i>Ci</i>	0,57–5,31	–1,47–2,87	1,89–5,56	3,00–7,38
<i>Me</i>	2,70	0,30	4,20	5,50

Таблица 3

Достоверность различий удельной активности (числитель) и коэффициента перехода (знаменатель) ^{137}Cs в древесину ольхи черной между типами леса

Table 3

Reliability of differences in specific activity (numerator) and transition coefficient (denominator) ^{137}Cs in black alder wood between forest types

Тип леса	Ольс снытевый	Ольс крапивный	Ольс папоротниковый
Ольс крапивный	2,383* / 1,323	–	–
Ольс папоротниковый	0,629 / 0,587	1,133 / 1,995	–
Ольс осоковый	2,343* / 1,580	2,387* / 2,854*	1,027 / 1,446

Примечание. * – различия достоверны на 95 % уровне значимости.

Анализ наших данных (табл. 2) и других исследований (табл. 4) показал, что $K_n^{137}\text{Cs}$ в древесину ольхи черной на протяжении 25 лет различались по типам леса и ТЛУ и неоднозначно изменялись во времени. В ольсе снытевом (D_3) они увеличились, в крапивном (D_4) – уменьшились, в ольсах папоротниковом (C_4) и осоковом (C_5) – достигли максимальных в начале нынешнего столетия, затем существенно снизились к 2010 г. На протяжении последних 10 лет они остаются относительно стабильными при тенденции небольшого роста.

В пределах каждого класса роста и развития деревьев, по Крафту (класса Крафта), отдельные величины $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине ольхи черной очень широко изменяются по насаждениям (табл. 5). Средние значения данного показателя I–IV классов Крафта близки между собой и только в деревьях III класса их величина несколько повышена. В сухостойных деревьях (V класс Крафта) в сравнении с сырорастущими A_y радионуклид возрастает на 25,4–50,6 %, в валежнике – на 34,8–61,8 %. Доверительные интервалы средних величин находятся в границах выборок, а коэффициенты вариации достаточно однородны и располагаются в узком (79–96 %) диапазоне значений. Медианные величины $A_y^{137}\text{Cs}$ в исследуемом компоненте стволов в большинстве классов Крафта и в валежнике на 22,7–42,0 % ниже средних и изменяются синхронно с ними. В древесине деревьев III класса Крафта медиана $A_y^{137}\text{Cs}$ повышена до уровня средней величины.

Таблица 4

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в древесину и кору ольхи черной по данным разных авторов, $n \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Table 4

Coefficients of ^{137}Cs transition to wood and bark of black alder according to different authors, $n \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Год или период, источник	Тип леса	ТУМ	Древесина	Кора
1987–1995, [2]	–	–	0,5–2,7	9,2–37,3
1994–1997, [5]	–	C_3	1,27	3,85
	–	B_4	2,72	7,98
	–	B_3	1,35	7,55
1987–2005, [6]	–	C_4	$2,39 \pm 0,27$	–
	–	C_5	$1,83 \pm 0,21$	–
	–	D_3	$0,86 \pm 0,09$	–
	–	D_4	$1,92 \pm 0,20$	–
2001–2005, [15]	–	C_3	$2,43 \pm 0,42$	–
	–	C_4	$7,33 \pm 0,37$	–
	–	C_5	$6,86 \pm 0,49$	–
2010, [7]	Ольс папоротниковый	C_4	1,47–1,85	3,50–4,13
	Ольс осоковый	C_5	2,54–2,82	5,45–5,99
2012, [16]	Ольс папоротниковый	C_4	2,84–3,04	3,70–4,66
	Ольс осоковый	C_5	2,81–3,42	4,89–5,50
2019, [4]	Ольс снытевый	D_3	2,7	3,5
	Ольс папоротниковый	C_4	4,5	7,3
	Ольс осоковый	C_5	5,5	7,4

Статистические показатели средних величин удельной активности ^{137}Cs в древесине ольхи черной по классам роста и развития деревьев, по Крафту, и в валежнике (n=9)

Table 5

Statistical indicators of the average values of the ^{137}Cs specific activity in black alder wood by classes of growth and development of trees by Craft and in dead wood (n=9)

Статистический показатель	Класс роста и развития деревьев, по Крафту					Валежник
	I	II	III	IV	V	
<i>Min-max</i>	68–2776	69–3083	73–3193	63–2902	128–3862	43–5809
<i>M±m</i>	1236 ± 367	1183 ± 350	1387 ± 367	1155 ± 352	1739 ± 480	1869 ± 646
<i>Cv, %</i>	88,9	88,9	79,4	91,4	82,7	103,7
<i>Ci</i>	391–2081	375–1991	540–2233	344–1966	633–2845	380–3358
<i>Me</i>	959	833	1398	829	1359	1523

Установлены корреляционные связи между индексами классов Крафта и средними ($r = 0,64$), а также медианными ($r = 0,45$) величинами A_y ^{137}Cs в древесине деревьев ольхи черной по этим классам, которые из-за высоких ошибок средних величин недостоверны на 95 %-ном уровне значимости. Положительная направленность связей обеспечена более высоким загрязнением древесины сухостойных деревьев.

Возможной причиной повышенной A_y ^{137}Cs в древесине сухостоя ольхи черной является то, что в них с момента усыхания происходит преимущественно радиоактивный распад ^{137}Cs , в то время как в растущих деревьях, помимо этого процесса, со временем снижается корневое поступление радионуклида, его концентрация перераспределяется в пределах деревьев [4; 5; 17], разбавляется по мере увеличения объемов стволов [3; 18], некоторая его часть выносится с опадом. Высокая A_y ^{137}Cs в отпавших деревьях обеспечена, вероятно, более ранним прекращением в них физиологических процессов, после чего уменьшение радионуклида определяется преимущественно естественным распадом.

Распределение средних величин A_y ^{137}Cs в древесине ольхи черной по классам Крафта в разных типах леса неодинаково. Они близки в деревьях большинства классов модельных типов леса. При этом на полугидроморфных почвах (ольс снытевый) содержание радионуклида в деревьях IV класса Крафта значительно ниже. В то же время на гидроморфных почвах (ольсы папоротниковый и осоковый) A_y ^{137}Cs несколько меньше в деревьях II класса, но существенно возрастает в сухостое [14]. Отметим, что в древесине сосны на автоморфных почвах снижение A_y ^{137}Cs в деревьях с I по V класс Крафта связывается с ухудшением условий произрастания для каждого низшего класса и с уменьшением их размеров [3].

Отсутствие закономерности в распределении A_y ^{137}Cs в древесине ольхи черной по классам Крафта может быть объяснено повышенным гидроморфизмом почв и поведением в них радионуклида, физиологическими особенностями породы, то есть видоспецифичностью поступления и перераспределения его в стволе, недостаточным объемом выборки.

По радиальному профилю ствола наиболее высокая A_y ^{137}Cs в древесине сосны и березы наблюдается в крайних годичных кольцах, затем она резко снижается и несколько возрастает в центре [2; 17]. Ольха черная является безъядровой породой. На радиальное загрязнение ее древесины радионуклидами влияет состоящая из живых клеток радиально-лучевая система тканей ствола [2].

Уровни A_y ^{137}Cs в древесине разных частей радиального профиля ствола ольхи черной в ближней зоне ЧАЭС изменяются в весьма широком диапазоне. Превышение максимальных значений над минимальными составляет от 6,8 до 11,3 раза. Средние величины по всем частям профиля расположены в границах выборок, а коэффициенты их вариации стабильны и относительно невысоки для данного рода исследований. В целом для формации характерно снижение средних и медианных зна-

чений A_y ^{137}Cs в древесине этой породы от периферии ствола к его середине и некоторое повышение в центральной части (табл. 6).

Таблица 6

Статистические показатели средних величин удельной активности ^{137}Cs в древесине ольхи черной по радиальному профилю ствола, Бк/кг ($n=9$)

Table 6

Statistical indicators of the average values of the specific activity ^{137}Cs in black alder wood along the radial profile of the trunk, Bq/kg ($n=9$)

Статистический показатель	Радиальное расположение древесины		
	периферийная	средняя	центральная
<i>Min-max</i>	794–7449	806–5449	639–7209
<i>M±m</i>	3221 ± 896	2713 ± 641	3022 ± 839
<i>Cv, %</i>	83,5	70,8	83,2
<i>Ci</i>	1155–5287	1236–4190	1088–4957
<i>Me</i>	2037	1781	1840

Определенные различия в распределении A_y ^{137}Cs по радиальному профилю ствола ольхи черной наблюдаются в типологическом аспекте. Указанная выше тенденция прослеживается на гидроморфных почвах в черноольшаниках папоротниковом и осоковом. В черноольшанике снытевом (полугидроморфные почвы) средние величины A_y ^{137}Cs в древесине периферийной и средней частей радиального профиля ствола близки, в центральной части содержание радионуклида несущественно снижается [14].

Размах вариации A_y ^{137}Cs в коре ольхи черной по насаждениям составляет 439–15404 Бк/кг. Ее средняя величина по формации (2754 ± 662 Бк/кг) и коэффициент вариации (122,5 %) превышают таковые в древесине на 27,5 и 25,5 % соответственно; доверительный интервал (1624–3884 Бк/кг) находится в границах выборки. Медианное значение A_y ^{137}Cs в коре по формации (1638 Бк/кг) в 1,7 раза ниже среднего.

В диапазоне $(1,0-8,6) \times 10^{-3}$ м²/кг изменяются по насаждениям K_n ^{137}Cs в кору данной породы, составляя в среднем $(3,35 \pm 0,40) \times 10^{-3}$ м²/кг при относительно невысоком коэффициенте вариации (60,7 %). Доверительный интервал (2,67–4,03 м²/кг) расположен в пределах выборки. Медиана K_n ^{137}Cs в кору всего на 17,5 % ниже средней величины.

В целом по формации средняя величина A_y ^{137}Cs в коре на 27,5 % выше, чем в древесине, медианные их значения близки, но переход его в древесину происходит интенсивнее на 6,3 % по средней величине и на 33,3 % по медиане.

В пределах типов леса размах значений A_y ^{137}Cs в коре ольхи черной чрезвычайно высок (табл. 7). В ольсах снытевом, папоротниковом и осоковом средние величины данного показателя близки между собой (2931–3051 Бк/кг) и в среднем в 3,5 раза превышают величину A_y ^{137}Cs в коре ольхи черноольшаника крапивного. Коэффициенты их вариации очень высоки при разнице между отдельными типами леса до 2,2 раза. Но средние величины неверны, так как доверительные интервалы выходят за границы выборок. Медианы A_y ^{137}Cs в коре ольхи черной меньше средних величин в 1,3–2,2 раза. По типам леса они снижаются в ряду ольс снытевый > ольс осоковый > ольс папоротниковый > ольс крапивный.

В модельных типах леса K_n ^{137}Cs в кору ольхи черной варьируют достаточно широко. В ольсах снытевом и осоковом средние величины данного показателя близки. В ольсе папоротниковом она максимальна, в крапивном – минимальна. Коэффициенты их вариации не слишком высоки для радиоэкологических исследований, но доверительные интервалы в двух типах леса выходят за границы выборок. Медианы K_n ^{137}Cs в кору этой породы существенно различаются между типами леса, приуроченными к полугидроморфным и гидроморфным почвам.

На протяжении последних десяти лет K_n ^{137}Cs в кору в ольсе папоротниковом практически не изменились, а в ольсе осоковом – снизились в 1,5–1,7 раза (см. табл. 4, 7).

Сравнение соотношения медианных значений показателей загрязнения компонентов ствола ольхи черной (табл. 7) указывает на более интенсивное накопление ^{137}Cs в древесине ольсов снытевых и крапивных (трофотоп Д) и в коре ольсов папоротниковых и снытевых (трофотоп С).

Таблица 7

Статистические показатели средних величин удельной активности и коэффициентов перехода ^{137}Cs в коре ольхи черной

Table 7

Statistical indicators of average values of specific activity and transition coefficient ^{137}Cs in the bark of black alder

Статистический показатель	Ольс снытевый	Ольс крапивный	Ольс папоротниковый	Ольс осоковый
A_y , Бк/кг				
<i>Min–max</i>	1237–7191	439–1590	663–15404	871–10553
<i>M±m</i>	2931 ± 776	865 ± 364	3016 ± 1564	3051 ± 1292
<i>Cv</i> , %	70,1	72,9	155,5	112,1
<i>Сi</i>	1032–4830	–702–2433	–590–6622	–111–6213
Me	2322	567	1367	1740
A_y ^{137}Cs кора/ A_y ^{137}Cs древесина (Me)	1,67	4,89	0,87	0,60
K_n , $n \times 10^{-3}$ м ² /кг				
<i>Min–max</i>	1,7–5,7	1,3–1,5	1,0–8,6	1,7–7,4
<i>M±m</i>	3,40 ± 0,58	1,37 ± 0,07	3,92 ± 0,84	3,41 ± 0,75
<i>Cv</i> , %	44,9	8,4	64,3	58,1
<i>Сi</i>	1,99–4,81	1,08–1,65	1,98–5,86	1,58–5,25
Me	3,50	1,30	2,90	2,80
K_n ^{137}Cs кора/ K_n ^{137}Cs древесина (Me)	1,30	4,30	0,69	0,51

Общеизвестные прямые корреляционные связи показателей загрязнения компонентов древесных пород ^{137}Cs с плотностью поверхностного загрязнения им почвы [2, 3, 5, 6, 18, и др.] подтверждены и для ольхи черной. Установлены высокосignимые, по Чеддоку, ($p < 0,001$) коэффициенты корреляции Спирмена ПЗ ^{137}Cs с A_y ^{137}Cs в коре ($r = 0,65$), с K_n ^{137}Cs в кору ($r = -0,64$) и с K_n ^{137}Cs в древесину ($r = -0,62$). Также выявлены корреляции различной силы между расстоянием объектов исследований от места выброса радионуклидов с ПЗ ^{137}Cs ($r = 0,77$; $p < 0,001$), с A_y ^{137}Cs в коре ($r = -0,45$; $p < 0,05$), с K_n ^{137}Cs в кору ($r = 0,60$; $p < 0,01$) и с K_n ^{137}Cs в древесину ($r = 0,70$; $p < 0,001$). Очевидно, что по мере удаления от ЧАЭС снижается поверхностное загрязнение почвы ^{137}Cs и удельная активность радионуклида в коре, но повышаются коэффициенты перехода его в древесину и кору. На пониженные K_n ^{137}Cs в древесину и кору разных пород деревьев, в том числе и ольхи черной, в насаждениях, произрастающих в южной (ближней) зоне радиоактивного загрязнения заповедника в сравнении с северной, расположенной за пределами 30-километрового радиуса от ЧАЭС, указывается в работе [7].

Высокосignимые корреляционные связи наблюдаются между A_y ^{137}Cs в коре и древесине ($r = 0,51$; $p < 0,01$) и между K_n ^{137}Cs в кору и древесину ($r = 0,77$; $p < 0,001$). При этом следует отметить отсутствие зависимостей A_y ^{137}Cs в древесине с ПЗ ^{137}Cs и с расстоянием до ЧАЭС.

На основе средних вкладов древесины и коры в общую массу неокоренного ствола ольхи черной [6] и A_y ^{137}Cs в этих компонентах (табл. 2, 7) рассчитаны средние значения данного показателя радионуклида в неокоренных стволах этой породы на каждой ВПП.

Для сравнения полученных данных с гигиеническим нормативом ГН 2.6.1.10-1-01-2001 «Республиканские допустимые уровни содержания цезия-137 в древесине, продукции из древесины и древесных материалов и прочей непившей продукции лесного хозяйства (РДУ/ЛХ-2001)» рассчитали A_y ^{137}Cs в дре-

весине, коре и неокоренных стволах ольхи черной путем суммирования A_y ^{137}Cs в каждом насаждении с погрешностями их измерений.

Установлено, что в ближней зоне ЧАЭС нормативу 740 Бк/кг на «Лесоматериалы круглые для строительства стен жилых зданий, топливо древесное» (РДУ/ЛХ-2001) соответствует окоренная древесина в 15,4 % насаждений, неокоренная – в 7,7 %, а нормативу 1480 Бк/кг на «Лесоматериалы круглые прочие, древесное технологическое сырье» – окоренная древесина в 34,6 % насаждений, неокоренная – в 26,9 %.

Заключение

Через 34 года после выброса радиоактивных веществ в ближней зоне ЧАЭС (заповедная зона Полесского заповедника) в условиях высокого и неоднородного загрязнения почв ^{137}Cs (ПЗ до $5,6 \times 10^3$ кБк/м²) в высоковозрастных насаждениях четырех наиболее распространенных типов леса черноольховой формации A_y ^{137}Cs в древесине ольхи черной варьирует в пределах 0,1–9,0 кБк/кг, составляя в среднем 2,16 кБк/кг, K_n ^{137}Cs в нее – $(0,1–8,1) \times 10^{-3}$ ($3,56 \times 10^{-3}$) м²/кг. Загрязнение данного компонента ствола ^{137}Cs возрастает с повышением гидроморфизма почв.

Закономерного распределения A_y ^{137}Cs в древесине ольхи черной по классам роста и развития деревьев, по Крафту, не выявлено. Уровни загрязнения радионуклидом живых деревьев разных классов близки. В сухостойных деревьях и, особенно, в валежнике они значительно повышены.

В поперечном профиле ствола ольхи черной A_y ^{137}Cs в древесине снижается от периферии к середине и повышается в центральной его части. Распределения этого показателя по деревьям разных классов Крафта и по радиальному профилю ствола различаются между черноольшаниками, произрастающими на почвах полугидроморфного и гидроморфного типов увлажнения.

В коре ольхи черной A_y ^{137}Cs в изменяется в диапазоне 0,4–15,4 кБк/кг и составляет в среднем 2,75 кБк/кг, K_n ^{137}Cs в кору – $(1,0–8,6) \times 10^{-3}$ м²/кг при среднем значении $3,35 \times 10^{-3}$ м²/кг. В целом по ольсам A_y ^{137}Cs выше в коре, K_n ^{137}Cs – в древесине. На полугидроморфных почвах кора характеризуется более высокими показателями загрязнения в сравнении с гидроморфными. В древесине ^{137}Cs интенсивнее накапливается в ольсах снытевых и крапивных, в коре – в ольсах папоротниковых и снытевых.

Наблюдаются значимые корреляционные связи показателей загрязнения древесины и коры ольхи черной ^{137}Cs (кроме A_y ^{137}Cs в древесине) с ПЗ ^{137}Cs и расстоянием до ЧАЭС.

В ближней зоне ЧАЭС по состоянию на 2020 г. появилась небольшая доля спелых и перестойных насаждений ольхи черной, в которых радиоактивное загрязнение ее древесины ^{137}Cs соответствует республиканским нормативам РДУ/ЛХ-2001.

Библиографические ссылки

1. Гарбарук ДК, Углынец АВ. Структура черноольховых лесов Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. *Особо охраняемые природные территории Беларуси. Исследования*. 2017;12:32–49.
2. Щеглов АИ. *Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС*. Москва: Наука; 2000.
3. Ипатьев ВА, Багинский ВФ, Булавик ИМ. *Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации*. Гомель: Речицкая укрупненная типография; 1999.
4. Углынец АВ, Гарбарук ДК, Шумак СВ. Накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr компонентами древостоя в черноольшаниках зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2020;80:246–256.
5. Булавик ИМ, Переволоцкий АН, Гайдуль АЗ. Влияние различных факторов на накопление ^{137}Cs древесными растениями. В: *10 лет Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику*. Гомель: [б. и.]; 1998. с. 59–70.
6. Переволоцкий АН. *Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах*. Гомель: Институт радиологии; 2006.
7. Бондарь ЮИ, Матусов ГД, Булавик ИМ. Особенности перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесину и кору сосновых и лиственных насаждений в северной и южной частях заповедника. В: *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. Минск: Институт природоведения НАН Беларуси; 2013. с. 156–164.
8. Ипатьев ВА. *О реабилитации мелiorированных техногенно загрязненных лесных экосистем*. Минск: Белорусская наука; 2007.
9. Юркевич ИД. *Выделение типов леса при лесоустроительных работах*. Минск: Наука и техника; 1980.
10. Мирошников ВС, Трульв ОА, Ермаков ВЕ. *Справочник таксатора*. Минск: Ураджай; 1980.
11. Углынец АВ, Гарбарук ДК, Шумак СВ. Продуктивность высоковозрастных насаждений ольхи черной в заповедной зоне Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2021;81:83–90.
12. Забродский ВН, Углынец АВ, Калинин ВН. Влияние типа леса и типа лесорастительных условий на переход ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесину сосны в зоне отчуждения ЧАЭС по данным радиационного обследования лесосек. В: *Современные проблемы радиобиологии – 2021*. Минск: ИВЦ Минфина; 2021. с. 68–72.
13. Израэль ЮА, Богдевич ИМ, Аверин ВС. *Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь)*. Москва: Фонд «Инфосфера»–НИА–Природа; Минск: Белкартография; 2009.
14. Гарбарук ДК, Углынец АВ, Воронцовская АН. Загрязнение ^{137}Cs древесины ольхи черной в заповедной зоне Полесского государственного радиационно-экологического заповедника Беларуси. В: *Радиоэкологические последствия радиационных аварий – к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС*. Обнинск: НИИ радиологии и агроэкологии; 2021. с. 56–58.

15. Переволоцкий АН, Булавик ИМ, Переволоцкая ТВ. Влияние типов условий местопроизрастания на уровень накопления ^{137}Cs в древесине основных лесобразующих пород Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. В: *20 лет после чернобыльской катастрофы*. Гомель: [б. и.]; 2006. с. 105–111.
16. Воронетская АН, Матусов ГД. Накопление радионуклидов структурными компонентами лесных фитоценозов. В: *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. Гомель: [б. и.]; 2013. с. 164–171.
17. Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ^{137}Cs by forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40:105–113.
18. Гарбарук ДК, Углынец АВ, Кудин МВ. Изменение радиационной обстановки в сосняках мшистых в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2021;61(5):524–535. DOI: 10.31857/S0869803121050064.

References

1. Garbaruk DK, Uglyanets AV. The structure of black alder forests in Polesye state radiation-ecological reserve. *Osobo okhranyayemye prirodnye territorii Belarusi. Issledovaniya*. 2017;12:32–49. Russian.
2. Shcheglov AI. *Biogekhimiya tekhnogennykh radionuklidov v lesnykh ekosistemakh: po materialam 10-letnikh issledovaniy v zone vliyaniya avarii na ChAES* [Biogeochemical migration of technogenic radionuclides in forest ecosystems: by the materials of 10-year research in the area effected by the Chernobyl accident]. Moscow: Nauka; 2000. Russian.
3. Ipat'ev VA, Baginskii VF, Bulavik IM. *Les. Chelovek. Chernobyl'. Lesnye ekosistemy posle avarii na Chernobyl'skoi AES: sostoyanie, prognoz, reaktsiya naseleniya, puti reabilitatsii* [Forest. Human. Chernobyl. Forest ecosystems after the accident at the Chernobyl NPP: condition, prediction, response of the population, ways of rehabilitation]. Gomel: Rechitskaya ukрупnennaya tipografiya; 1999. Russian.
4. Uglyanets AV, Garbaruk DK, Shumak SV. *Nakoplenie ^{137}Cs i ^{90}Sr komponentami drevostoya v chernool'shanikakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [^{137}Cs and ^{90}Sr accumulation of stand components in black alder forests of the Chernobyl NPP exclusion zone]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2020;80:246–256. Russian.
5. Bulavik IM, Perevolotskii AN, Gaidul' AZ. Influence of various factors on the accumulation of ^{137}Cs by woody plants. In: *10 let Polesskomu gosudarstvennomu radiatsionno-ekologicheskomu zapovedniku*. Gomel: [publisher unknown]; 1998. p. 59–70. Russian.
6. Perevolotskii AN. *Raspreделение ^{137}Cs i ^{90}Sr v lesnykh biogeotsenozakh* [Distribution ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest biogeocenoses]. Gomel: Institut radiologii; 2006. Russian.
7. Bondar' Yul, Matusov GD, Bulavik IM. Features of the transition of ^{137}Cs and ^{90}Sr into wood and bark of pine and deciduous plantation in the northern and southern parts of the reserve. In: *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya*. Minsk: Institut prirovedeniya NAN Belarusi; 2013. p. 156–164. Russian.
8. Ipat'ev VA. *O reabilitatsii meliorirovannykh tekhnogenno zagryaznennykh lesnykh ekosistem* [On the rehabilitation of reclaimed technogenically polluted forest ecosystems]. Minsk: Belorusskaya nauka; 2007. Russian.
9. Yurkevich ID. *Vydelenie tipov lesa pri lesoustroitel'nykh rabotakh* [Identification of forest types in forest managements operations]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1980. Russian.
10. Miroshnikov VS, Trull' OA, Ermakov VE. *Spravochnik taksatora* [A guide for forest taxator]. Minsk: Uradzhai; 1980. Russian.
11. Uglyanets AV, Garbaruk DK, Shumak SV. *Produktivnost' vysokovozrastnykh nasazhdenii ol'khi chernoi v zapovednoi zone Polesskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika* [Productivity of high-age stands of black alder in the protected area of the Polesye Nature Reserve]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2021;81:83–90. Russian.
12. Zabrodskii VN, Uglyanets AV, Kalinin VN. *Vliyanie tipa lesa i tipa lesorastitel'nykh uslovii na perekhod ^{137}Cs i ^{90}Sr v drevesinu sosny v zone otchuzhdeniya ChAES po dannym radiatsionnogo obsledovaniya lesosok* [Influence of forest type of forest conditions on the transfer ^{137}Cs and ^{90}Sr to pine wood in the Chernobyl NPP exclusion zone according to the results of the radiation examination of cutting areas]. In: *Sovremennye problemy radiobiologii – 2021* [Contemporary issues of radiobiology – 2021]. Minsk: IVC Minfina; 2021. p. 68–72. Russian.
13. Izrael' YuA, Bogdevich IM, Averin VS. *Atlas sovremennykh i prognoznykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya–Belarus')* [Atlas of recent and predictable aspects of consequences of Chernobyl accident on polluted territories of Russia and Belarus (ARPA Russia–Belarus)]. Moscow: Fond «Infosfera»–NIA–Priroda; Minsk: Belkartografiya; 2009. Russian.
14. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Voronetskaya AN. *Zagryaznenie ^{137}Cs drevesiny ol'khi chernoi v zapovednoi zone Polesskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika Belarusi* [^{137}Cs contamination of black alder wood in the protected area of Polesye State Radiation-Ecological Reserve of Belarus]. In: *Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh avarii – k 35-oi godovshchine avarii na ChAES* [Radioecological consequences of radiation accidents: to the 35th anniversary of the Chernobyl accident]. Obninsk: NII radiologii i agroekologii; 2021. p. 56–58. Russian.
15. Perevolotskii AN, Bulavik IM, Perevolotskaya TV. The influence of types of habitat conditions on the level ^{137}Cs accumulation in the wood of the main forest-forming species of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve. In: *20 let posle chernobyl'skoi katastrofy*. Gomel: [publisher unknown]; 2006. p. 120–125. Russian.
16. Voronetskaya AN, Matusov GD. Accumulation of radionuclide's by structural components of forest phytocenoses. In: *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya*. Gomel: [publisher unknown]; 2013. p. 164–171. Russian.
17. Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ^{137}Cs by forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40:105–113.
18. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Kudin MV. *Izmenenie radiatsionnoi obstanovki v sosnyakakh mshistykh v zone otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [Changes in the radiation situation in the mossy pine forests of the Chernobyl NPP exclusion zone]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2021;61(5):524–535. DOI: 10.31857/S0869803121050064. Russian.

УДК 57.043

ПОСТЛУЧЕВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ В КРОВИ ТРОМБОЦИТОВ И ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

О. Г. ПАРХИМОВИЧ¹⁾, О. Д. БИЧАН²⁾, К. Я. БУЛАНОВА¹⁾

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

Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

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

Действие ионизирующего излучения на организм приводит к развитию различных патологических нарушений в органах и тканях. На первом месте находятся патологии сердечно-сосудистой системы. Им предшествуют нарушения в системе крови. Существуют общие закономерности в изменениях качественного и количественного состава периферической крови под воздействием ионизирующих излучений. Среди клеточных элементов ведущую роль в изменении гемодинамических свойств крови играют тромбоциты и их взаимодействие с эндотелиальными клетками сосудов. Ангиотрофическая функция тромбоцитов может нарушаться вследствие изменения их количества и/или функциональной активности. После облучения в дозе 1 Гр в крови крыс наблюдались фазовые изменения количества тромбоцитов в течение периода реабилитации. На 3-и сутки постлучевого периода концентрация тромбоцитов и величина тромбокрита соответствовала показателям контрольной группы. На 10-е сутки уменьшались количество тромбоцитов и величина тромбокрита у облученных крыс. В отдаленные сроки после облучения (30 и 90-е сутки) данные показатели восстанавливались до нормальных значений. Ширина распределения тромбоцитов и их средний

Образец цитирования:

Пархимович О.Г., Бичан О.Д., Буланова К.Я. Постлучевые изменения содержания в крови тромбоцитов и их функциональной активности. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;2:59–65. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-59-65>

For citation:

Parkhimovich OG, Bichan OD, Bulanova KYa. Post-radiation changes in the content of platelets in the blood and their functional activity. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;2:59–65. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-59-65>

Авторы:

Ольга Георгиевна Пархимович – преподаватель кафедры экологической химии и биохимии.

Ольга Дмитриевна Бичан – заведующий учебной лабораторией физического факультета.

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

Authors:

Olga G. Parkhimovich, lecturer at the department of environmental chemistry and biochemistry.

olga_parkhimovich@mail.ru

Olga D. Bichan, head of the educational laboratory at the faculty of physics.

bichan@bsu.by

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

bulanova_home@tut.by

объем не изменялись во все исследованные сроки постлучевого периода. После облучения в дозе 1 Гр отмечены изменения агрегационной способности тромбоцитов при внесении индуктора агрегации АДФ в низкой концентрации ($2,4 \pm 10^{-6} \text{M}$). На 3-и и 30-е сутки наблюдалось разделение облученной выборки на две группы: особи со степенью реактивности тромбоцитов, соответствующей контролю, и с высокой реактивностью. На 10-е сутки среди тромбоцитов облученных особей превалировала тенденция к сдвигу показателей степени и скорости агрегации в сторону сниженной агрегационной активности. В отдаленные сроки (90-е сутки) постлучевого периода у облученных животных отмечено удлинение периода изменения формы тромбоцитов и ослабление реакции на индукторы агрегации, что способствует риску геморрагий. Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что в ближайшие сроки после облучения превалирует тенденция к повышенному тромбообразованию и развитию ишемических повреждений, а в отдаленные сроки (90-е сутки) – агрегационная активность снижается и повышается риск кровотечений.

Ключевые слова: тромбоциты; облучение; кальциевый обмен; агрегация; АДФ.

POST-RADIATION CHANGES IN THE CONTENT OF PLATELETS IN THE BLOOD AND THEIR FUNCTIONAL ACTIVITY

O. G. PARKHIMOVICH^a, O. D. BICHAN^b, K. YA. BULANOVA^a

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

^aBelarusian State University,

4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: O. G. Parkhimovich (olga_parkhimovich@mail.ru)

The action of ionizing radiation on the body leads to the development of various pathological disorders in organs and tissues. In the first place are pathologies of the cardiovascular system. They are preceded by disorders in the blood system. There are general patterns in changes in the qualitative and quantitative composition of peripheral blood under the influence of ionizing radiation. Among cellular elements, platelets and their interaction with vascular endothelial cells play a leading role in changing the hemodynamic properties of blood. The angiogenic function of platelets may be impaired due to changes in their number and/or functional activity. After irradiation at a dose of 1 Gy, phase changes in the number of platelets were observed in the blood of rats during the rehabilitation period. On the 3rd day of the post-radiation period, the concentration of platelets and the value of thrombocrit corresponded to those of the control group. On the 10th day, the number of platelets and the value of thrombocrit decreased in irradiated rats. In the long term after irradiation (30s and 90s), these indicators were restored to normal values. The distribution width of platelets and their average volume did not change during all the studied periods of the post-radiation period. After irradiation at a dose of 1 Gy, changes in the aggregation ability of platelets were noted when the aggregation inducer ADP was introduced at a low concentration ($2.4 \pm 10^{-6} \text{M}$). On the 3rd and 30th days, the irradiated sample was divided into two groups: individuals with a degree of platelet reactivity corresponding to the control, and with high reactivity. On the 10th day, among the platelets of irradiated individuals, a tendency to shift the indicators of the degree and rate of aggregation towards reduced aggregation activity prevails. In the long term (90th day) of the post-radiation period, the irradiated animals showed a prolongation of the period of change in the shape of platelets and a weakening of the reaction to aggregation inducers, which contributes to hemorrhagic manifestations. Thus, the data obtained indicate that in the short term after irradiation, the tendency to increased thrombus formation and the development of ischemic damage prevails, and in the long term (day 90), aggregation activity decreases and the risk of bleeding increases.

Keywords: platelets; irradiation; calcium metabolism; aggregation; ADP.

Введение

Зарождение и существование жизни на Земле неразрывно связано с наличием такого экологического фактора, как радиационный фон. Естественный фон ионизирующего излучения Земли обусловлен несколькими источниками: космическим излучением и излучением естественно распределенных природных радиоактивных веществ в горных породах, почвах и атмосфере. Природный радиационный фон Земли является не только неотъемлемым, но и необходимым экологическим фактором, способствующим осуществлению нормального развития живых организмов и проявлению их жизнедеятельности. Проведенные в последние годы опыты с растениями и животными показали, что изоляция организмов от естественной радиации вызывает замедление самых фундаментальных жизненных процессов. Отмечаются положительные эффекты воздействия малых доз ионизирующего излучения на различные организмы.

Научно-технический прогресс на современном этапе развития человечества привел к ряду изменений условий существования: помимо естественного радиоактивного фона на живые организмы действует

техногенные источники радиации (специфические устройства и оборудование, медицинские и бытовые приборы, радионуклиды, попавшие в окружающую среду в результате проведенных ядерных испытаний, крупномасштабных аварий на атомных производствах и станциях). Прямое и опосредованное действие этих радиационных факторов на человека привело к повышению риска развития ряда патологий, в первую очередь, сердечно-сосудистых [1].

Известно, что патологическим изменениям в сердце и сосудах предшествуют нарушения в системе крови вследствие ее высокой чувствительности к действию факторов внешней среды. Среди клеточных элементов ведущую роль в изменении гемодинамических свойств крови и функционального состояния эндотелия играют тромбоциты. Установлена активная роль тромбоцитов по отношению к эндотелиальным клеткам – эндотелиально-поддерживающая (ангиотрофическая) функция. Она реализуется за счет адсорбции, инкорпорации или эндоцитоза эндотелиальными клетками цитоплазмы тромбоцитов и ряда биологически активных молекул тромбоцитов (серотонина, тромбоцитарного фактора 3, трансформирующего фактора роста, фактора роста эндотелия сосудов, фибробластов, инсулиноподобного фактора). Эти взаимодействия между эндотелием кровеносных сосудов и тромбоцитами в настоящее время признаны одним из перспективнейших направлений в изучении как физиологии, так и патологии системы гемостаза, в том числе постлучевой [2].

Многочисленные клинические наблюдения показали, что в основе нарушений ангиотрофической функции тромбоцитов лежат две причины. Первая – постлучевое снижение концентрации тромбоцитов в крови, приводящее к нарушению функционирования сосудисто-тромбоцитарного звена системы гемостаза, клинически проявляющегося в кровоточивости. В связи с этим переливание тромбоцитов входит в перечень рекомендованных терапевтических средств по лечению лучевой болезни у человека. Вторая причина выявлена в результате обнаружения [3] совершенно нового явления в патогенезе лучевого поражения – геморрагического синдрома, обусловленного повышением функциональной активности тромбоцитов на ранних стадиях (1–3-и сутки) развития лучевой болезни.

Цель настоящего исследования – изучение особенностей изменения количества тромбоцитов и их агрегационной способности в различные сроки после облучения экспериментальных животных в дозе 1 Гр.

Материалы и методы исследования

Объектами исследований являлись тромбоциты крови облученных и необлученных беспородных белых крыс зрелого возраста (6–7 мес., весом 250 ± 30 г), содержащихся на стандартном рационе питания вивария. Объемы выборок показателей в экспериментальных и контрольных группах сравнения составляли $n = 15$ (в опытах) и $n = 18$ (в контролях).

Животных облучали на установке ИГУР γ -квантами ^{137}Cs в дозе 1 Гр (мощность дозы 0,62 Гр/мин, в течение 1,61 мин) однократно и равномерно. Контролем служили животные соответствующего возраста. Облучение животных проведено на базе ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси».

Перед забором крови крыс наркотизировали тиопенталом натрия (из расчета 45 мг/кг веса животного). Кровь брали пункцией из левого желудочка (короткой иглой с достаточно большим диаметром и силиконовой трубкой на тупом конце, предварительно промытых раствором ЭДТА (15 %)). Кровь стабилизировали 3,8 % раствором цитрата натрия (9:1, объем : объем). Для исключения контактной активации тромбоцитов во всех экспериментах использовалась только пластмассовая или силиконовая посуда (кюветы, пробирки, пипетки).

Количество тромбоцитов определяли с использованием гематологического анализатора фирмы *Technicon H-1*, принцип работы которого основан на проточной цитометрии.

Агрегационную способность тромбоцитов [4] определяли после получения обогащенной тромбоцитами плазмы (ОТП) в результате центрифугирования крови при 200 g в течение 5 мин при комнатной температуре, а также бестромбоцитарной плазмы после центрифугирования ОТП при 650 g в течение 15 мин. Количество тромбоцитов в ОТП довели до 2 ± 10^8 кл/мл добавлением бестромбоцитарной плазмы. Агрегацию тромбоцитов исследовали с применением компьютеризированного анализатора агрегации тромбоцитов AP 2110 научно-производственного центра «СОЛАР» (Минск, Беларусь). В качестве индуктора агрегации использовали АДФ в концентрации 10^{-6} – 10^{-3} М.

Статистические методы обработки данных. Анализ и статистическая обработка данных проводилась на вычислительном комплексе *IBM-PC/AT*. С использованием программного обеспечения *GraphPad Prism 9* (Сан-Диего, Калифорния, США). Достоверность различий между средними значениями изучаемых параметров оценивалась по *t*-критерию Стьюдента.

Результаты исследований и их обсуждение

Одним из перспективнейших направлений сегодняшнего дня в изучении физиологии и патологии системы гемостаза при патологических и постлучевых состояниях является исследование

гемостатических взаимодействий между эндотелием кровеносных сосудов и тромбоцитами. В норме это взаимодействие играет определяющую роль в поддержании резистентности стенки сосудов, определении и функциональных свойств тромбоцитов и сохранении крови в сосудистом русле в жидком состоянии. Тромбоциты обладают способностью проявлять ангиотрофическую функцию – передавать эндотелиальным клеткам тромбоцитарный фактор 3 и серотонин, либо вследствие адсорбции и включения эндотелиальными клетками материала, выделенного из тромбоцитов, либо за счет инкорпорации (фагоцитоза) цитоплазмы тромбоцитов в эндотелий. Многочисленными исследованиями в эксперименте и клиническими наблюдениями установлены две важнейшие причины нарушений ангиотрофической функции тромбоцитов: 1) снижение концентрации тромбоцитов в крови; 2) повышение функциональной активности тромбоцитов и формирования микроагрегатов [5].

Обнаружено, что после облучения животных в дозе 1 Гр концентрация тромбоцитов в крови в ближайшие сроки (3-и сутки) не отличалась от таких же показателей в необлученном контроле (таблица). Эти данные соответствуют существующим представлениям о достаточной устойчивости зрелых тромбоцитов как специализированных форменных элементов крови к действию ионизирующей радиации [6].

Наблюдаемое на 10-е сутки после острого облучения снижение числа тромбоцитов и величины тромбокрит может быть результатом нарушения процессов костномозгового кроветворения, поскольку время жизни тромбоцитов в кровяном русле крыс составляет 4–5 суток. К 30-ым суткам обнаруживается полное восстановление числа тромбоцитов, что соответствует фазовому характеру постлучевых изменений многих параметров во времени. Эти параметры оставались стабильными и на 90-е сутки.

В тромбоцитарной популяции среди основной массы зрелых, нормально функционирующих клеток, способных к адгезии и агрегации, присутствуют и другие формы: клетки-гиганты, по размерам значительно превышающие нормальные тромбоциты; большие кровяные пластинки, кровяные пластинки малого размера, которые уже утратили свои функциональные способности [7]. Выявлено, что ширина распределения тромбоцитов и их средний объем не изменялись во все сроки исследования постлучевого периода.

Динамика показателей гемостаза после острого γ -облучения крыс в дозе 1 Гр

Dynamics of hemostasis indices after acute irradiation of rats at a dose of 1Gy

Показатели гемостаза	Контроль n = 18	Сроки после облучения			
		3-и сутки n = 15	10-е сутки n = 15	30-е сутки n = 15	90-е сутки n = 15
Тромбоциты, $10^3/\mu\text{l}$	922 ± 40,9	894 ± 50,84	723 ± 21,2*	880 ± 50,2	860 ± 40,5
Средний объем тромбоцитов, fl	5,60 ± 0,19	5,30 ± 0,21	5,72 ± 0,14	5,80 ± 0,27	5,31 ± 0,10
Ширина распределения тромбоцитов, %	4,91 ± 0,65	5,01 ± 1,23	5,08 ± 0,94	4,99 ± 0,75	5,02 ± 0,81
Тромбокрит, %	0,50 ± 0,03	0,49 ± 0,04	0,42 ± 0,02*	0,50 ± 0,01	0,47 ± 0,04

Примечание. *различия достоверны по отношению к контролю ($p < 0,05$).

Тромбоциты обладают набором рецепторов адгезии и утонченным регуляторным механизмом для того, чтобы агрегировать только при четко определенном наборе стимулов. Активация тромбоцитов вызывается различными стимуляторами, включая физиологический инициатор агрегации – АДФ. Высокую реактивность тромбоцитов к АДФ принято рассматривать как фактор риска развития ишемических событий, а низкую – как фактор риска кровотечений.

Тромбоциты необлученных и облученных животных (3-и сутки) при использовании в экспериментах *in vitro* АДФ в концентрации $2,4 \pm 10^{-5}$ М отвечали необратимой агрегацией как в контроле, так и в опыте (рис. 1).

Исследования агрегатограмм тромбоцитов при активации АДФ в концентрации $2,4 \cdot 10^{-6}$ М выявили индивидуальные особенности их реагирования в ближайшие и отдаленные сроки. На АДФ в концентрации $2,4 \cdot 10^{-6}$ М тромбоциты некоторой части облученных животных реагировали сходно с тромбоцитами контрольной группы – стимулированием первичной фазы агрегации с последующей дезагрегацией, а у меньшей части облученных животных тромбоциты проявляли необратимую реакцию. Таким образом, у тромбоцитов необлученных крыс и у части экспериментальных крыс отсутствовала вторая фаза агрегации, по этой причине агрегация была обратимой. Известно, что вторая фаза агрегации связана с реакцией высвобождения. Реакция высвобождения необходима для формирования тромбоцитарной пробки, спазма сосудов и ускорения процесса свертывания крови. Вторая фаза агрегации у тромбоцитов крыс не выявляется, возможно, по причине сниженного участия релизинг-факторов. Таким образом, особенности АДФ-зависимой регуляции активности тромбоцитов крыс при указанных концентрациях

АДФ предоставляют возможность изучения мембранных механизмов индукции первой фазы агрегации и процессов дезагрегации (рис. 1).

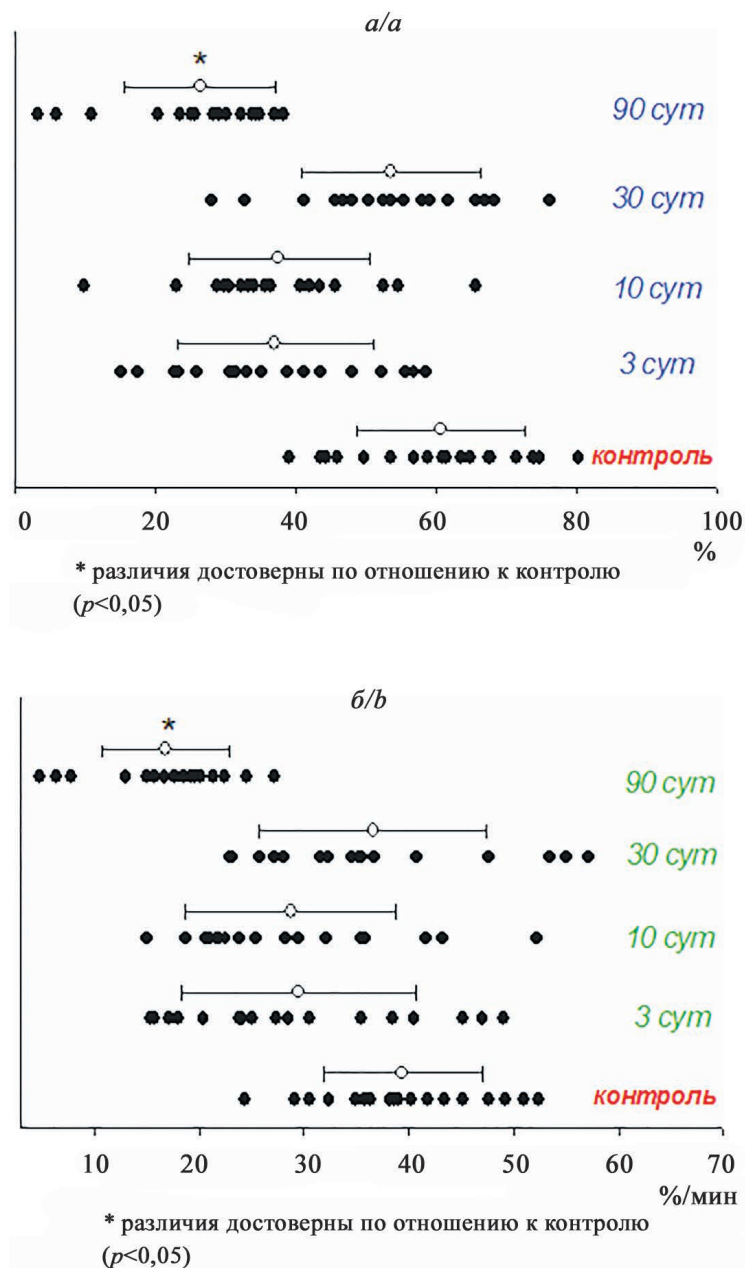


Рис. 1. Степень (а) и скорость (б) обратимой агрегации тромбоцитов крыс при стимуляции АДФ ($2,4 \cdot 10^{-5}$ М) после острого облучения в дозе 1 Гр

Fig. 1. Degree (a) and rate (b) of reversible aggregation of platelets in rats upon stimulation with ADP ($2,4 \cdot 10^{-5}$ M) after acute irradiation at a dose of 1 Gy

Сравнительный анализ показателей степени и скорости агрегации тромбоцитов на низкие концентрации АДФ ($2,4 \cdot 10^{-6}$ М) выявил причины этих различий. Показано, что на 3-и сутки происходит не только значительное расширение ответных реакций на стимуляцию низкими концентрациями АДФ, но и разделение выборки облученных животных на группы с разной степенью реактивности тромбоцитов. Показатели степени и скорости агрегации тромбоцитов одной группы облученных животных не отличались от контроля, тогда как во второй – эти показатели увеличивались более чем в 2 раза. Полученные данные указывают, что при таких поглощенных дозах (1 Гр) проявление постлучевых эффектов у особей данного вида в значительной степени зависит от индивидуальной чувствительности организма. При лучевой болезни, вызванной действием высоких доз, на 1–3-и сутки абсолютно у всех пациентов происходит увеличение индекса спонтанной внутрисосудистой агрегации [8].

На 10-е сутки среди тромбоцитов облученных особей превалирует тенденция к сдвигу показателей степени и скорости агрегации в сторону сниженной агрегационной активности (рис. 2). На 30-е сутки реакция тромбоцитов большинства облученных животных не отличается от таковой контроля. Однако в общей выборке животных снова появляется небольшое число особей (17,6 %) с повышенной степенью агрегации.

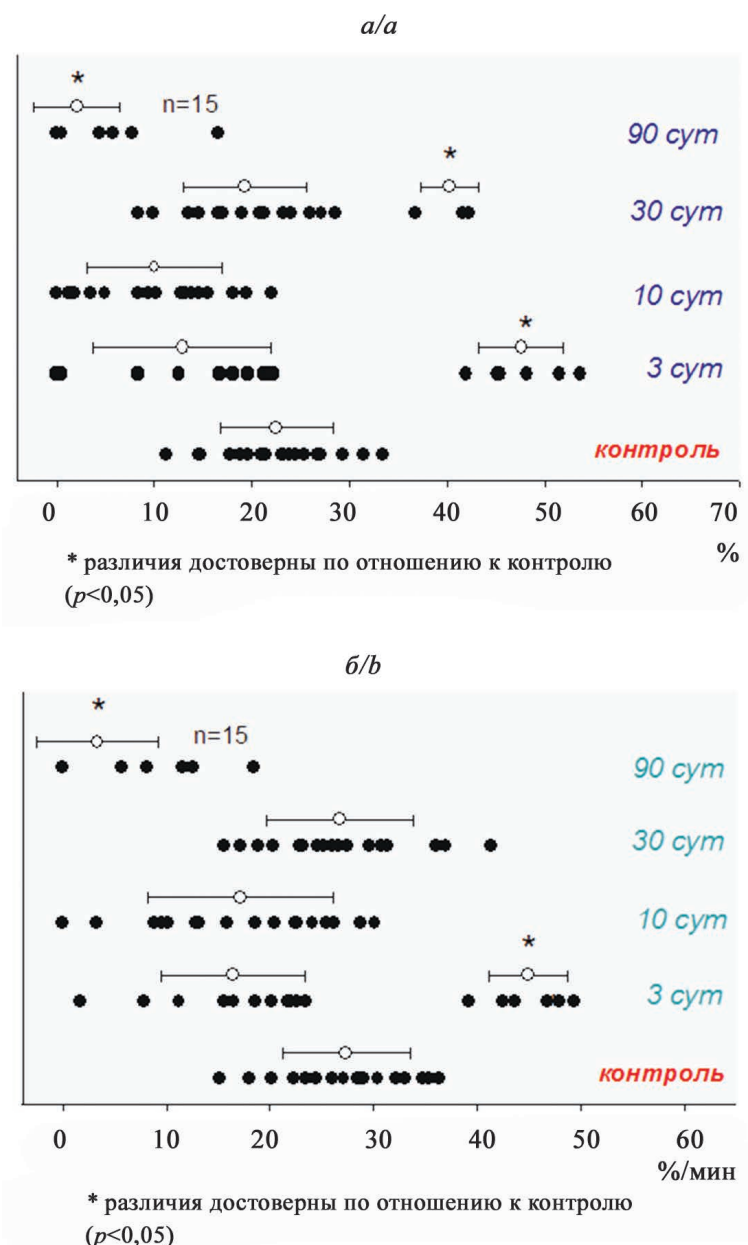


Рис. 2. Степень (а) и скорость (б) обратимой агрегации тромбоцитов крыс при стимуляции АДФ ($2,4 \cdot 10^{-6}$ М) после острого облучения в дозе 1 Гр

Fig. 2. Degree (a) and rate (b) of reversible aggregation of platelets in rats upon stimulation with ADP ($2,4 \cdot 10^{-6}$ M) after acute irradiation at a dose of 1 Gy

Таким образом, в результате проведенных исследований удалось обнаружить второй период повышенного риска возникновения ишемических состояний через месяц после облучения.

На 90-е сутки пострadiационного периода у большинства облученных животных при внесении АДФ в концентрации $2,4 \pm 10^{-6}$ М на агрегатограммах выявляется лишь увеличение лаг-периода, характеризующего время изменения формы тромбоцитов с образованием псевдоподий, способствующих инициации агрегации, а также ослабление реакции на индукторы агрегации.

Таким образом, установлено, что ионизирующее излучение в дозе 1 Гр способно вызвать разнонаправленные изменения функциональной активности тромбоцитов в зависимости от индивидуальных особенностей организмов и сроков реабилитации. В ближайший период (3, 10, 30-е сутки)

у части животных они имеют фазовый характер, когда отмечаются всплески повышенной активности на 3-и и 30-е сутки, что сопряжено с риском тромбообразования.

Следует отметить, что нахождение тромбоцитов в агрегированном состоянии не позволяет выполнять ангиотрофическую функцию, но способно стимулировать распластывание тромбоцитов на поверхности эндотелия, что приводит к образованию базисного слоя, на котором формируется тромбоцитарный агрегат, часто полностью закрывающий просвет сосуда и увеличивающий риск ишемических поражений [9].

В отдаленные сроки постлучевого периода (90-е сутки) происходит снижение реактивности кровяных пластинок, увеличивая риск кровоточивости.

Заключение

Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что после острого γ -облучения в дозе 1 Гр изменения агрегационной способности тромбоцитов способствуют формированию различных патологических процессов. Это зависит от сроков реабилитации: на 3-и и 30-е сутки после облучения животных увеличивается риск тромбообразования и ишемий у части особей, а к девяностым суткам – риск геморрагий практически у всех животных.

Библиографические ссылки

1. Кузин АМ. *Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли*. Москва: Наука; 1991. 115 с.
2. Кутафина НВ, Завалишина СЮ. Механизмы функционирования сосудисто-тромбоцитарного гомеостаза. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2012;1:30–37.
3. Gavrilov IY, Pozin EYa. Platelet aggregation: the use of optical density fluctuations to study microaggregate formation in platelet suspension. *Thromb Res*. 1989;54(3):215–23.
4. Зупанец ИА, Черных ВП, Усенко ВА. *Клиническая лабораторная диагностика: методы исследования*. Харьков: Золотые страницы; 2005. 200 с.
5. Козловский ВИ, Ковтун ОМ, Сероухова ОП. Методы исследования и клиническое значение агрегации тромбоцитов. Фокус на спонтанную агрегацию. *Вестник ВГМУ*. 2013;12(4):79–91.
6. Rasheed H, Tirmizi AH. Calcium signaling in human platelet aggregation mediated by platelet activating factor and calcium ionophore. *Journal of biological sciences*. 2004;4(2):117–121.
7. Абдулкадыров КМ, Андреева ТА, Балашова ВА. *Гематология: новейший справочник*. Москва: Эксмо; Санкт-Петербург: Сова; 2004. 928 с.
8. Ярмоненко СП, Вайсон АА. *Радиобиология человека и животных*. Москва: Высшая школа; 2004. 549 с.
9. Maxwell MJ. Identification of a 2-stage platelet aggregation process mediating shear-dependent thrombus formation. *Blood*. 2007;109:566–576.

References

1. Kuzin AM. *Prirodnyy radioaktivnyy fon i yego znachenije dlya biosfery Zemli* [Natural radioactive background and its significance for the Earth's biosphere]. Moscow: Nauka; 1991. 115 p. Russian.
2. Kutafina NV, Zavalishina SYu. *Mekhanizmy funktsionirovaniya sosudisto-trombotsitarnogo gomeostaza* [Functioning mechanisms of vascular-platelet homeostasis]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatelnosti*. 2012;1:30–37. Russian.
3. Gavrilov IY, Pozin EYa. Platelet aggregation: the use of optical density fluctuations to study microaggregate formation in platelet suspension. *Thromb Res*. 1989;54(3):215–23.
4. Zupanets IA, Chernykh VP, Usenko VA. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika: metody issledovaniya* [Clinical laboratory diagnostics: research methods.]. Kharkov: Zolotyie stranitsy; 2005. 200 p. Russian.
5. Kozlovsky VI, Kovtun OM, Seroukhova OP. *Metody issledovaniya i klinicheskoye znachenije agregatsii trombotsitov. Fokus na spontannuyu agregatsiyu* [Research methods and clinical significance of platelet aggregation. Focus on spontaneous aggregation]. *Vestnik VGMU*. 2013;12(4):79–91. Russian.
6. Rasheed H, Tirmizi AH. Calcium signaling in human platelet aggregation mediated by platelet activating factor and calcium ionophore. *Journal of biological sciences*. 2004;4(2):117–121.
7. Abdulkadyrov KM, Andreyeva TA, Balashova VA. *Gematologiya: noveyshiy spravochnik* [Hematology: the latest handbook]. Moscow: Eksmo; Saint Petersburg: Sova; 2004. 928 p. Russian.
8. Yarmonenko SP, Vayson AA. *Radiobiology of man and animals*. Moscow: Higher school; 2004. 549 p. Russian.
9. Maxwell MJ. Identification of a 2-stage platelet aggregation process mediating shear-dependent thrombus formation. *Blood*. 2007;109:566–576.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 544:544.7:544.723.21

ПОЛУЧЕНИЕ СОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Е. Ю. ШАЧНЕВА¹⁾

¹⁾*Южно-Российский государственный политехнический университет,
ул. Просвещения, 132, 346428, г. Новочеркасск, Россия*

Представлены результаты исследований сорбентов, полученных на основе природного минерального сырья – опок, в Астраханской обл. Показана роль техногенного воздействия на процесс загрязнения окружающей среды. Рассмотрены способы получения новых сорбционных материалов на основе природных образований, основным компонентом которых является опока, представляющая собой осадочную кремнистую горную породу. Описана структура данного природного минерала, состоящего на 90 % из мелкозернистого аморфного водного кремнезема с примесями глинистого вещества, карбонатов, кремниевых органических остатков, кварца, полевых шпатов, вулканического стекла и т. д. Изучаемый компонент по своему химическому и минеральному составу близок к трепелу, однако отличается от него большей плотностью. Исследованы основные адсорбционно-структурные и физико-химические характеристики рассматриваемых сорбентов. Рассчитаны такие величины физико-химических параметров полученных материалов, как пористость сорбента по ацетону, суммарный объем пор сорбента по воде, содержание влаги в сорбенте и рН водной суспензии сорбента. Определены такие адсорбционно-структурные характеристики, как удельная поверхность сорбента и насыпная плотность. В представленном материале описаны характер поверхности и структура опок как природного минерального сырья, лежащего в основе способов получения рассматриваемых сорбентов. Это позволяет изучить возможные сорбционные свойства описываемых продуктов. Приведены графические схемы строения глинистых минералов как кристаллических структур слоистого типа, атомная решетка вещества которых сочетает в себе два основных структурных элемента.

Образец цитирования:

Шачнева ЕЮ. Получение сорбентов на основе природного минерального сырья. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;2:66–74.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-66-74>

For citation:

Shachneva EYu. Obtaining sorbents based on natural mineral raw materials. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;2:66–74. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-66-74>

Автор:

Евгения Юрьевна Шачнева – кандидат химических наук, доцент; профессор.

Author:

Evgeniya Yu. Shachneva, PhD (chemistry), docent; professor.
evgshachneva@yandex.ru

Представлена графическая схема описываемых структурных элементов. Рассмотрена схема графического изображения структуры монтмориллонита, а также охарактеризован минеральный и химический состав опок Астраханской обл. Все вышесказанное позволяет сделать предположение о возможности их применения в качестве сорбента, а также базового материала для создания новых сорбционных материалов. Полученные результаты работы могут быть использованы для удаления токсикантов из различных сред, минимизировать производственные затраты, повысить эффективность работы адсорбентов в процессах их долговременной эксплуатации.

Ключевые слова: сорбционные процессы; сорбенты; минеральное сырье; удаление токсикантов.

OBTAINING SORBENTS BASED ON NATURAL MINERAL RAW MATERIALS

E. Yu. SHACHNEVA^a

*^aSouth-Russian State Polytechnic University,
132 Prosveshcheniya Street, Novocherkassk 346428, Russia*

The presented material shows the results of studies of sorbents obtained on the basis of natural mineral raw materials – the flask of the Astrakhan region. The role of technogenic impact on the process of environmental pollution is shown. The methods of obtaining new sorption materials based on natural formations, the main component of which is flask, which is a sedimentary siliceous rock, are considered. The structure of this natural mineral is described, consisting of 90 % fine-grained amorphous aqueous silica with admixtures of clay matter, carbonates, silicon organic residues, quartz, feldspar, volcanic glass, etc. The studied component is close to trepel in its chemical and mineral composition, differing from it in greater density. The main adsorption-structural and physico-chemical characteristics of the sorbents under consideration are investigated. The values of the physicochemical parameters of the obtained materials, such as the porosity of the sorbent for acetone, the total pore volume of the sorbent for water, the moisture content in the sorbent and the pH of the aqueous suspension of the sorbent, are calculated. Their adsorption-structural characteristics, such as the specific surface area of the sorbent and bulk density, are determined. The presented material describes the nature of the surface and the structure of the flask as a natural mineral raw material underlying the methods of obtaining the sorbents in question. This suggests possible sorption properties of the described products. Graphical diagrams of the structure of clay minerals as layered crystal structures are presented, the atomic lattice of the substance of which combines two main structural elements. A graphical diagram of the described structural elements is presented. In the course of the work, the scheme of the graphic representation of the montmorillonite structure is considered, and the mineral and chemical composition of the flask of the Astrakhan region is characterized. All of the above allows us to make an assumption about the possibility of their use as a sorbent, as well as a base material for the creation of new sorption materials. The obtained results of the work can be used to remove toxicants from various media, minimize production costs, and increase the efficiency of adsorbents in the processes of their long-term operation.

Keywords: sorption processes; sorbents; mineral raw materials; removal of toxicants.

Введение

Происходящие на планете эволюционные процессы в природе привели к распределению химических элементов. Возможные отклонения от установившегося в ней равновесия принято считать загрязнением окружающей среды. Причиной данных нарушений природного баланса природных равновесий является, прежде всего, деятельность человека, развитие науки и технического прогресса. Все это приводит к серьезным загрязнениям и последствиям. Сегодня загрязнение окружающей среды достигло значительных размеров. Такие отрасли промышленности, как химическая, металлургическая, топливно-энергетическая и многие другие являются основными производителями отходов. Сюда же можно отнести и машиностроение, автомобильный транспорт, сельское хозяйство. Содержание в отходах химических элементов достигло высокого уровня и сопоставимо с содержанием в месторождениях полезных ископаемых, которые подчас называют «техногенными месторождениями». Помимо литосферы часть отходов попадает в гидросферу. Происходит накопление химических элементов в микроорганизмах, донных отложениях и растительности.

Поэтому весьма актуальным является разработка эффективной технологии создания материалов на основе природных материалов, удаления и поглощения (сорбции) элементов из отходов посредством полученных сорбентов. Рассматриваемые далее в материале сорбенты являются частью природной среды. Это природные образования и материалы, полученные на их основе, основным компонентом которых является опока, представляющая собой осадочную кремнистую горную породу. Она (опока) состоит практически на 90 % из мелкозернистого аморфного водного кремнезема с примесями глинистого вещества, карбонатов, кремниевых органических остатков, кварца, полевых шпатов, вулканического стекла и т.д. Это природное образование, состоящее из твердой породы с полураковистым изломом, реже встречаются

более мягкие разновидности. По своему химическому и минеральному она близка к трепелу, отличаясь от него большей плотностью. Астраханские опоки относятся к опаловым породам с примесью кварца и глинистых материалов [1–4].

Характер поверхности и структуры полученных компонентов определяют сорбционные качества материалов. Влияние пористой структуры при этом весьма велико, подчас оно значительнее, чем влияние природы поверхности. Общая оценка пористости характеризуется суммарным объемом пор сорбента. Принимая во внимание, что пористость адсорбентов обусловлена наличием пор с радиусами различных размеров, большинство исследователей разделяло объем пор адсорбента на макро- и микропоры. Микро- и переходные поры играют основную роль в процессе сорбции, определяя техническую ценность сорбентов и их применимость. Характер пористой структуры адсорбентов определяет величину их удельной поверхности, которая характеризует количество адсорбируемого вещества, а также служит для вычисления величин адсорбции, работы и теплоты адсорбции и смачивания, отнесенных к единице поверхности.

Исследование опок с использованием рентгено-фазового, термического, химического и минералогического и других методов анализа показало, что основная масса опок и глин сложена немногими минералами, названными глинистыми [1–4]. Было определено, что эти минералы имеют в основном кристаллическое строение. Наличие аморфных веществ в них весьма незначительно. В минерале наблюдается наличие примеси карбонатов, сульфатов, оксидов металлов, а также кварц, слюда, опал и другие минералы. При этом в структуре вещества находится примесь органических веществ.

В большинстве глинистых минералов можно выделить кристаллические структуры слоистого типа (рис. 1).

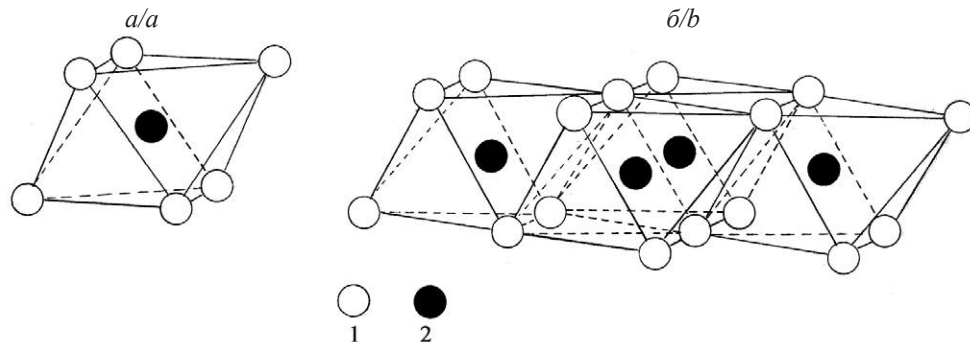


Рис. 1. Графическая схема изображения отдельного октаэдра (а) и октаэдрической сетки структуры (б):
1 – гидроксилы; 2 – алюминий, магний и т. д.

Fig. 1 Graphical diagram of the image of an individual octahedron (a) and an octahedral network of the structure (b):
1 – hydroxyls; 2 – aluminum, magnesium, etc.

В атомной решетке вещества сочетаются два основных структурных элемента. Первый элемент содержит в своем составе два слоя плотноупакованных атомов кислорода или гидроксильных групп с атомами алюминия, железа и магния в октаэдрической координации. Второй элемент состоит из кремнекислородных тетраэдров. На основании исследований необходимо выделить в первом элементе атомы металлов, которые равноудалены от 6 атомов кислорода или гидроксидов. Во втором элементе атомы кремния также равноудалены от 4 атомов кислорода или гидроксидов (рис. 2).

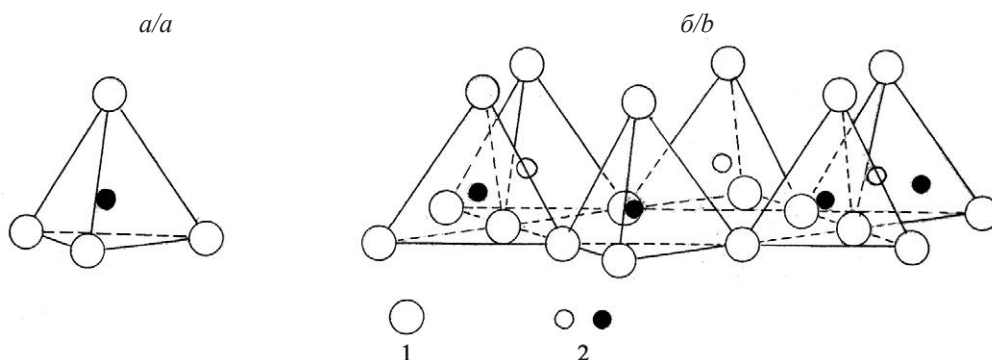


Рис. 2. Графическая схема изображения кремнекислородного тетраэдра (а) и сетки кремнекислородных тетраэдров, расположенных по гексагональному мотиву (б): 1 – атомы кислорода; 2 – атомы кремния

Fig. 2. Graphic scheme of the representation of a silicon-oxygen tetrahedron (a) and a grid of silicon-oxygen tetrahedra arranged in a hexagonal motif (b): 1 – oxygen atoms; 2 – silicon atoms

В образующейся гексагональной сетке связанные кремнекислородные тетраэдры расположены таким образом, что их вершины направлены в одну и ту же сторону, а основания тетраэдров находятся в одной и той же плоскости.

На рис. 3 приведено графическое изображение схемы структуры монтмориллонита.

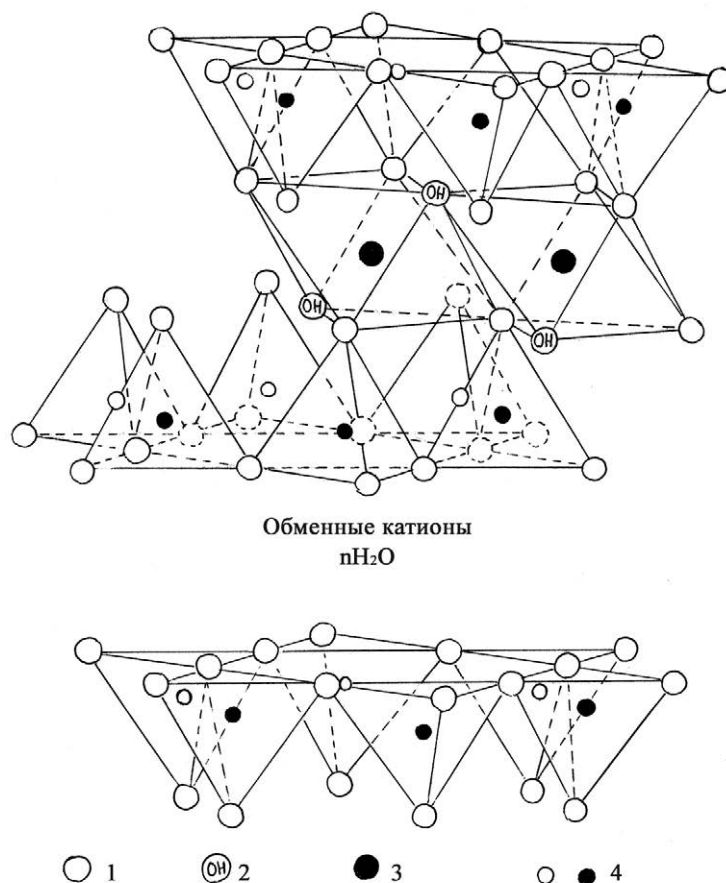


Рис. 3. Графическое изображение схемы структуры монтмориллонита:
1 – кислород; 2 – гидроксил; 3 – алюминий; железо, магний; 4 – кремний, иногда алюминий

Fig. 3. Graphical representation of the structure diagram of montmorillonite:
1 – oxygen; 2 – hydroxyl; 3 – aluminum; iron, magnesium; 4 – silicon, sometimes aluminum

По гранулометрическому составу глины – это полидисперсные системы, основная масса частиц которых имеет диаметр < 0,01 мм и до 25 % частиц – диаметр < 0,001 мм.

Минеральный состав опок приведен в табл. 1.

Таблица 1

Минеральный состав опоки Каменоярского месторождения (по данным рентгенофазового анализа)

Table 1

Mineral composition of the flask of the Kamennyarsk deposit according to X-ray phase analysis

№	Наименование пробы	ОКТ-фаза*, %	Кварц, %	Гидрослода, %	Монтмориллонит, %	Цеолит, %	Кальцит, %
1	Опока исходная, фракция (1,0–4,0)×10 ⁻³ м	86	4	3	5	2	–
2	Опока отмываемая водой (1,0–4,0)×10 ⁻³ м	93,5	3	1,5	2	–	–

Примечание. *ОКТ – опал-кристобалит-тридимитовая фаза.

На основании данных рентгенофазового анализа в исходной пробе опоки содержание опал-кристобалит-тридимитовой фазы довольно высокое ($\approx 86\%$) и отмытой пробе $\approx 93,5\%$. Содержание глинистой (монтмориллонита) фазы невысоко (≈ 5) и 2% , кварца – 4 и 3% , гидрослюда – 3 и $1,5\%$ соответственно. В исходной пробе, помимо основных компонентов, зафиксировано наличие цеолита. Его величина находится в пределах 2% .

Химический состав опок Астраханской обл. был изучен различными физико-химическими и химическими методами, результаты которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав опок Астраханской области

Table 2

Chemical composition of the flask of the Astrakhan region

Компоненты		Содержание, %	Допустимые уровни, %
SiO ₂ ,	%	75–80	–
Al ₂ O ₃ ,	%	18–23	–
Свинец,	мг/кг	1,27	Не более 32,0
Кадмий,	мг/кг	< 0,1	Не более 1,0
Мышьяк,	мг/кг	0,01	Не более 2,0
Ртуть,	мг/кг	0,01	Не более 2,1
Марганец,	мг/кг	10,3	Не более 100,0
Медь,	мг/кг	0,8	Не более 3,0
Кобальт,	мг/кг	0,5	Не более 3,0
Молибден,	мг/кг	0,5	Не более 3,0
Магний,	мг/кг	50,0	Не более 100,0
Цинк,	мг/кг	12,5	Не более 23,0
Стронций-90,	Бк/кг	0,5	
Цезий-137,	Бк/кг	0,7	
Уран (радий),	%	0,1	
Эффективная удельная активность,	Бк/кг	1,3	Не более 370
Содержание бенз(а)пирена и др. полиядерных ароматических,	мкг/кг	9,33	Не более 50

На основании данных табл. 2 можно сделать вывод о том, что опоки Астраханской обл. содержат большое количество оксида кремния и алюминия. Это дает возможность использования материала в качестве сорбента. Содержание остальных элементов незначительно. Оно не превышает допустимых уровней, поэтому применение минерала для очистки питьевой воды весьма оправдано. Для определения минералогического состава компонента большую роль играет молекулярное отношение полуторных оксидов SiO₂ : R₂O₃, которое имеет численное значение больше четырех. Данное соотношение весьма характерно для глин и опок монтмориллонитового состава.

Опоки Астраханской обл. уникальный материал, способный поглощать различные органические и неорганические соединения из воды и воздушной среды, не нанося вред здоровью человека, являясь универсальным поглотителем. Но несмотря на это поглощение различных компонентов опоками проходит в основном только на поверхности минерала. Необходимо было создание таких сорбентов, которые бы поглощали по всему объему, и при этом сохраняли бы уникальные сорбционные свойства. С этой целью были получены модифицированные сорбенты серии СВ. Остановимся на них более подробно [5–12].

Материалы и методы исследования

Способ получения сорбента СВ-1-А. К 100 г тонкоизмельченной опоки с размерами частиц около 0,01 мм в поперечнике (месторождение с. Каменный Яр Астраханской обл.) вносят 100 г портландцемента-500, 10 г тонкоизмельченного пиролюзита (MnO_2), 25 см³ 10 %-ного раствора хлорида натрия, полученную смесь тщательно перемешивают. Массе дают подсохнуть до состояния, когда из нее можно сформовать гранулы, высушивают при температуре 100–105 °С, далее дают изделию отвердеть, на что уходит 3–4 суток. Полученный материал выдерживают в воде до тех пор, пока реакция на хлорид-ион будет отрицательной и высушивают при температуре 100–105 °С.

Способ получения сорбента СВ-1-А2. К 100 г тонкоизмельченного сорбента СВ-1-А с размерами частиц около 0,01 мм в поперечнике прибавляем 100 см³ флокулянта Z-92. Полученный раствор тщательно перемешивают и дают отстояться, сливают оставшуюся жидкость и заливают 500 см³ дистиллированной воды, постоянно перемешивая. Повторяют процедуру, затем оставляем сорбент на 1 час. Полученный сорбент высушивают в тонком слое при температуре 50–60 °С, постоянно перемешивая.

Способ получения сорбента СВ-1-А3. К 100 г тонкоизмельченного сорбента СВ-1-А с размерами частиц около 0,01 мм в поперечнике прибавляем 100 см³ флокулянта А-1510. Полученный раствор тщательно перемешивают и дают отстояться, сливают оставшуюся жидкость и заливают 500 см³ дистиллированной воды, постоянно перемешивая. Повторяют процедуру, затем оставляем сорбент на 1 ч. Полученный сорбент высушивают в тонком слое при температуре 50–60 °С, постоянно перемешивая [5–12].

Изучение основных адсорбционно-структурных и физико-химических характеристик модифицированных сорбентов (СВ-1-А, СВ-1-А2, СВ-1-А3). С использованием стандартных методик были изучены основные характеристики полученного сорбента: *физико-химические* – пористость сорбента по ацетону, суммарный объем пор сорбента по воде ($V_{\text{сум}}$), содержание влаги в сорбенте и рН водной суспензии сорбента; *адсорбционно-структурные* – удельная поверхность сорбента, насыпная плотность (табл. 4, 5) [5–12].

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве сорбционных материалов в различных отраслях промышленности применяются такие синтетические сорбенты, отходы производств, как шлак, зола, опилки и др., активированные угли, а также неорганические сорбенты, в том числе минеральные – силикагели, алюмогели, глины, цеолиты. Возможное использование природных минералов весьма оправдано как с экологической, так и с экономической точки зрения. Говоря о методе сорбционной очистки, нельзя не отметить, что он получил достаточно широкое распространение в связи с отсутствием вторичных загрязнений и высокой эффективностью. Эффективность сорбентов зависит от площади поверхности и присутствия активных участков на ней. Процесс адсорбции определяется не только свойствами и количеством введенного сорбента, но и химической природой и концентрацией поглощаемых компонентов. Количество поглощаемого вещества зависит как от свободной площади поверхности, так и ее свойств. При этом увеличение площади поверхности материала можно достичь такими методами, как измельчение, грануляция, увеличение пористости.

Природные сорбенты, к которым можно отнести и рассматриваемые в ходе исследования опоки и модифицированные сорбенты, являются сложными полиминеральными образованиями с разнообразной структурой частиц и природой поверхности. Как было описано выше, в качестве основной составной части природных сорбентов выделяют природные гели кремнезема, алюминия и алюмосиликагель.

Для создания сорбентов с большим числом микропор в смесь, состоящую из опоки, портландцемента-500 и пиролюзита вносили раствор хлорида натрия. После того как цементный раствор полностью затвердел, хлорид натрия из полученного материала вымывали водой. В результате этого получали сорбент с высокой пористостью, твердостью, прочностью, а также высокой поглотительной способностью по отношению к ряду ионов металлов и органических соединений. Основным преимуществом сорбентов данного типа может являться большая удельная поверхность. У слоистых силикатов с расширяющейся вследствие набухания структурой (вермикулит и монтмориллонит) площадь поверхности может достигать 800 м²/г.

Смысл введения пиролюзита заключается в получении сорбента, который окисляет низкомолекулярные органические и неорганические соединения. Для получения последующих сорбентов данного класса на основе сорбента СВ-1-А в структуру материала были введены флокулянты.

Для исходных опок и модифицированных сорбентов, имеющих различную дисперсность, были определены следующие параметры: пористость по ацетону, суммарный объем пор по воде, влагосодержание, рН водной суспензии, представленные в табл. 3–5.

Таблица 3

Основные параметры различных фракций опоки Каменноярского месторождения

Table 3

The main parameters of various flask fractions of the Kamennyarsk deposit

Образец	Фракция × 10 ³ , м	Пористость по ацетону, %	V _{сум} пор по воде × 10 ⁻³ , м ³ /кг	Содержание влаги, %	pH водной суспензии
Опока исх.	0,1–1,0	25	0,550	2	6,8–7
Опока исх.	4,0–6,0	15	0,600	2	6,8–7

Все природные цеолиты можно отнести к каркасным алюмосиликатам, в тетраэдрической структуре которых имеются полости, занятые такими одно- и двухвалентными катионами, как Na, K, Mg, Ca, Ba, а также молекулами воды, способными свободно поглощаться и удаляться структурой. Их структура построена из тетраэдров SiO₄ и AlO₄, связанных между собой. Из-за того, что валентность алюминия меньше валентности кремния, поверхность цеолита заряжена отрицательно. Этот заряд на поверхности минерала может компенсироваться однозарядными катионами, при этом они могут быть заменены на любой другой катион. Это свойство используют для извлечения из сточных вод катионов тяжелых металлов, которые к тому же могут сорбироваться в подходящих по размеру порах цеолитов.

Природные цеолиты также широко используются на практике в качестве сорбентов. В зависимости от типа и месторождения они имеют различную удельную микропористость и площадь поверхности.

Таблица 4

Основные физико-химические характеристики сорбентов

Table 4

Basic physico-chemical characteristics of sorbents

Сорбент	Диаметр частиц, мм	Пористость по ацетону, %	V _{сум} пор по воде × 10 ³ , м ³ /кг	Содержание влаги, %	pH водной суспензии
СВ-1-А	0,001–20	40	0,95	1,0	7,0
СВ-1-А2	0,001–20	42	0,92	1,2	8,0
СВ-1-А3	0,001–20	39	0,87	0,9	8,0

Таблица 5

Основные адсорбционно-структурные характеристики сорбентов

Table 5

The main adsorption-structural characteristics of sorbents

Сорбент	Диаметр частиц, мм	Насыпная плотность, г/см ³	Удел. поверхность, м ² /г
СВ-1-А	0,001–20	0,88	840
СВ-1-А2	0,001–20	0,72	820
СВ-1-А3	0,001–20	0,65	760

Полученные вышеперечисленные модифицированные сорбенты обладают такими высокими адсорбционными характеристиками, как большая удельная поверхность и высокая пористость. Все это позволяет считать, что полученные сорбенты возможно использовать для поглощения тяжелых токсичных металлов свинец и кадмий (табл. 6) [5–12]. Достаточно высокие значения насыпной плотности частиц позволяют сделать вывод о том, что частицы сорбентов достаточно прочные образования, сохраняющие свою форму и размеры при перемешивании, небольших механических воздействиях и при истирании.

Показатели для исходного материала и полученных сорбентов взаимосвязаны и позволяют прогнозировать изменение прочностных характеристик адсорбентов в процессах их долговременной эксплуатации.

Для всех вышеописанных сорбентов был изучен процесс адсорбции ряда веществ, определены величины параметров адсорбции и сорбционной емкости рассматриваемых материалов [12]. Полученные величины приведены в табл. 6.

Таблица 6

Основные характеристики сорбции ионов кадмия и свинца на сорбентах группы СВ ($n=6, P=0,95, t_p=2,57$)

Table 6

The main characteristics of the sorption of cadmium and lead ions on sorbents of the SV group ($n=6, P=0,95, t_p=2,57$)

Определяемая характеристика	Температура, К	Сорбенты		
		СВ-1-А	СВ-1-А2	СВ-1-А3
Емкость сорбента (Γ_{∞}), мг/г	277	33,30 ± 3,3	66,67 ± 6,7	62,50 ± 6,3
	298	40,00 ± 4,0	100,00 ± 10,0	83,33 ± 8,3
	313	50,00 ± 5,0	50,00 ± 5,0	50,00 ± 5,0
		Кадмий Cd (II)		
Емкость сорбента (Γ_{∞}), мг/г	277	40,00 ± 3,3	66,67 ± 6,7	90,90 ± 9,0
	298	43,67 ± 4,4	90,91 ± 9,0	95,24 ± 9,0
	313	66,67 ± 6,0	50,00 ± 5,0	62,50 ± 6,0

Заключение

Полученные результаты позволяют считать, что емкость рассматриваемых сорбентов по отношению к тяжелым токсичным металлам в среднем высока, что дает возможность извлекать из воды достаточно большие количества токсикантов в широком диапазоне температур. Применение рассматриваемых природных минералов и полученных на их основе высокодисперсных и пористых тел в качестве сорбентов способствует усилению интереса к изучению их строения, структуры, а также физико-химических свойств, что и предполагают наши дальнейшие исследования в этой области.

Библиографические ссылки

1. Шачнева ЕЮ, Хентов ВЯ. *Физико-химические процессы в техносфере*. Москва: Русайнс; 2016. 138 с.
2. Алыков НМ. *Природные ископаемые ресурсы и экологические проблемы Астраханского края*. Астрахань: Астраханский университет; 2005. 113 с.
3. Шачнева ЕЮ. *Физико-химия адсорбции флокулянтов и синтетических поверхностно-активных веществ на сорбенте СВ-1-А* [автореферат диссертации]. Махачкала: [б. и.]; 2011. 23 с.
4. Шачнева ЕЮ. *Физико-химия адсорбции флокулянтов и синтетических поверхностно-активных веществ на сорбенте СВ-1-А* [диссертация]. Махачкала: [б. и.]; 2011. 139 с.
5. Шачнева ЕЮ, Алыков НМ. Изучение сорбции флокулянтов на сорбенте СВ-1-А. *Безопасность жизнедеятельности*. 2010;8:39–42.
6. Шачнева ЕЮ, Алыков НМ. Исследование процесса сорбции флокулянтов на сорбенте СВ-1-А. *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*. 2010;8(53):50–54.
7. Шачнева ЕЮ, Алыков НМ. Сорбент для очистки воды от флокулянтов. *Экология и промышленность России*. 2010;8:20–21.
8. Шачнева ЕЮ. Изучение сорбционных свойств гранулированного модифицированного сорбента (СВ-1-АЛ). *Водоподготовка. Водоочистка. Водоснабжение*. 2014;12(84):4–5.
9. Шачнева ЕЮ, Арчибасова ДЕ, Зухайраева АС, Магомедова ЭМ. Извлечение меди, цинка и кадмия из водных растворов нефтяных месторождений сорбентом, полученном на основе опок Астраханской области. *Геология, география и глобальная энергия*. 2014;2(53):93–104.
10. Шачнева ЕЮ. Экспериментальное исследование сорбента, полученного на основе опок Астраханской области. *Вода: химия и экология*. 2017;5:60–66.
11. Шачнева ЕЮ. Извлечение железа из водных растворов нефтяных месторождений сорбентом, полученным на основе опок Астраханской области. *Экологические системы и приборы*. 2017;3:17–21.
12. Shachneva EY, Archibasova DE. Adsorption of cadmium ions from aqueous solutions on modified sorbents. *Chemistry & Chemical Technology*. 2018;12(2):182–187.

References

1. Shachneva EYu, Khentov VYa. *Fiziko-khimicheskiye protsessy v tekhnosfere* [Physicochemical processes in the technosphere]. Moscow: Rusays, 2016. 138 p. Russian.

2. Alykov NM. *Prirodnyye iskopayemyye resursy i ekologicheskiye problemy Astrakhanskogo kraya* [Natural mineral resources and environmental problems of Astrakhan region]. Astrakhan: Astrakhan University, 2005. 113 p. Russian.
3. Shachneva EY. *Fiziko-khimiya adsorbtsiyi flokulyantov i sinteticheskikh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na sorbente SV-1-A* [Physics/chemistry of flocculants and synthetic surface-active substances with SV-1-A sorbent] [PhD thesis]. Makhachkala: [publisher unknown]; 2011. 23 p. Russian.
4. Shachneva EY. *Fiziko-khimiya adsorbtsiyi flokulyantov i sinteticheskikh poverkhnostnoaktivnykh veshchestv na sorbente SV-1-A* [Physics/chemistry of flocculants and synthetic surface-active substances with SV-1-A sorbent] [dissertation]. Makhachkala: [publisher unknown]; 2011. 139 p. Russian.
5. Shachneva EYu, Alykov NM. *Izucheniye sorbtsii flokulyantov na sorbente CV-1-A* [Study of flocculants sorption on the sorbent SV-1-A]. *Health and Safety*. 2010;8:39–42. Russian.
6. Shachneva EYu, Alykov NM. *Issledovaniye protsessa sorbtsii flokulyantov na sorbente SV-1-A* [Investigation of flocculants sorption process on sorbent SV-1-A]. *Proceedings of the universities. Chemistry and chemical technology*. 2010;8(53):50–54. Russian.
7. Shachneva EYu, Alykov NM. *Sorbent dlya ochistki vody ot flokulyantov* [Sorbents for water purification from flocculants]. *Ecology and Industry of Russia*. 2010;8:20–21. Russian.
8. Shachneva EYu. *Izucheniye sorbtsionnykh svoystv granulirovannogo modifitsirovannogo sorbenta (SV-1-AL)* [Study of sorption properties of granular modified sorbent (SV-1-AL)]. *Water treatment. Water treatment. Water supply*. 2014;12(84):4–5. Russian.
9. Shachneva EYu, Archibasova DE, Zukhayraeva AS, Magomedova EM. *Izvlecheniye medi, tsinka i kadmiya iz vodnykh rastvorov neftyanykh mestorozhdeniy sorbentom, poluchennom na osnove opok Astrakhanskoy oblasti* [Extraction of copper, zinc and cadmium from aqueous solutions of oil fields with a sorbent obtained on the basis of the Astrakhan region]. *Geology, geography and global energy*. 2014;2(53):93–104. Russian.
10. Shachneva EYu. *Eksperimental'noye issledovaniye sorbenta, poluchennogo na osnove opok Astrakhanskoy oblasti* [Experimental study of a sorbent obtained on the basis of the flask of the Astrakhan region]. *Water: chemistry and ecology*. 2017;5:60–66. Russian.
11. Shachneva EYu. *Izvlecheniye zheleza iz vodnykh rastvorov neftyanykh mestorozhdeniy sorbentom, poluchennym na osnove opok Astrakhanskoy oblasti* [Extraction of iron from aqueous solutions of oil fields with a sorbent obtained on the basis of the flask of the Astrakhan region]. *Ecological systems and devices*. 2017;3:17–21. Russian.
12. Shachneva EY, Archibasova DE. Adsorption of cadmium ions from aqueous solutions on modified sorbents. *Chemistry & Chemical Technology*. 2018;12(2):182–187.

Статья поступила в редколлегию 18.04.2022.
Received by editorial board 18.04.2022.

УДК 634.737:581.5:581.522.4(476)

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА СОСТОЯНИЕ ПИГМЕНТНОГО ФОНДА ПЛАСТИД МИКРОЗЕЛЕНИ ГОРОХА ОВОЩНОГО

А. М. ПАШКЕВИЧ¹⁾, А. И. ЧАЙКОВСКИЙ¹⁾, Ж. А. РУПАСОВА²⁾, В. С. ЗАДАЛЯ²⁾

¹⁾Институт овощеводства, Национальная академия наук Беларуси,
ул. Ковалёва, 2, 223013, а/г Самохваловичи, Минская обл., Беларусь,

²⁾Центральный ботанический сад, Национальная академия наук Беларуси,
ул. Сурганова, 2в, 220012, Минск, Беларусь

Приведены результаты исследования продолжительности светодиодного освещения (8, 10, 12, 14, 16 ч) при выращивании микрозелени гороха овощного в условиях светокультуры в фитотроне, оснащённом облучательной фитоустановкой стеллажного типа *FLORA LED 300/2/4* с десятью светодиодными светильниками *ДСП08-3x12-004 УХЛ4*, на содержание в образцах производимой продукции фотосинтезирующих пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, β -каротина и ксантофиллов). Установлено, что наиболее выраженная активизация накопления и зелёных, и жёлтых пластидных пигментов в микрозелени гороха овощного, соответственно, на 12–19 % и 33 % по сравнению с контролем (12-часовая экспозиция), установлена при 14- и 16-часовом освещении, способствовавшем увеличению содержания β -каротина на 51 и 33 %, тогда как 8-часовое освещение обусловливало активизацию накопления последнего лишь на 12 % при отсутствии достоверного влияния на темпы его биосинтеза 10-часового освещения. При 14- и 16-часовой экспозиции обнаружено наиболее значительное в эксперименте обогащение микрозелени гороха ксантофиллами на 27 и 33 % по сравнению с контролем. В соответствии со снижением содержания пластидных пигментов в микрозелени гороха обозначена следующая последовательность вариантов опыта с разной продолжительностью освещения:

14 ч > 16 ч > 8 ч > 12 ч > 10 ч.

Установлено, что наиболее насыщенным фондом фотосинтезирующих пигментов в рамках эксперимента характеризовались образцы микрозелени при 16- и особенно при 14-часовой продолжительности светодиодного освещения, тогда как наиболее обедненным – при 8- и особенно при 10-часовой продолжительности.

Ключевые слова: горох овощной; микрозелень; продолжительность светодиодного освещения; хлорофиллы; каротиноиды.

Образец цитирования:

Пашкевич АМ, Чайковский АИ, Рупасова ЖА, Задаля ВС. Влияние продолжительности светодиодного освещения на состояние пигментного фонда пластид микрозелени гороха овощного. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;2:75–80.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-75-80>

For citation:

Pashkevich HM, Tchaikovsky AI, Rupasova ZhA, Zadalia VS. Influence of the duration of led lighting on the state of the pigment fund of plas-tids of vegetable pea microgreen. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;2:75–80. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-75-80>

Авторы:

Анна Михайловна Пашкевич – аспирант; заведующий сектором бобовых овощных культур.

Андрей Иванович Чайковский – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; директор Института овощеводства.

Жанна Александровна Рупасова – доктор биологических наук, профессор; член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси; заведующий лабораторией химии растений.

Виктория Сергеевна Задаля – научный сотрудник лаборатории химии растений.

Authors:

Hanna M. Pashkevich, graduate student; head of the legume vegetable crops sector.

faba@belniio.by

Andrey I. Tchaikovsky, PhD (agriculture), docent; director, Institute of Vegetable Growing.

director@belniio.by

Zhanna A. Rupasova, doctor of science (biology), full professor; corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus; head of the laboratory of plant chemistry.

j.rupasova@cbg.org.by

Viktoriya S. Zadalia, researcher of the laboratory of plant chemistry.

zada@mail.ru

INFLUENCE OF THE DURATION OF LED LIGHTING ON THE STATE OF THE PIGMENT FUND OF PLASTIDS OF VEGETABLE PEA MICROGREEN

H. M. PASHKEVICH^a, A. I. TCHAIKOVSKY^a, Zh. A. RUPASOVA^a, V. S. ZADALIA^b

^aThe Institute of Vegetable Growing, National Academy of Sciences of Belarus,
2 Kavaliova Street, ag. Samakhvalavichy 223013, Minsk region, Belarus,

^bCentral Botanical Garden, National Academy of Sciences of Belarus,
2v Surhanava Street, Minsk 220012, Belarus

Corresponding author: Zh. A. Rupasova (j.rupasova@cbg.org.by)

The article presents the results of a study of the duration of LED lighting (8, 10, 12, 14, 16 hours) when growing vegetable pea microgreens under light culture conditions in a phytotron equipped with an irradiating rack-type plant *FLORA LED 300/2/4* with ten LED lamps *DSP08–3x12–004 UHL4*, for the content of photosynthetic pigments (chlorophylls a and b, β-carotene and xanthophylls) in the samples of manufactured products. It was found that the most pronounced activation of the accumulation of both green and yellow plastid pigments in vegetable pea microgreens – by 12–19 % and 33 %, respectively, compared with the control (12-hour exposure), was established at 14- and 16-hour illumination, which contributed to an increase in the content of β-carotene by 51 and 33 %, while 8-hour illumination caused the activation of the accumulation of the latter by only 12 % in the absence of a significant effect on the rate of its biosynthesis of 10-hour illumination. At 14- and 16-hour exposure, the most significant enrichment of pea microgreens with xanthophylls was found in the experiment by 27 and 33 % compared with the control. In accordance with the decrease in the content of plastid pigments in pea microgreens, the following sequence of experiment variants with different illumination durations is indicated:

14 hours > 16 hours > 8 hours > 12 hours > 10 hours.

It was found that the most saturated stock of photosynthetic pigments in the experiment was characterized by microgreen samples at 16 and especially at 14-hour duration of LED lighting, while the most depleted – at 8- and especially at 10-hour duration.

Keywords: vegetable peas; microgreens; LED lighting duration; chlorophylls; carotenoids.

Введение

В последние годы существенно увеличился спрос населения Республики Беларусь на продукцию микрозелени овощных культур, в том числе гороха овощного как источника широкого спектра полезных веществ. Вместе с тем значительную роль при ее выращивании в условиях закрытой контролируемой среды играет уровень освещения, являющийся сигналом к росту и развитию растений и одновременно источником энергии для реализации метаболических процессов [1]. При этом ответная реакция растительного организма при адаптации к условиям световой среды проявляется не только в изменениях морфофизиологических показателей, но и в перестройке его светособирающего комплекса [2]. Наиболее важными характеристиками светового режима являются спектральный состав и плотность потока фотонов (интенсивность излучения), но особенно важна продолжительность освещения (фотопериод), играющая первостепенную роль в накоплении фитомассы и синтезе вторичных метаболитов [3].

В мировой практике при производстве микрозелени овощных культур широко используются искусственные источники освещения – светодиоды. Однако видоспецифичный и даже сортоспецифичный характер требований культиваров к условиям освещения обусловил необходимость в проведении исследований по оптимизацию их светового режима, обеспечивающего высокие биопродукционные и биохимические характеристики конечной продукции [4–9]. Тем не менее в зарубежной научной литературе информация по данному вопросу носит весьма ограниченный характер, а в отечественной она отсутствует вовсе.

На наш взгляд, важнейшим критерием ответной реакции растений на условия освещения является характер соответствующих изменений в пигментном комплексе пластид ассимилирующих органов. С целью установления влияния продолжительности светодиодного освещения на основные характеристики фонда фотосинтезирующих пигментов микрозелени гороха овощного, в 2020–2021 гг. в РУП «Институт овощеводства» был проведен производственный эксперимент при ее выращивании в условиях светокультуры в фитотроне.

Материалы и методы исследований

Исследования выполнялись в рамках производственного эксперимента с микрозеленью гороха овощного (сорт Павлуша) селекции РУП «Институт овощеводства». Предварительно были определены лабораторная всхожесть и энергия прорастания отобранных семян для исключения возможности использования посевного материала с низкими кондиционными показателями: установленная всхожесть

находилась на уровне 98 %, энергия прорастания – на уровне 97 %. Посевной материал гороха овощного промывался и выдерживался в отстоянной воде в течение 12 ч со следующими характеристиками: температура + 22 °С, pH 7,7, содержание хлора не более 1,1 мг/л. Перед посевом семена дезинфицировались 3%-ным раствором перекиси водорода и снова промывались водой. Посев микрозелени гороха овощного выполнялся сплошным методом из расчета 600 шт. семян на делянку. Полив проводился через сутки по 60 мл на делянку отстоянной водопроводной водой ранее указанных характеристик.

Культивирование микрозелени осуществлялось в полипластовых поддонах (179×132 мм, объемом 750 мл), простерилизованных 96 % этиловым спиртом. В качестве грунта для выращивания использовался подготовленный торфяной субстрат, проавтоклавированный в паровом автоклаве ВК-75-01 при следующем режиме: время стерилизационной выдержки 20 мин, температура 132 ± 2 °С и давление 0,1 МПа. Опыты закладывались в трехкратной повторности в три цикла выращивания. Расположение делянок выбрано рендомизированное, размер одной делянки составлял 237 см², площадь под одним вариантом соответствовала 0,4 м².

Выращивание опытных растений осуществлялось в условиях светокультуры с использованием фотостановки стеллажного типа *FLORA LED 300/2/4*, оснащенной десятью светодиодными светильниками *ДСП08-3x12-004 УХЛ4* (разработка и производство ГНПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси»). Опытная продолжительность освещения составляла 8, 10, 12, 14 и 16 ч; в качестве контроля было принято значение фотопериода, равное 12 ч.

Определение содержания фотосинтезирующих пигментов в образцах микрозелени гороха осуществляли в лаборатории химии растений Центрального ботанического сада НАН Беларуси с использованием следующих методов: в свежих усредненных пробах растительного материала определяли содержание хлорофиллов *a* и *b* по методу Т. Н. Годнева [10, 11], β -каротина и суммы каротиноидов – по ГОСТ 8756.22-80¹; сухих веществ – по ГОСТ 31640-2012².

Все измерения и определения выполнены в 2-кратной биологической и 3-кратной аналитической повторности с последующей статистической обработкой экспериментальных данных по методике, принятой для биологических исследований с использованием программы *Microsoft Office Excel 2007*.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты повариантного исследования состояния фонда фотосинтезирующих пигментов в микрозелени гороха овощного при разной продолжительности светодиодного освещения, приведенные в табл. 1, показали, что суммарное содержание хлорофиллов в ее сухой массе изменялось в диапазоне 608,5–757,0 мг/100 г, в том числе хлорофилла *a* – 417,5–533,1 мг/100 г, хлорофилла *b* – 191,1–223,9 мг/100 г. При этом суммарное содержание желтых пластидных пигментов в сухом веществе микрозелени варьировалось в рамках эксперимента от 143,8 до 191,5 мг/100 г, в том числе β -каротина – от 32,9 до 49,8 мг/100 г, ксантофиллов – от 110,9 до 147,8 мг/100 г. При этом максимальные показатели накопления и зеленых, и желтых фотосинтезирующих пигментов были достигнуты при 16- и особенно при 14-часовой экспозициях, тогда как минимальные при 8- и особенно 10-часовой.

Заметим, что продолжительность светодиодного освещения не оказала существенного влияния на производные характеристики пигментного фонда пластид, что подтверждалось сравнительной узостью диапазонов варьирования соотношений количеств хлорофиллов *a* и *b*, а также хлорофиллов и каротиноидов, соответствовавших значениям 2,2–2,5 и 3,7–4,4. Что касается соотношения количеств β -каротина и ксантофиллов, то, независимо от продолжительности освещения, оно было весьма стабильным в рамках эксперимента и не превышало 0,3–0,4, что указывало на приоритетную роль ксантофиллов в формировании пула желтых пигментов.

Как и следовало ожидать, сравнение исследуемых характеристик пигментного фонда пластид микрозелени гороха при разной продолжительности светодиодного освещения вывило существенные различия как в содержании, так и в соотношении его основных компонентов (табл. 2). При этом наиболее выраженная активизация накопления и зеленых, и желтых пигментов установлена при 14- и 16-часовой экспозициях. Это подтверждалось весьма заметным превышением контрольного уровня общего содержания данных компонентов пигментного комплекса в соответствующих вариантах опыта на 12–19 и 33 %. При этом 8-часовая продолжительность освещения не оказала достоверного влияния на общее содержание хлорофиллов и лишь незначительно (не более чем на 6 %) увеличила таковое каротиноидов, тогда как 10-часовая обусловила даже некоторое (не более чем на 4 %) обеднение микрозелени гороха зелеными пигментами по сравнению с контролем исключительно за счет ослабления биосинтеза хлорофилла *a* при крайне слабой активизации такового желтых пигментов.

¹ГОСТ 8756.22-80. Продукты переработки плодов и овощей. Метод определения каротина. Введ. 01.01.81. Дата последнего изменения 13.07.2017. Москва: Изд-во стандартов, 2010. 6 с.

²ГОСТ 8756.2-82. Методы определения сухих веществ. Введен 01.01.1983. Москва: Изд-во стандартов, 1982. 5 с.

Таблица 1

Содержание хлорофиллов и каротиноидов (мг на 100 г сухой массы) в микрозелени гороха овощного при разной продолжительности светодиодного освещения

Table 1

The content of chlorophylls and carotenoids (mg per 100 g dry weight) in vegetable pea microgreens at different durations of LED lighting

Продолжительность освещения	Хлорофиллы							
	a		b		a+b		a/b	
	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t
12 ч – Контроль	438,0 ± 1,6		196,0 ± 2,7		634,0 ± 4,3		2,2 ± 0,1	
8 ч	443,4 ± 1,2	2,2	197,5 ± 1,0	0,5	640,9 ± 1,6	1,5	2,2 ± 0,1	0,4
10 ч	417,5 ± 0,5	-12,3*	191,1 ± 1,9	-1,5	608,5 ± 2,4	-5,2*	2,2 ± 0,1	-1,7
14 ч	533,1 ± 0,5	56,8*	223,9 ± 2,6	7,5*	757,0 ± 3,0	23,5*	2,4 ± 0,1	4,4*
16 ч	506,1 ± 0,2	42,3*	200,7 ± 1,1	1,6	706,8 ± 1,2	16,4*	2,5 ± 0,1	11,1*

	Каротиноиды								Хлорофиллы/ Каротиноиды	
	сумма		β-каротин		ксантофиллы		β-каротин/ксантоф			
	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t	$\bar{x} \pm s_x$	t
12 ч – Контроль	143,8 ± 0,1		32,9 ± 0,1		110,9 ± 0,1		0,3 ± 0,01		4,4 ± 0,1	
8 ч	153,0 ± 0,3	29,3*	36,9 ± 0,4	8,9*	116,1 ± 0,1	37,0*	0,3 ± 0,01	1,2	4,2 ± 0,1	-6,1*
10 ч	148,4 ± 1,1	4,1*	33,1 ± 0,6	0,3	115,4 ± 1,5	3,0*	0,3 ± 0,01	-1,2	4,1 ± 0,1	-7,5*
14 ч	191,1 ± 3,4	14,1*	49,8 ± 0,6	26,9*	141,3 ± 3,8	8,0*	0,4 ± 0,01	4,4*	4,0 ± 0,1	-5,2*
16 ч	191,5 ± 2,9	16,4*	43,7 ± 0,3	35,8*	147,8 ± 2,8	13,3*	0,3 ± 0,01	-0,1	3,7 ± 0,1	-11,8*

Примечание. * – статистически значимые по t-критерию Стьюдента различия с контролем при $p < 0,05$.

Вместе с тем только на фоне 14- и особенно 16-часовой продолжительности освещения темпы биосинтеза хлорофилла a заметно превышали таковые хлорофилла b, что подтверждалось на 9–14 % более высокими значениями соотношения их количеств (см. табл. 2), тогда как при меньшей продолжительности освещения достоверных различий с контролем по данному признаку не выявлено.

Таблица 2

Относительные различия с контролем вариантов опыта с разной продолжительностью светодиодного освещения по содержанию хлорофиллов и каротиноидов в сухом веществе микрозелени гороха овощного, %

Table 2

Relative differences with the control of experimental variants with different durations of LED lighting in the content of chlorophylls and carotenoids in the dry matter of vegetable pea microgreens, %

Продолжительность освещения	Хлорофиллы				Каротиноиды				Хлорофиллы ÷ каротиноиды	Совокупный эффект*	
	a	b	a+b	a÷b	сумма	β-каротин	ксантофиллы	β-карот. ÷ ксантофиллы			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8 ч	–	–	–	–	+6,4	+12,2	+4,7	–	–	-4,5	+23,3
10 ч	-4,7	–	-4,0	–	+3,2	–	+4,1	–	–	-6,8	-1,4
14 ч	+21,7	+14,2	+19,4	+9,1	+32,9	+51,4	+27,4	+33,3		-9,1	+167,0
16 ч	+15,5	–	+11,5	+13,6	+33,2	+32,8	+33,3	–		-15,9	+126,3

Примечание. Прочерк (–) означает отсутствие статистически значимых по t-критерию Стьюдента различий с контролем при $p < 0,05$;

* – совокупный эффект установлен путем сложения данных столбцов 2, 3, 4, 6, 7 и 8, с учетом их знака.

Наиболее выраженное позитивное влияние исследуемого фактора на содержание в микрозелени гороха β -каротина установлено при 14- и 16-часовой экспозициях, что подтверждалось увеличением его содержания соответственно на 51 и 33 % по сравнению с контролем. При этом 8-часовое освещение обуславливало активизацию накопления данного порфирина лишь на 12 % при отсутствии достоверного влияния на темпы его биосинтеза 10-часового освещения.

Что касается ксантофиллов, то 14- и 16-часовая продолжительность освещения способствовала усилению их накопления на 27–33 % по сравнению с контролем при весьма незначительном, причем идентичном, увеличении их содержания не более чем на 4–5 % при 8- и 10-часовом освещении. Но несмотря на различия ответной реакции компонентов каротиноидного комплекса микрозелени гороха на продолжительность светодиодного освещения, их соотношение характеризовалось выраженной стабильностью в рамках эксперимента, и лишь при 14-часовом освещении темпы биосинтеза β -каротина превышали таковые ксантофиллов на 33 % по сравнению с контролем.

Показанные выше особенности трансформации пигментного фонда микрозелени гороха под действием исследуемого фактора, в свою очередь, обусловили усиление в нем роли желтых пластидных пигментов, нарастающее с увеличением продолжительности освещения, что подтверждалось отставанием от контроля на 5–16 % соотношения количеств хлорофиллов и каротиноидов (см. табл. 2). На наш взгляд, это могло быть связано с особой защитной функцией последних, предохраняющих светочувствительные хлорофиллы от фотодинамических повреждений.

Таким образом, выявленные межвариантные различия в составе пигментного комплекса пластид микрозелени гороха свидетельствовали о существенном влиянии на него исследуемого фактора. С целью выявления продолжительности светодиодного освещения, обеспечивающей максимальную и минимальную степень изменения темпов биосинтеза фотосинтезирующих пигментов относительно контроля, для каждого варианта опыта были определены суммарные значения относительных размеров положительных и отрицательных различий с последним по общему количеству хлорофиллов и каротиноидов, а также содержанию основных форм данных пигментов. Возвращаясь к табл. 2, нетрудно убедиться в том, что наиболее высокие значения совокупности обозначенных признаков, на 126 и 167 % превышавшие контрольный уровень, были установлены при 16- и особенно 14-часовой экспозициях, свидетельствующие о наибольшей насыщенности фотосинтезирующими пигментами ассимиляционного аппарата микрозелени гороха в этих вариантах опыта. В соответствии со снижением данного показателя, указывающим на обеднение ее пигментного фонда пластид, а следовательно, и ослабление фотосинтетической функции, было проведено распределение вариантов опыта следующим образом:

$$14 \text{ ч} > 16 \text{ ч} > 8 \text{ ч} > 12 \text{ ч} > 10 \text{ ч}.$$

Таким образом, наиболее насыщенным фондом фотосинтезирующих пигментов в рамках эксперимента характеризовались образцы микрозелени гороха овощного при 16- и особенно при 14-часовой продолжительности светодиодного освещения, тогда как наиболее обедненным – при 8- и особенно при 10-часовой продолжительности.

Заключение

В результате исследования влияния продолжительности светодиодного освещения (8, 10, 12, 14, 16 ч) на содержание фотосинтезирующих пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, β -каротина и ксантофиллов) в образцах микрозелени гороха овощного (сорт Павлуша) наиболее выраженная активизация накопления и зеленых, желтых пластидных пигментов установлена при 14- и 16-часовом освещении, способствовавшем увеличению содержания β -каротина, тогда как 8-часовое освещение обуславливало лишь незначительную активизацию его накопления при отсутствии достоверного влияния на темпы его биосинтеза 10-часового освещения. При этом 14- и 16-часовые экспозиции обуславливали наиболее значительное в эксперименте обогащение микрозелени гороха ксантофиллами по сравнению с контролем. Показано, что наиболее насыщенным фондом фотосинтезирующих пигментов в рамках эксперимента характеризовались образцы микрозелени гороха овощного при 16- и особенно при 14-часовой продолжительности светодиодного освещения, тогда как наиболее обедненным – при 8- и особенно при 10-часовой продолжительности.

Библиографические ссылки

1. Meng Q, Kelly N, Runkle ES. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. *Environmental and Experimental Botany*. 2019;162:383–391.
2. Анисимов АА. Влияние узкополосного красно-синего освещения на пигментный комплекс некоторых декоративных растений. В: Перспективы развития АПК в работах молодых ученых. Материалы региональной научно-практической конференции молодых ученых. Тюмень, 5 февраля 2014 г. Тюмень: [б. и.]; 2014. с. 8–12.
3. Оптимизация светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2016;50(3):17–23.

4. Zhang X, Bian Z, Yuan X, Chen X. A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;99:1–15.
5. Andrei Z, Vasilache V, Pintilie O, et al. Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in Acyanic and Cyanic *Ocimum basilicum* L. microgreens. *Stoleru T. Molecules*. 2017;22(2111):1–14.
6. Brazaitytė A, Vaštakaitė-Kairienė V, Viršilė A. Changes in mineral element content of microgreens cultivated under different lighting conditions in a greenhouse. *Acta Horticulturae*. 2018;1227:507–516.
7. Brazaitytė A. Comparison of LED and HPS illumination effects on cultivation of red pak choi microgreens under indoors and greenhouse conditions. *Istanbul, Turkey: 30th International Horticultural Congress*. 2020;1287:395–402.
8. Kong Y, Zheng Y. Growth and morphology responses to narrow-band blue light and its co action with low-level UVB or green light: A comparison with red light in four microgreen species. *Environmental and Experimental Botany*. 2020;178(104189):1–11.
9. Craver J, Gerovac J, Lopez R, et al. Light Intensity and Light quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Phytochemical Concentrations within Brassica Microgreens. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2017;142(1):3–12.
10. Годнев ТН. Хлорофилл: его строение и образование в растении. Минск: Издательство Академии наук БССР; 1963. 318 с.
11. Кахнович ЛВ. Фотосинтез. Методические рекомендации к лабораторным занятиям, задания для самостоятельной работы и контроля знаний студентов. Минск: Издательство Белорусского государственного университета; 2003. 88 с.

References

1. Meng Q, Kelly N, Runkle ES. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. *Environmental and Experimental Botany*. 2019;162:383–391.
2. Anisimov AA. Vliyaniye uzkopolosnogo krasno-sinego osveshcheniya na pigmentnyy kompleks nekotorykh dekorativnykh rasteniy [Influence of narrow-band red-blue lighting on the pigment complex of some ornamental plants]. In: *Perspektivy razvitiya APK v rabotakh molodykh uchenykh. Materialy regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchonykh. Tyumen', 5 fevralya 2014 g.* Tyumen: [publisher unknown]; 2014. p. 8–12. Russian.
3. Optimizatsiya svetodiodnoy sistemy osveshcheniya vitaminnoy kosmicheskoy oranzherei [Optimization of the LED lighting system of the vitamin space greenhouse]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2016;50(3):17–23. Russian.
4. Zhang X, Bian Z, Yuan X, Chen X. A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;99:1–15.
5. Andrei Z, Vasilache V, Pintilie O, et al. Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in Acyanic and Cyanic *Ocimum basilicum* L. microgreens. *Stoleru T. Molecules*. 2017;22(2111):1–14.
6. Brazaitytė A, Vaštakaitė-Kairienė V, Viršilė A. Changes in mineral element content of microgreens cultivated under different lighting conditions in a greenhouse. *Acta Horticulturae*. 2018;1227:507–516.
7. Brazaitytė A. Comparison of LED and HPS illumination effects on cultivation of red pak choi microgreens under indoors and greenhouse conditions. *Istanbul, Turkey: 30th International Horticultural Congress*. 2020;1287:395–402.
8. Kong Y, Zheng Y. Growth and morphology responses to narrow-band blue light and its co action with low-level UVB or green light: A comparison with red light in four microgreen species. *Environmental and Experimental Botany*. 2020;178(104189):1–11.
9. Craver J, Gerovac J, Lopez R, et al. Light Intensity and Light quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Phytochemical Concentrations within Brassica Microgreens. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2017;142(1):3–12.
10. Годнев ТН. *Khlorofill: yego stroyeniye i obrazovaniye v rastenii* [Chlorophyll: its structure and formation in a plant]. Minsk: Izdatelstvo Akademii nauk BSSR; 1963. 318 p. Russian.
11. Kakhnovich LV. *Fotosintez. Metodicheskiye rekomendatsii k laboratornym zanyatiyam, zadaniya dlya samostoyatel'noy raboty i kontrolya znaniy studentov* [Photosynthesis. Guidelines for laboratory studies, assignments for independent work and control of students' knowledge]. Minsk: Izdatelstvo BGU; 2003. 88 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 23.03.2022.
Received by editorial board 23.03.2022.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОДЕСТРУКТОРА «ДЕВОРОЙЛ» ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОЧВ БРЕСТСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ОТ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

О. Г. ГОРОВЫХ¹⁾, С. В. БУДЬКО²⁾, К. Ф. СAEВИЧ³⁾

¹⁾Минский городской технопарк,
ул. Солтыса 187, 220070, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусская железная дорога,
ул. Ленина, 17, 220030, г. Минск, Беларусь

³⁾Белорусский государственный экономический университет,
Партизанский пр., 26, 220070, г. Минск, Беларусь

Актуализируется экологическая проблема загрязнения нефтепродуктами земель территорий организаций Белорусской железной дороги. Рассмотрены основания выбора препарата «Деворойл» для проведения очистки загрязненных участков от выветренных и битуминизованных нефтепродуктов. Приведены результаты исследований содержания нефтепродуктов на территории структурных подразделений Брестского отделения Белорусской железной дороги, загрязнения которыми достигали величины $84900 \text{ мг}_{\text{нефтепрод.}}/\text{г}_{\text{почвы}}$. Отмечено, что наиболее загрязненными являются грунты между шпалами отдельных путей. Исследования биоремедиации проводили как на специальной площадке (*ex situ*), так и непосредственно на месте загрязнения (*in situ*). Загрязненные нефтепродуктами почвы обеззараживали с использованием биодеструктора «Деворойл» в весенне-осенний период на протяжении шести лет. Установлено, что за один весенне-осенний период снижение содержания нефтепродуктов в замасоченных почвах может достигать 90 %. Однако достижение норм ПДК, даже при повышении содержания препарата «Деворойл» и двукратной обработки в течение одного сезона, достичь не удалось.

Ключевые слова: нефтяные загрязнения; почва; биодеструкторы.

Образец цитирования:

Горовых О.Г., Будько С.В., Саевич К.Ф. Опыт использования биодеструктора «Деворойл» для очистки почв Брестского отделения железной дороги от нефтяных загрязнений. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;2:81–87.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-81-87>

For citation:

Gorovykh OG, Budko SV, Saevich KF. Experience of using the biodestructor *Devoroil* for cleaning soils of railway sections from oil contaminations. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;2:81–87. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-81-87>

Авторы:

Ольга Геннадьевна Горовых – кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории.

Светлана Викторовна Будько – заместитель начальника отдела охраны труда службы охраны труда и промышленной безопасности.

Константин Федорович Саевич – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры физикохимии материалов и производственных технологий.

Authors:

Olga G. Gorovykh, PhD (engineering), docent; head of the laboratory.

Sviatlana V. Budko, deputy head of the labor protection department of the labor protection and industrial safety service.
sviatlana.budzko@gmail.com

Konstantin F. Saevich, doctor of science (biology), full professor; professor at the department of physical chemistry of materials and production technologies.
saevich@tut.by

EXPERIENCE OF USING THE BIODESTRUCTOR *DEVOROIL* FOR CLEANING SOILS OF RAILWAY SECTIONS FROM OIL CONTAMINATIONS

O. G. GOROVYKH^a, S. V. BUDKO^b, K. F. SAEVICH^c

^a*Minsk City Technopark,
187 Soltysa Street, Minsk 220070, Belarus*

^b*Belarusian Railway,
17 Lenina Street, Minsk 220030, Belarus*

^c*Belarusian State Economic University,
26 Parcizanski Avenue, Minsk 220070, Belarus*

Corresponding author: O. G. Gorovykh (olgreda@tut.by)

The actual environmental problem of pollution of the territories of the Belarusian Railway organizations by oil products is considered. The grounds for choosing the drug «Devoroil» for cleaning contaminated areas from weathered and bituminized oil products are considered. The results of studies of the content of oil products in the territory of the structural subdivisions of the Brest branch of the Belarusian Railway are given, pollution reached a value of 84900 mg oil products/soil. It is noted that the most polluted are the soils between the sleepers of individual tracks. Bioremediation studies were carried out both on a special site (*ex situ*) and directly at the site of contamination (*in situ*). Soils contaminated with oil products were disinfected using the Devoroil biodestructor in the spring-autumn period for six years. It has been established that in one spring-autumn period, the decrease in the content of oil products in oil-contaminated soils can reach 90 %. However, the achievement of MPC standards, even with an increase in the content of the Devoroil preparation and a double treatment during one season, was not achieved.

Keywords: oil pollution; soil; biodegradants.

Введение

При хозяйственной деятельности структурных подразделений железной дороги такие объекты, как площадки локомотивных депо, вагонных депо, промывочно-пропарочных станций, полотна железной дороги и прилегающие к ним, а также ряд других территорий подвергаются постоянному загрязнению земляного (почвенного) горизонта нефтепродуктами. Основными загрязнителями являются дизельное и котельные топлива, горюче-смазочные материалы и растворители. Причем поступление данных загрязнителей происходит на одних и тех же участках десятилетиями. Снятие грунта и вывоз его на специальные предприятия по переработке во многих случаях затруднителен из-за специфики эксплуатации участков железной дороги, а также ощутимых финансовых затрат. Почва обладает мощной самоочищающей способностью. Вместе с тем ее способность к самоочищению имеет свои границы. Период самовосстановления растительного покрова после загрязнения его нефтью и нефтепродуктами длителен и составляет от 7,5 лет до 20 лет [1; 2].

Биоразложение нефтепродуктов относится к естественным процессам разложения углеводов до углекислого газа и воды, протекающее благодаря широко распространенным в природе микроорганизмам, использующим углеводороды в качестве питательного субстрата. Именно им принадлежит роль самоочищения природных объектов (почвы, воды) от нефтепродуктов. Интенсивность процессов зависит от различных факторов, обуславливающих активность микроорганизмов – нефтедеструкторов в составе микробиоценоза загрязненного объекта («микробов-аборигенов»). В первую очередь самоочищение зависит от активной деятельности всей совокупности живых её обитателей: различных видов бактерий, актиномицетов, грибов, водорослей, простейших, червей, личинок насекомых [3]. Описано 22 рода бактерий, 31 род микроскопических грибов, 19 родов дрожжей, выделенных из почвенных экосистем, способных к биодegradации нефтяных углеводов [4; 5]. В последнее время большое внимание уделяется разработке способов биологической рекультивации нефтезагрязненных почв. В [6] отмечается, что что только в Российской Федерации за 1983–2008 гг. количество патентов в данной области составило 97, а в Японии 98 изобретений. В основе способов биологической очистки нефтезагрязненных почв лежит активация процессов микробиологической деструкции нефти в почве с использованием биопрепаратов [7; 8].

Монобактериальные препараты характеризуются более узкой специфичностью по отношению к индивидуальным углеводородам, более узким интервалом pH, оптимальным для активности микроорганизмов, а также интервалом солености, температуры, концентрации углеводов. Полибактериальные препараты имеют более широкие адаптационные и экологические возможности для использования. Биопрепараты представляют собой массу жизнеспособных клеток микроорганизмов – биодеструкторов и различаются используемыми для их получения штаммами, которые характеризуются такими физиолого-биохимическими

свойствами, как термотолерантность, осмофильность, оптимальные для роста значения pH, способность включать в метаболические процессы разные классы углеводов и спектры алканов. Обозначилась тенденция разработки собственных биопрепаратов в каждой стране, так как подбор микроорганизмов – деструкторов углеводов, не вызывал особых проблем и сложностей. Поэтому в 1970-х гг. начали разрабатывать и к сегодняшнему времени разработали достаточное количество различных биопрепаратов. В том числе и в Беларуси разработали, начиная с 90-х годов, биодеструктор нефти «Экобел»¹ и препараты «Родобел», «Родобел-Т»² и «Родобел-ТН»³, производители которого гарантирует очистку почвы с уровнем загрязнения до 10 кг/м², деградацию алифатических компонентов нефти за 5 месяцев – 100 %, ароматических – 85 % (при плюсовой температуре).

Замазученные нефтепродуктами (дизельное топливо, отработанные масло, горюче-смазочные материалы и растворители) грунты на территориях, принадлежащих Белорусской железной дороге, имеют третий класс опасности и не могут размещаться на полигонах бытовых отходов. Следует подчеркнуть, что специализированные полигоны находятся на достаточно большом расстоянии от площадок отделений железной дороги и требуют дополнительных транспортных, физических и финансовых затрат. При выборе биодеструкторов нефти и нефтепродуктов рассматривались биопрепараты производства Республики Беларусь и препарат российского производства «Деворойл». В табл. 1 представлены характеристики рассматриваемых препаратов по таким показателям, как интервал рабочих температур, максимальная исходная концентрация загрязнителя в почве, количество биопрепарата, необходимое для переработки 1 т нефти и глубина биодеструкции.

Таблица 1

Сравнительная характеристика препаратов биодеструкторов

Table 1

Comparative characteristics of biodestructor preparations

Марка биопрепарата	Рекомендуемая концентрация нефти в почве, % (Г _{нефти} /кг _{грунта})	Температурный интервал, °С	Время биодеструкции	Соотношение нефть : биопрепарат
Родобел-Т	0,5 (5)	10–40	За 2 месяца в весенне-осенний период очистка почвы на 97–99 % [11]	3:1 торф 40:1 объем. Биопрепарат 25 кг на 1 т нефти
Экобел	До 10 кг/м ²	15–32	Три месяца разложение	40:1 масс.
Деворойл [12]	25 (250)	5–45 °С	20–60 сут.	1 кг на 1000 кг нефти

Цель исследования – изучение эффективности применения биологического препарата «Деворойл» для очищения от нефтяных загрязнений почв и грунтов на площадках структурных подразделений РУП «Брестское отделение Белорусской железной дороги».

Материалы и методы исследования

На основе анализа данных, представленных в табл. 1, было принято решение проводить обработку почвы препаратом «Деворойл», поскольку, в соответствии с техническими характеристиками, он может использоваться в более широком интервале температур, его можно наносить на замазученные грунты с содержанием нефтепродуктов до 25 % и при применении требуется небольшое количество. Для разложения 1 т нефти необходимо в 40 раз меньшее количество препарата, чем при использовании, например, препаратов «Экобел» и «Родобел».

Препарат «Экобел» содержит штаммы микроорганизмов-деструкторов рода *Rhodococcus*, «Родобел-ТН» представляет собой биомассу микроорганизмов-деструкторов углеводов нефти рода *Bacillus* и *Rhodococcus*, иммобилизованных на торфе, а препарат «Деворойл» кроме медленно растущих и быстросрастущих 3 штаммов *Rhodococcus spp.*, содержит также штаммы *Alcaligenes sp.*, *Jarrowia lipolytica* и некоторые др. Поэтому для очистки загрязненных нефтепродуктами территорий использовался микробиологический метод, апробируя биопрепарат «Деворойл».

¹Экобел. Микробный препарат для ликвидации последствий аварийных разливов нефти на почве и воде [Электронный ресурс]. URL: <http://mbio.bas-net.by/prod/ecobel/> (дата обращения: 1.02.2022).

²ТУ РБ 03535144.010-96. Биодеструктор нефтепродуктов «Родобел-Т» [Электронный ресурс]. URL: <http://belneftesorb.by/destruktor-nefti/> (дата обращения: 1.02.2022).

³Родобел-ТН. Биосорбционный препарат и его микробная составляющая для очистки и рекультивации почвы от нефти и продуктов ее переработки [Электронный ресурс]. URL: <http://mbio.bas-net.by/prod/rhodobel-tn> (дата обращения: 1.02.2022).

Препарат «Деворойл» – это мелкозернистый порошок, содержащий сообщество пяти углеводород-окисляющих бактерий и дрожжей, в состав которых включены такие лиофильные гидрофобные микроорганизмы, как бактерии, окисляющие нефтяные алканы с длиной цепи C_9 – C_{30} и ароматические соединения, а также дрожжи, имеющие высокую нефтеокисляющую активность. Препарат «Деворойл»⁴ рекомендуется использовать при кислотности среды, находящейся в интервале $pH = 5,5$ – $9,5$, рабочих температурах 15 – 37 °С, солёности не более 150 г/дм³. Разработчики гарантируют, что после его применения должны оставаться легко разлагающийся бактериальный белок и экологически безопасные продукты разложения углеводородов нефти. В соответствии с данными производителя препарата «Деворойл», процесс разложения нефтепродуктов составляет от 20 до 60 сут. Он зависит от характера нефтепродуктов, концентрации, механического состава грунта, погодных условий.

Результаты исследования и их обсуждение

Апробация препарата «Деворойл», проводилась в течение четырех лет (с 2005 по 2008 г.) на территории локомотивного депо РУП «Брестское отделение Белорусской железной дороги», а его использование продолжалось вплоть до 2012 г. Биопрепарат «Деворойл» применяли как на специально оборудованной для проведения испытаний площадке (*ex situ*), так и непосредственно на территории депо без подрезки грунта (*in situ*). Необходимо было установить возможность проведения очистки почв (*ex situ*) для использования или не использования данного метода в реальных условиях при многолетних изменениях с поступившими в почву нефтепродуктами (выветривание и битуминизация).

Результаты исследований показали, что нефтезагрязненные грунты, подлежащие утилизации, состояли из твердых частиц, различающихся по составу и размерам. Грунты имели высокую зольность. Групповой состав нефтяных загрязнений, %:

- алифатические углеводороды – 10–25,
- ароматические углеводороды – 15–40,
- смолы и асфальтены – 40–60.

Грунт также содержал соединения тяжелых металлов в количествах (мг/кг): марганец 0,04–0,05; железо 0,08–0,8; хром 0,01–0,05; цинк 0,02–0,04. Наличие тяжелых металлов также явилось основанием для использования препарата «Деворойл», поскольку в рекламных материалах обозначалась возможность его использования при их наличии⁵.

Перед началом апробации препарата «Деворойл» определялась степень загрязнения территории отделений ж/д г. Брест. Для этого было отобрано 14 проб с различных участков отделения железной дороги, кроме того, пробы отбирались с различного почвенного горизонта 0, 20 и 60 см. Схема отбора проб и содержание нефтепродуктов в них представлены на рис. 1 и табл. 2.

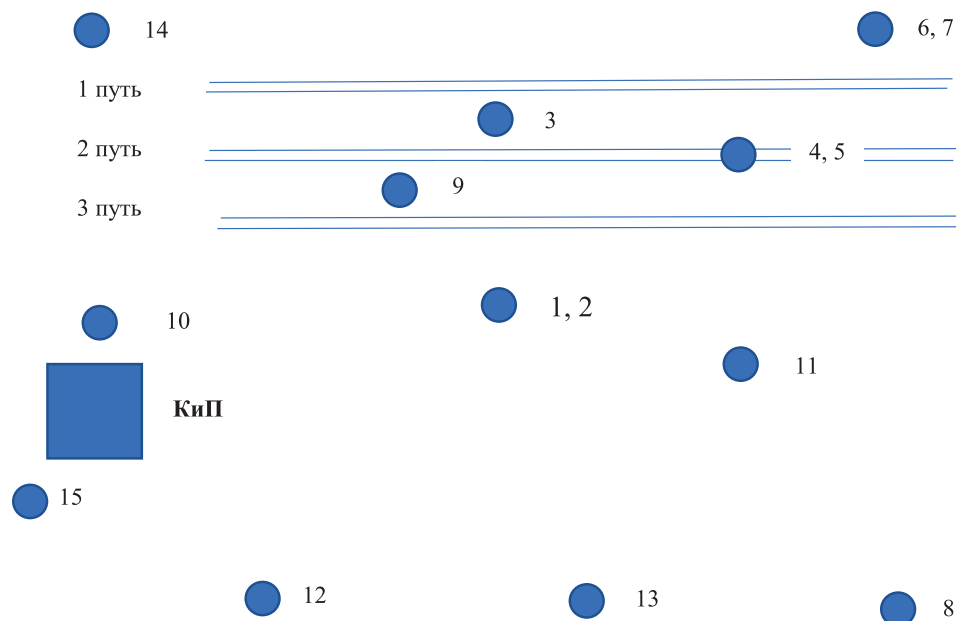


Рис. 1. Схема отбора проб с территории отделений ж/д г. Брест

Fig. 1. Scheme of sampling from the territory of railway departments in Brest

⁴ТУ 9291-033-45181233-2011. Биологический препарат «Деворойл» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sitistroi.ru/devoroil> (дата обращения: 1.02.2022).

⁵Там же.

Исходное содержание нефтепродуктов в точках отбора

Table 2

Initial content of oil products at sampling points

№ пробы отбора на рис. 1	Глубина отбора проб, см	Содержание нефтепродуктов, мг/г	№ пробы отбора на рис. 1	Глубина отбора проб, см	Содержание нефтепродуктов, мг/г
1	20	743	8	20	80
2	60	47	9	0	330
3	20	587	10	20	388
4	20	5288	11	20	642
5	60	49	12	20	581
6	20	859	13	20	1696
7	60	105	14	20	84900
15 контрольная проба				20	49

Данные табл. 2 свидетельствуют, что максимальное содержание нефтепродуктов доходило до 84500 г/кг_{почвы}. Оно является очень большой величиной даже для препарата «Деворойл». Нефтепродукты в местах высокого содержания в почве представляли собой агломерированные частицы сильно выветрившихся нефтепродуктов, которые в иных местах удаляют механически, без использования биодеструкторов. Для проведения производственного опыта были выбраны участки с различным уровнем загрязнения нефтяными углеводородами. Наибольшее загрязнение было выявлено на глубине 20 см на участке отстоя тепловозов пункта технического обслуживания тепловозов, складе топлива, возле топливо раздаточных колонок, местах, где в течение 24 ч происходит работа с нефтепродуктами.

Уровень загрязнения резко снижался с увеличением глубины отбора пробы. Например, пробы, отобранные с почвенного горизонта 20 и 60 см в одном и том же месте, по уровню загрязнения отличались от 8 (точки отбора 6 и 7) до 15 раз (точки отбора 1 и 2).

Анализ почв на содержание углеводородов нефти проводился Научно-исследовательским центром экологической безопасности на транспорте БелГУТа на анализаторе жидкости «Флюорат» по методике измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв⁶.

С участков, содержащих высокую концентрацию нефтепродуктов, была проведена подрезка грунта на глубину 60 см и размещена на экспериментальной площадке. Общее количество снятого грунта составило 6 т. Площадка для проведения эксперимента и очистки замазученного грунта представляла собой забетонированную площадку размером 10×20 м, с обвалованием высотой 0,7 м и имела в основании водоупорный слой для предотвращения миграции фильтрата. Усредненная концентрация нефтепродуктов в грунте, размещенном на площадке, составляла 6878 мг/кг. Площадку разбили на 2 карты. Первоначально на каждую карту нанесли и равномерно распределили по всей поверхности опилки (в качестве структуратора-мелиоранта) слоем 15–20 см, затем поместили замазученный грунт слоем 30 см, перемешали вместе со структуратором-мелиорантом и обработали препаратом «Деворойл». После нанесения препарата еще раз тщательно перемешали и увлажнили. Для активации окислительной способности микроорганизмов, содержащихся в препарате «Деворойл», было внесено минеральное удобрение – диаммофос. В течение 14 дней биопрепарат вносили на каждую карту еще по два раза, при этом период между внесением биопрепарата на картах был различным. Орошение проводили 1%-ным раствором биопрепарата «Деворойл», используя по 3 дм³ раствора на 1 м² площади. Эффективность работы препарата «Деворойл» оценивали по степени деструкции нефтяных углеводородов.

Через 30 дней на испытательной площадке был проведен отбор 8 проб с разных уровней, затем определено в них содержание нефтепродуктов. Результаты измерений приведены в табл. 3.

⁶Методика измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «флюорат-02» (м 03-03-2012): утвержд. директором ФБУ «Центр экологического контроля и анализа» 10.08.2003 г. Москва: Люмэкс; 2007. 26 с.

Таблица 3

Остаточное количество нефтепродуктов в отобранных пробах на испытательной площадке

Table 3

Residual amount of oil products in samples taken at the test site

№ пробы	Глубина отбора проб, см	Содержание нефтепродуктов, мг/г	№ пробы	Глубина отбора проб, см	Содержание нефтепродуктов, мг/г
1	0	166	5	0	267
2	30	133	6	0	300
3	0	265	7	0	202
4	30	120	8	30	178

Среднее содержание нефтепродуктов на испытательной площадке составило 204 мг/кг, среднее снижение углеводов достигло 33 раз, причем на нулевом уровне снижение произошло в 28 раз, а на глубине 30 см в 47 раз, свидетельствующее о том, что на данном уровне температурный режим был более постоянный и менее зависел от суточных перепадов температур. Содержание кислорода и влажность, поддерживаемые постоянным перемешиванием и увлажнением, не являлись определяющими факторами на разных уровнях.

Площадки с неподрезанным загрязненным углеводородами грунтом также подвергли обработке раствором препарата «Деворойл», внесли опилки и осуществили перемешивание. Проводимые операции, их последовательность и интенсивность были аналогичны тем, которые выполнялись на специальной площадке.

На участке с неподрезанным грунтом с начальным содержанием нефтепродуктов 84900 мг/кг по истечении 20 суток содержание нефтепродуктов снизилось до 2359 мг/кг (снижение в 35 раз или на 97 %), а по истечении следующих 15–20 сут. (различное время для различных участков) оно составляло в среднем 1001 мг/кг (снижение в 2,3 раза или на 57,6 %). Таким образом, скорость деструкции нефтепродуктов за последующие 20 сут. существенно снизилась. Так как в этот период времени также проводилось орошение грунта препаратом «Деворойл», можно предположить, что скорость деструкции снизилась из-за того, что формы углеводов, оставшихся в почве, труднодоступны для разложения данным сообществом микроорганизмов.

В вегетационный период последующих годов работы по применению биодеструктора «Деворойл» были продолжены. В табл. 4 приведены объемы обработанного грунта и количество препарата «Деворойл», использованного на его обработку.

Таблица 4

Объемы обработанного грунта

Table 4

Volumes of treated soil

Год	Количество биопрепарата, кг	Масса подрезанного грунта, т	Площадь не подрезанного грунта, м ²
2006	135	60	–
2006	75	–	1120
2007 (март – август)	80	40	1200
2008	60	–	1150

В 2010 г. за вегетационный период снижение содержания углеводов на промплощадке составило 99,6 % (с 44060 до 187 мг/кг), а в 2011 г. на 96 % (с 154895 до 6196 мг/кг).

Данные факты могут быть объяснены высокой степенью выветривания и битуминизации накопившихся за десятилетия нефтепродуктов, когда некоторые формы становятся недоступны для микроорганизмов. Снижение содержания нефтепродуктов непосредственно на месте загрязнения было меньшим, чем на специальной площадке. Среднее содержание нефтепродуктов на испытательной площадке после проведения биоремедиации составило 204 мг/кг, снижение углеводов достигло 33 раз, причем на нулевом уровне

снижение произошло в 28, а на глубине 30 см в 47 раз. Это свидетельствует о том, что на данном уровне температурный режим был более постоянным и менее зависел от суточных перепадов температур, а содержание кислорода и влажность, поддерживаемые постоянным перемешиванием и увлажнением, не являлись определяющими факторами на разных уровнях. Обеззараженные грунты предлагается использовать для подсыпки полотна железной дороги.

Заключение

В результате проведенных исследований авторы пришли к следующим выводам.

1. При многолетнем загрязнении грунтов территории Брестского депо и проникновении нефтепродуктов на глубину 60 см и более, самым загрязненным оказался слой на глубине 20 см.
2. Максимальная выявленная концентрация нефтепродуктов достигала величины 154895 мг/кг, что превышает ПДК углеводородов нефти в почве в 3098 раз.
3. Снижение содержания нефтепродуктов в почве при использовании препарата «Деворойл» за первые двадцать суток составило 97 %, за общий период 40 сут. – 98,8 %.
4. После 8 лет применения препарата на территории Брестского отделения железной дороги почвы все также не соответствовали требованиям норм по содержанию нефтепродуктов и относились к загрязненным.
5. Степень загрязнения обрабатываемых почв значительно уменьшилась и загрязненные грунты стали соответствовать IV классу, что позволило их использовать для подсыпки дорог и иных видов хозяйственной деятельности участков железной дороги.

Библиографические ссылки

1. Бузмаков СА. Восстановление земель при различных уровнях загрязнения нефтью. *Записки Горного института*. 2013;203:128–132.
2. Коршунов ТЮ, Четвериков СП, Бакаев МД, Кузин ЕВ, Рафиков ГФ, Четверикова ДВ, Логинов ОН. Микроорганизмы в ликвидации последствий нефтяного загрязнения (обзор). *Прикладная биохимия и микробиология*. 2019;55(4):338–349.
3. Золотарева АА. Микробно-биотехногенный метод очистки почв от нефти и нефтепродуктов. *Национальная ассоциация ученых*. 2017;6(33):7–8.
4. Бузмаков СА. Восстановление земель при различных уровнях загрязнения нефтью. *Записки Горного института*. 2013;203:128–132.
5. Мельник ОА. Рекультивация загрязненных нефтепродуктами почв. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021;12(114):85–88.
6. Водянова МА, Хабарова ЕИ, Донерьян ЛГ. Анализ существующих микробиологических препаратов, используемых для биодegradации нефти в почве. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2010;7:253–258.
7. Султанова ГД, Абдуллаева МЯ. Очистка нефтезагрязненных земель в климатических условиях Азербайджана. *Бюллетень науки и практики*. 2021;7(7):31–38.
8. Ивасишин ПЛ. Ликвидация последствий нефтеразливов посредством биоразлагающих сорбентов. *Территория Нефтегаз*. 2009;6:70–77.

References

1. Buzmakov SA. *Vosstanovleniye zemel' pri razlichnykh urovnyakh zagryazneniya nef't'yu* [Restoration of lands at various levels of oil pollution]. *Zapiski Gornogo instituta*. 2013;203:128–132. Russian.
2. Korshunov TYu, Chetverikov SP, Bakaev MD, Kuzin EV, Rafikov GF, Chetverikova DV, Loginov ON. *Mikroorganizmy v likvidatsii posledstviy nef'tyanogo zagryazneniya (obzor)* [Microorganisms in the elimination of the consequences of oil pollution (review)]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2019;55(4):338–349. Russian.
3. Zolotareva AA. *Mikrobno-biotekhnogennyy metod ochistki pochv ot nef'ti i nef'teproduktov* [Microbio-biotechnogenic method of cleaning soils from oil and oil products]. *Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh*. 2017;6(33):7–8. Russian.
4. Buzmakov SA. *Vosstanovleniye zemel' pri razlichnykh urovnyakh zagryazneniya nef't'yu* [Restoration of lands at various levels of oil pollution]. *Zapiski Gornogo instituta*. 2013;203:128–132. Russian.
5. Melnik OA. *Rekul'tivatsiya zagryaznennykh nef'teproduktami pochv* [Reclamation of soils polluted with oil products]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2021;12(114):85–88. Russian.
6. Vodyanova MA, Khabarova EI, Doneryan LG. *Analiz sushchestvuyushchikh mikrobiologicheskikh preparatov, ispol'zuyemykh dlya biodegradatsii nef'ti v pochve* [Analysis of existing microbiological preparations used for oil biodegradation in soil]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. 2010;7:253–258. Russian.
7. Sultanova GD, Abdullaeva MYa. *Ochistka nef'tezagryaznennykh zemel' v klimaticheskikh usloviyakh Azerbaydzhana* [Cleaning of oil-contaminated lands in the climatic conditions of Azerbaijan]. *Byulleten' nauki i praktiki*. 2021;7(7):31–38. Russian.
8. Ivashishin PL. *Likvidatsiya posledstviy nef'terazlivov posredstvom biorazlagayushchikh sorbentov* [Elimination of the consequences of oil spills by means of biodegradable sorbents]. *Territoriya Neftegaz*. 2009;6:70–77. Russian.

Статья поступила в редакцию 19.04.2022.
Received by editorial board 19.04.2022.

УДК 504.062

УСТОЙЧИВОЕ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ, ВОДООТВЕДЕНИЯ, КАЧЕСТВА СТОЧНЫХ ВОД НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

П. Н. ЗАХАРКО¹⁾, С. А. ДУБЕНОК²⁾

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

²⁾Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

Предприятия молочной промышленности характеризуются частой сменой видов производимой продукции, что отражается на водопользовании и качественном составе сточных вод, формирующихся на территории предприятия. В силу специфики осуществления технологических процессов производства продукции зачастую объемы водоотведения превышают объемы водопотребления до 30 %, что является важным фактором, который необходимо учитывать при проектировании очистных сооружений сточных вод на предприятиях молочной промышленности (иногда проектировщиками объемы водоотведения приравниваются к объемам водопотребления).

Качественный состав сточных вод сильно варьирует в течение суток и напрямую зависит от видов производимой продукции. Одним из способов устойчивого водопользования на предприятиях является постоянное планирование водопотребления и водоотведения в увязке с объемами и видами выпускаемой продукции, качественным составом сточных вод. С научной точки зрения, прогнозирование водопользования, качественного состава сточных вод возможно путем установления пространственно-временных зависимостей между видами производимой продукции, объемами водопотребления и водоотведения, качественным составом сточных вод на предприятиях по производству молочных продуктов.

В некоторых пунктах Республики Беларусь предприятия по производству молочных продуктов являются градообразующими, развивают и наращивают производство, расширяют ассортимент выпускаемой продукции, что приводит к увеличению нагрузки на коммунальные очистные сооружения в населенном пункте. Как следствие, такие предприятия при расширении производственных мощностей стремятся организовать полный цикл очистки сточных вод с последующим их сбросом в водные объекты. Последние 5 лет наблюдается стабильная динамика увеличения антропогенной нагрузки на водные объекты предприятиями по производству молочных продуктов: ежегодно 1–2 предприятия организуют выпуски сточных вод после очистных сооружений в водный объект. С учетом наметившихся тенденций водопользования установление зависимостей между видами производимой продукции, объемами водопотребления и водоотведения, качественным составом сточных вод позволит предприятиям по производству молочных продуктов прогнозировать водопользование и качество сточных вод.

Ключевые слова: водопотребление; водоотведение; пространственно-временные зависимости; качество; сточные воды; молочная промышленность.

Образец цитирования:

Захарко ПН, Дубенок СА. Устойчивое водопользование на основе регулирования водопотребления, водоотведения, качества сточных вод на предприятиях по производству молочных продуктов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;2:88–101.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-88-101>

For citation:

Zakharko PN, Dubianok SA. Sustainable water use on the basis of regulation of water consumption, water disposal, wastewater quality at dairy production enterprises. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;2:88–101. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-2-88-101>

Авторы:

Полина Николаевна Захарко – начальник отдела нормирования воздействия на окружающую среду.

Снежана Анатольевна Дубенок – кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение».

Authors:

Palina N. Zakharko, head of the environmental impact rationing department.

polina.k.85@mail.ru

Sniazhana A. Dubianok, PhD (engineering), associate professor at the department of water supply and sanitation.
dsnega@list.ru

SUSTAINABLE WATER USE ON THE BASIS OF REGULATION OF WATER CONSUMPTION, WATER DISPOSAL, WASTEWATER QUALITY AT DAIRY PRODUCTION ENTERPRISES

P. N. ZAKHARKO^a, S. A. DUBIANOK^b

^aCentral Research Institute for Complex Use of Water Resources,
1 Slavinskaya Street, building 2, Minsk 220086, Belarus

^bBelarusian National Technical University,
65 Niezaliežnasci Avenue, 220013 Minsk, Belarus
Corresponding author: S. Dubianok (dsnega@list.ru)

Dairy industry enterprises are characterized by a frequent change in the types of products produced, which affects water use and the qualitative composition of wastewater generated on the territory of the enterprise. Due to the specifics of the implementation of technological processes for the production of products, the volumes of water disposal often exceed the volumes of water consumption by up to 30%, which is an important factor that must be taken into account when designing wastewater treatment plants at dairy industry enterprises (often designers equate the volumes of water disposal to the volumes of water consumption). The qualitative composition of wastewater varies greatly during the day and directly depends on the types of products produced. One of the ways of sustainable water use at enterprises is the constant planning of water consumption and wastewater disposal in conjunction with the volumes and types of products produced, the qualitative composition of wastewater. From a scientific point of view, forecasting water use, the qualitative composition of wastewater is possible by establishing spatio-temporal relationships between the types of products produced, volumes of water consumption and wastewater disposal, and the qualitative composition of wastewater at enterprises for the production of dairy products. In a number of localities of the Republic of Belarus, enterprises for the production of dairy products are city-forming, they develop and increase production, expand the range of products, which leads to an increase in the load on municipal treatment facilities in the locality. As a result, such enterprises, when expanding their production capacities, tend to organize a full cycle of wastewater treatment with their subsequent discharge into water bodies. For the last 5 years, there has been a stable dynamics of an increase in the anthropogenic load on water bodies by enterprises producing dairy products: annually 1–2 enterprises organize the release of wastewater after treatment facilities into a water body. Taking into account the emerging trends in water use, establishing relationships between the types of products produced, the volumes of water consumption and wastewater disposal, and the qualitative composition of wastewater will allow enterprises producing dairy products to predict water use and wastewater quality.

Keywords: water consumption, water disposal, spatio-temporal dependencies, quality, wastewater, dairy industry.

Введение

Промышленное производство, являющееся базовой составляющей развития любого государства, выступает одновременно и мощнейшим источником воздействия на окружающую среду в целом и на отдельные ее компоненты в частности. При этом, с точки зрения воздействия на отдельные компоненты природной среды, различные отрасли промышленного производства обуславливают различный уровень негативного влияния на состояние окружающей среды. Предприятия молочной промышленности в силу специфики используемого технологического оборудования и осуществляемых производственных процессов оказывают наибольшее воздействие на водные ресурсы, исчерпаемый компонент природной среды, по следующим направлениям: *истощение водных ресурсов* (превышение дебита скважин, вследствие интенсивного использования воды питьевого качества), *загрязнение водных ресурсов* (недостаточное развитие систем повторного водоснабжения, ухудшение работы очистных сооружений населенного пункта за счет сброса высококонцентрированных сточных вод, организация новых точечных источников воздействия на водные объекты в виде выпусков сточных вод).

Активное наращивание производственных мощностей молочной промышленностью, расширение видов и ассортимента молочных продуктов позволило ей занять лидирующие позиции по объемам производства молочных продуктов среди производства таких основных видов продуктов питания, как мясные и рыбные продукты, плодоовощные консервы, растительные масла, макаронные изделия, сахар, соль, шоколад.

В настоящее время в Республике Беларусь функционирует 79 предприятий по производству молочных продуктов. Проведенный анализ данных государственной статистической отчетности 1-вода (Минприроды) за 2020 г. указывает, что только у 8 предприятий организована система повторного водоснабжения за счет использования емкостей вторичной воды. Недостаточное развитие систем повторного водоснабжения приводит к преимущественному использованию в производственных процессах свежей воды питьевого

качества. В централизованную систему водоотведения (канализации) населенного пункта отводят сточные воды 68 предприятий по производству молочных продуктов. Сточные воды предприятий по производству молочных продуктов содержат высокие концентрации органических и минеральных веществ, которые, поступая в централизованную систему водоотведения (канализации) населенного пункта, оказывают негативное воздействие на очистные сооружения организаций водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ), жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). В ряде населенных пунктов сточные воды предприятий по производству молочных продуктов составляют до 50 % от общего объема сточных вод, поступающих на очистные сооружения населенного пункта.

При этом последние десять лет наблюдается активная организации предприятиями по производству молочных продуктов выпусков сточных вод непосредственно в водные объекты и отключение от централизованных систем водоотведения (канализации) населенных пунктов.

В сложившихся условиях комплексное изучение процессов водопользования на предприятиях молочной промышленности, включая детализацию статей водопользования с установлением зависимостей между объемами водопотребления и водоотведения, качественным составом сточных вод и выпуском продукции, является актуальной задачей и требует научного анализа.

Материалы и методы исследования

Общие методические подходы к выявлению зависимостей между объемами водопользования, качественным составом сточных вод и выпуском продукции. Располагая данными государственной статистической отчетности 1-вода (Минприроды) проведен сравнительный анализ водопользования подсекции СА «Производства продуктов питания, напитков и табачных изделий» и группы 105 «Производство молочных продуктов», который показал, что доля добычи воды предприятиями по производству молочных продуктов за 2018–2020 гг. превышала 50 % от общей добычи воды подсекцией СА, объем сброса сточных вод в водные объекты предприятиями по производству молочных продуктов в 2018–2020 гг. постоянно увеличивался и на 2020 г. составил 48,2 % от общего объема сброса сточных вод подсекцией СА в водные объекты¹ (табл. 1).

Таблица 1

Сводные данные водопользования подсекции СА и группы 105 за период 2016–2020 гг.

Table 1

Summary of water use data of subsection CA and group 105 for the period 2016–2020

Год	Добыча, тыс. м ³ /год			Изъятие, тыс. м ³ /год			Сброс сточных вод в водные объекты, тыс. м ³ /год		
	СА	105	%	СА	105	%	СА	105	%
2016	43500	20970	48,2	6300	427,45	6,8	4300	1355	31,5
2017	45600	22022	48,3	6700	385,07	5,7	6700	950	14,2
2018	44800	22614	50,5	5700	327,33	5,7	7900	1799	22,8
2018	45000	23719	52,7	4400	343,33	7,8	8100	2486	30,7
2020	47100	24279	51,5	3600	318,117	8,8	7900	3812	48,2

Примечание. 1. СА – подсекция СА «Производства продуктов питания, напитков и табачных изделий»; 2. группа 105 «Производство молочных продуктов»; 3. % – доля воды группы 105 к подсекции СА.

По результатам проведенного анализа установлено, что у 47 предприятий (59 %) в перечне ассортимента продукции присутствуют разные виды сыров (мягкий, твердый, полутвердый), с одновременной переработкой сыворотки (концентрирование с сушкой или без сушки), либо ее отгрузкой. Также предприятия по производству сыров зачастую специализируются на производстве иных видов молочной продукции: цельномолочная продукция, масло, казеин, молочные консервы, мороженное.

Таким образом, предприятия по производству сыров характеризуются наибольшим ассортиментом выпускаемой продукции и, как следствие, наибольшим количеством технологических процессов и операций, требующих большого количества производственного оборудования, активным внедрением современных

¹ Государственный водный кадастр [Электронный ресурс]. Информационные ресурсы на сайте РУП «ЦНИИКИВР». URL: <http://www.cricuwr.by/gvkinfo/> (дата обращения: 12.05.2022).

технологий по переработке побочных продуктов-сыворожки. Поэтому дальнейшее детальное изучение на данных предприятиях водопотребления и водоотведения в увязке с видами производимой продукции позволит в целом охарактеризовать водопользование в молочной промышленности.

На основании вышеизложенного, в качестве объекта исследования для выявления зависимостей между объемами водопотребления и водоотведения, качественным составом сточных вод и выпуском продукции выбраны предприятия по производству сыров и иных видов молочных продуктов.

Методология проведения исследований по изучению водопользования на предприятиях по производству молочных продуктов включает следующие этапы [1].

1. Определение статей расхода воды, источников образования сточных вод, дополнительных объемов, отводимых в канализацию.

2. Выявление зависимостей между видами производимой продукции и водопользованием.

3. Выполнение натурных экспериментальных исследований и анализ химического состава сточных вод, образующихся при различных технологических процессах, выявление зависимостей между видами производимой продукции и качественным составом сточных вод.

Метод определения статей расхода воды, источников образования сточных вод, дополнительных объемов, отводимых в канализацию при производстве молочных продуктов. Анализ технологических процессов производства молочной продукции, оборудования, задействованного в производстве и специфики его функционирования, позволил сформировать статьи расхода воды, образования сточных вод, а также выделить источники образования дополнительных объемов в сети канализации предприятия.

По результатам обобщения сформирована структура водопользования, включающая статьи водопотребления, водоотведения, безвозвратного водопотребления и потери воды, а также образования побочных продуктов.

Метод выявления зависимостей между видами перерабатываемого сырья, производимой продукцией и водопользованием. Одним из путей увязки всех технологических процессов с объемами потребления воды, образования сточных вод и видами выпускаемой продукции является разработка индивидуальных технологических нормативов водопотребления и водоотведения (далее – технормативы). Основной целью технормативов является разработка экономических и технически обоснованных удельных норм расхода воды (с учётом ее качества) в производственном процессе.

Обобщение и сравнительный анализ исходных данных позволили выделить диапазоны водопотребления и водоотведения по отдельным статьям водопользования, диапазоны индивидуальных технологических нормативов водопользования при производстве различных видов продукции.

Метод выполнения натурных экспериментальных исследований и анализ химического состава сточных вод, образующихся при различных технологических процессах, выявление зависимостей между видами производимой продукции и качественным составом сточных вод. Проводились отборы проб и лабораторные испытания сточных вод, образующихся на различных этапах производственных процессов предприятий по производству молочных продуктов. Отбор проб осуществлялся автоматическим пробоотборником, лабораторные испытания проводились аккредитованными лабораториями ГУ «Республиканский центр аналитического контроля в области охраны окружающей среды». Анализ полученных результатов позволил выделить приоритетные загрязняющие вещества по отдельным технологическим процессам, установить диапазоны концентраций загрязняющих веществ в сточных водах в зависимости от видов производимой продукции. Исследования сточных вод проводились по следующим веществам (показателям): ХПК, аммоний-ион, азот общий, фосфор фосфатный, фосфор общий, рН, хлорид-ион, сульфат-ион, взвешенные вещества, СПАВ(анион.), сухой остаток.

Зависимости между объемами водопользования, качественным составом сточных вод и выпуском продукции. Целевое использование воды на предприятиях по производству молочных продуктов разделено на три направления:

- производственные нужды, зависящие от производственного процесса и объема выпуска продукции, $W_{пр}$;
- производственные нужды, не зависящие от производства продукции (используемого сырья), но обусловленные производственным процессом (вспомогательные нужды), W_0 ;
- хозяйственно-питьевые (бытовые) нужды.

Обобщенные сведения о статьях расхода воды, источниках образования сточных вод приведены в табл. 2 [2].

Анализ водопользования в соответствии с изложенной методологией проведен для 11 предприятий по производству сыров и иных видов молочных продуктов, что составляет 23 % от общего количества предприятий, занимающихся производством сыров, а суммарный объем добычи воды данными предприятиями составляет 21 % от общего объема добычи воды группы 105 «Производство молочных продуктов». При этом 5 из исследуемых предприятий имеют наибольший ассортимент производимых сыров;

2 предприятия помимо сыров осуществляют производство цельномолочной продукции и 5 предприятий, помимо сыров, осуществляют производство сухих молочных продуктов; 9 предприятий перерабатывают сыворотку с использованием разных технологий и глубины ее переработки; 2 предприятия имеют полный цикл очистки сточных вод с их выпуском в водный объект. Таким образом, полученные результаты по данным предприятиям могут быть соотнесены в целом на иные предприятия по производству сыров и иных видов производимой продукции.

Таблица 2

Состав и структура водопользования

Table 2

Composition and structure of water use

№	Наименование статьи	Побочный продукт / дополнительные объемы сброса в канализацию
<i>Производственные нужды ($W_{пр}$)</i>		
1	Обеспечение технологических параметров оборудования (использование воды в процессе работы оборудования), включая мембранные установки по переработке сырья	–
1.1	Прямоточное охлаждение оборудования, включая вакуум-выпарную установку	–
1.2	Фасовочный автомат, термоусадочная машина и др.	–
1.3	Сепаратор, сепаратор-бактофуга (самовыгружающиеся)	Осадок
1.4	Плунжерные гомогенизаторы	–
1.5	Мембранная установка для получения обессоленной воды (установка обратного осмоса, нанофильтрации)	Образуется ретентат с высоким содержанием солей
1.6	Стерилизация оборудования горячей водой	–
1.7	Мембранные установки по переработке сырья	Пермеат
2	Работа вакуум-выпарной установки (ВВУ): подпитка оборотной системы, образование вторичного пара	Вторичный пар
3	Санитарная обработка оборудования	–
4	Санитарная обработка производственных помещений	–
5	Приготовление моющих растворов	Щелочь/кислота
6	Наружная мойка автомолцистерн	–
7	Внутренняя мойка автомолцистерн	–
8	Санитарная обработка текстильных изделий	–
9	Приготовление рецептур	–
10	Расход воды на посол сыра в зерне	–
11	Приготовление рассола в соляных бассейнах	–
12	Выработка пара (котельная)	–
12.1	Восполнение потерь конденсата пара	–
12.2	Продувка котла	–
12.3	Потери с выпаром деаэратора	–
12.4	Собственные нужды водоподготовки	–
13	Расход воды на промывку казеина	–

Окончание табл. 2

Ending table 2

<i>Нужды, не зависящие от производства продукции (используемого сырья), но обусловленные производственным процессом (вспомогательные нужды) (W_0)</i>		
1	Нужды лаборатории	–
2	Водоподготовка питьевой воды	–
3	Профилактическая чистка и дезинфекция РЧВ, промывка водопроводной сети	–
4	Работа аммиачной компрессорной	–
5	Расход воды на подпитку тепловой сети	–
6	Нужды очистных сооружений	–
7	Расход воды на мойку твердых покрытий	–
8	Расход воды на нужды прачечной	–
9	Расход воды в столовой	–
<i>Хозяйственно-питьевые (бытовые) нужды ($W_{х-п}$)</i>		
1	Расход воды на питьевые нужды	–
2	Расход воды на принятие душа	–
3	Расход воды на полив зеленых насаждений	–
4	Влажная уборка непроизводственных помещений	–

Проведенный анализ действующих на 11 предприятиях индивидуальных технологических нормативов водопользования позволил сформировать диапазоны нормативов водопользования (табл. 3).

Таблица 3

Диапазоны нормативов водопользования

Table 3

Ranges of water use standards

№	Предприятие	Объем поступления сырья, т/год (т/сут)	Норматив водопотребления, м ³ на тсырья	Норматив водоотведения, м ³ на т сырья
1	Предприятие 1	45924 (126)	3,25	3,02
2	Предприятие 2	54493 (149)	3,56	4,15
3	Предприятие 3	35743 (98)	4,1	4,85
4	Предприятие 4	43473 (119)	2,91	2,99
5	Предприятие 5	195722 (молоко) (536)	2,0	1,90
		163514 (сыворотка) (448)	1,6	2,70
6	Предприятие 6	110836 (304)	4,58	4,87
7	Предприятие 7	255500 (700)	4,65	4,31
8	Предприятие 8	83027 (227)	4,66	4,70
9	Предприятие 9	50703 (139)	3,77	4,08
10	Предприятие 10	75891 (208)	4,84	5,26
11	Предприятие 11	96573 (265)	3,76	4,43

Примечание. Предприятие 1 и 7 не перерабатывают сыворотку, осуществляют только ее отгрузку.

На всех предприятиях, осуществляющих переработку сыворотки, индивидуальный технологический норматив водоотведения больше водопотребления в среднем на 23 % (от 7 до 69 %). Разница между индивидуальным технологическим нормативом водоотведения и водопотребления будет зависеть от величины содержания сухих веществ в концентрированной сыворотке: чем больше доля сухих веществ в концентрированной сыворотке, тем больше образуется дополнительного объема (пермеата), поступающего в сети канализации.

На предприятиях, не осуществляющих переработку сыворотки, норматив водоотведения меньше водопотребления за счет отсутствия сброса в сети канализации дополнительных объемов, образующихся при функционировании мембранных установок при переработке сыворотки. Разница между нормативом водопотребления и водоотведения будет зависеть от величины потерь воды на различных этапах технологических процессов.

Опыт разработки индивидуальных технологических нормативов водопользования показал, что на предприятиях по производству молочных продуктов сыров и ЦМП, характер водопользования может существенно меняться в зависимости от видов производимой продукции. Детализация водопользования проведена по предприятию 9, производящему широкий ассортимент продукции²:

- твердые сычужные сыры типа «Российский», «Голландский»;
- молоко, молоко обогатненное кальцием;
- масло;
- творог, биотворог;
- сметана, сметана обогатненная кальцием и витамином Д;
- продукт кефирный;
- концентрированная подсырная сыворотка;
- творожная сыворотка (отгружается без переработки);
- частично обработанное молоко (осуществляется его отгрузка на холдинг для последующей переработки).

Производственная мощность предприятия: выработка цельномолочной продукции – 5 т в сут., масла – 12 т в сут., сыра – 15 т в сут., сыворотки концентрированной – 32 т в сут.

Проведенный анализ условий водопользования с сопоставлением с производством продукции позволил выделить два основных режима работы предприятия:

- водопользование при условии работы цеха ЦМП и приемно-аппаратного участка сырцефа (осуществляется только частичная обработка молока с последующей отгрузкой на холдинг) (режим 1);
- водопользование при условии работы цеха ЦМП и сырцефа (режим 2).

По результатам исследования установлено, что при режиме 1 норматив водопотребления находится в диапазоне от 2,4 до 3,2 м³ на т перерабатываемого сырья, норматив водоотведения на 5,1 % меньше водопотребления и составляет от 2,27 до 3,04 м³ на т перерабатываемого сырья.

При режиме 2 водопользование зависит от количества произведенного сыра и переработанного побочного продукта (сыворотки):

- при варке сыров от 18 до 30 дней в месяц водоотведение на 103–108 % больше водопотребления;
- при варке сыров в течение 10–17 дней, водоотведение на 101–102 % больше водопотребления;
- при варке сыров до 10 дней водоотведение либо равно водопотреблению, либо на 3–5 % меньше водопотребления за счет производственных потерь.

Учитывая, что данное предприятие эксплуатирует очистные сооружения биологической очистки с выпуском очищенных сточных вод в водный объект, с целью снижения антропогенной нагрузки на водоток предприятию сформированы ограничения по объему перерабатываемого сырья в зависимости от видов производимой продукции:

- при одновременном производстве ЦМП и сыров допустимый объем переработки сырья не должен превышать 140 т молока в сутки, также при работе сырцефа в режиме 15 т сыра в сутки, выпуск продукции в цехе ЦМП должен быть снижен в 1,5–2 раза по отношению к выпуску продукции в цехе ЦПМ, когда варка сыров в сырцефе не осуществляется;
- при работе только цеха ЦМП и приемки сырцефа допустима переработка сырья в объеме до 180 т молока в сутки.

Приведенные результаты исследований указывают на необходимость обязательной детализации статей водопользования на предприятиях по производству молочных продуктов, особенно в случаях

²Анализ эффективности работы существующих очистных сооружений производственного унитарного предприятия «Мстиславльмолоко» с выдачей рекомендаций по повышению эффективности очистки сточных вод при отведении в водный объект»: отчет о НИР (заключ.) / РУП «ЦНИИКИВР»; рук. П. Н. Захарко; исполн.: С. А. Дубенок [и др.]. Москва: [б. и.]; 2016. 145 с. № государственной регистрации 20163010.

наличия у них очистных сооружений с установленной проектной мощностью, нарушение которой приведет к сбросу недостаточно очищенных сточных вод в водный объект.

В целом все статьи водопользования на предприятиях по производству молочных продуктов разделены на нужды основного производства, нужды вспомогательного производства, нужды хозяйственно-питьевые: – основного производства составляют от 75,4 до 98,4 % (в среднем 89 %) от общего водопотребления; – вспомогательного производства от 0,5 до 22,5 % (в среднем 8,6 %) от общего водопотребления; – хозяйственно-питьевые от 0,9 до 6,2 % (в среднем 2,4 %) от общего водопотребления.

Распределение диапазонов водопотребления во многом зависит от уровня организации оборотных систем водоснабжения, которые разделяются на оборотные системы основного производства (охлаждение вакуум-выпарной установки, пастеризатора, гомогенизатора и др. производственного оборудования) и оборотные системы вспомогательного производства (охлаждение аммиачной компрессорной).

Минимальный процент расхода воды на нужды основного производства (75 %) обусловлен высокими потерями в системе оборотного водоснабжения вспомогательного производства, за счет которых возросли нужды вспомогательного производства и составили максимальный процент (22 %) (предприятие 4).

Максимальный процент расхода воды на нужды основного производства (98 %) обусловлен низкими потерями в системе оборотного водоснабжения вспомогательного производства (0,5 %), поэтому основной объем расхода воды распределился на нужды основного производства (предприятие 1).

Расход воды на хозяйственно-питьевые нужды зависит от количества работников, которые трудятся в производственных цехах, и использования воды на полив зеленых насаждений.

Анализ статей расхода воды в различных производственных процессах показал, что даже при функционировании на предприятиях типового оборудования, объемы водопользования по отдельным статьям значительно отличаются, что потребовало более детального анализа статей расхода воды и образования сточных вод.

Как указывалось ранее, на предприятиях по производству сыров могут одновременно производиться и иные виды продукции: ЦМП, масло животное, сухое молоко, концентрированная сыворотка, сухая сыворотка и др., что существенным образом влияет на качественный состав образующихся сточных вод. Следовательно, качественный состав производственных сточных вод формируется за счет поступления в сети канализации нескольких потоков от различных производственных цехов. Соответственно, для прогнозирования качественного состава производственных сточных вод в целом по предприятию, необходимо располагать данными о содержании загрязняющих веществ в сточных водах в зависимости от производимой продукции. Таким образом, при изучении характеристик производственных сточных вод использовались усредненные данные всей имеющейся информации о качественных показателях, что позволило получить наиболее достоверные результаты.

Производственные сточные воды образуются на всех этапах производства молочной продукции и могут быть дифференцированы как:

– производственные сточные воды основного производства, образующиеся непосредственно в производственных цехах (участках);

– производственные сточные воды, образующиеся при вспомогательных процессах производства.

Концентрации загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод значительно изменяются в зависимости от осуществляемых технологических процессов и уровня оптимизации водопользования.

Детализация осуществления отдельных производственных процессов на предприятиях по производству молочной продукции позволила выделить факторы, влияющие на качественный состав производственных сточных вод, и определить типовой перечень загрязняющих веществ в производственных сточных водах.

Этап приемки сырья является первым технологическим процессом, при котором образуются производственные сточные воды в результате наружной и внутренней мойки автомолцистерн, доставляющих молоко. Образующиеся сточные воды содержат органические вещества (за счет поступления остатков сырья при внутренней мойке автомолцистерн), минеральные вещества в виде взвешенных веществ, а также нефтепродукты (при обмыве колес и наружной поверхности автомолцистерн). При этом соединения азота и фосфора представлены как в органической (остатки сырья), так и неорганической форме за счет сброса отработанных моющих и дезинфицирующих растворов (табл. 4).

Локальная очистка сточных вод на участке наружной мойки автомолцистерн может осуществляться от взвешенных веществ и нефтепродуктов, за счет установки песколовки и бензомаслоуловителя. Сточные воды непосредственно от работы технологического оборудования могут быть разделены на два вида:

– незагрязненные – прямоточное охлаждение оборудования (пастеризационно-охладительная установка, заквасочник, маслоизготовитель, маслообразователь, насосы подачи сырья и др.), подача горячей воды в стерилизатор;

– загрязненные – при смыве остатка продукта в плунжерных гомогенизаторах; при выгрузке осадка из самовыгружающегося сепаратора, концентрат при получении обессоленной воды.

При работе гомогенизатора и сепаратора образуются сточные воды, содержащие высокие концентрации легко и трудноокисляемых органических веществ, выраженных по БПК и ХПК, соединений азота и фосфора. Особенно высокие концентрации перечисленных веществ и показателей фиксируются на этапе выгрузки осадка из сепаратора, где фактически выгружаются остатки молока с осадком (табл. 5).

Таблица 4

Среднесуточные концентрации загрязняющих веществ в сточных водах на участке приемки молока

Table 4

Average daily concentrations of pollutants in the wastewater of the receiving area

Наименование вещества (показателя)	Концентрации загрязняющих веществ		
	средняя	минимальная	максимальная
ХПК, мгО ₂ /дм ³	621	565	726
Азот общий, мг/дм ³	60,45	41,3	79,6
Фосфор общий, мг/дм ³	7,165	6,09	8,24
Водородный показатель, ед. рН	6,74	6,59	6,82
Взвешенные вещества, мг/дм ³	466,7	200,0	800,0

Таблица 5

Среднесуточные концентрации загрязняющих веществ в сточных водах сепараторной

Table 5

Average daily concentrations of pollutants in the wastewater of the separator

Наименование вещества (показателя)	Концентрации загрязняющих веществ		
	средняя	минимальная	максимальная
ХПК, мгО ₂ /дм ³	8223,3	5920	10050
Азот общий, мг/дм ³	174,7	136	210
Фосфор общий, мг/дм ³	40,9	32,88	56,8
Водородный показатель, ед. рН	9,2	9	9,5
Взвешенные вещества, мг/дм ³	2300,0	1600	2700

Наиболее загрязненные сточные воды образуются при санитарной обработке оборудования, которая может осуществляться ручным или механизированным способом. Большая часть оборудования на предприятиях по производству молочных продуктов преимущественно моется с использованием механизированного способа. Ручным способом моются съемные части оборудования, осуществляется наружный обмыв оборудования.

При ручной санитарной обработке оборудование моется в специальных моечных ваннах, включающих 2–4 секции, в секции добавляются моющие и дезинфицирующие растворы. Мойка осуществляется в следующей последовательности: детали ополаскиваются водой, затем помещаются в секции с моющим (дезинфицирующим) раствором и далее повторно ополаскиваются проточной водой.

Механизированная санитарная обработка оборудования осуществляется с использованием балансировочных бачков или емкостей СИП-моек. В балансировочных бачках вода и моющие растворы циркулируют в течение одного цикла мойки и далее сбрасываются в канализацию. СИП-мойки осуществляются в автоматическом режиме, при котором моющие растворы после цикла мойки возвращаются в специальные емкости и используются многократно.

При санитарной обработке оборудования используется большое количество моющих (раствор азотной кислоты, щелочи) и дезинфицирующих растворов, которые после использования, зачастую без их нейтрализации, отводятся в сети канализации предприятия.

Учитывая, что качественный состав сточных вод производственных цехов зависит от осуществляемых технологических процессов, используемого оборудования и уровня организации санитарных обработок оборудования, на рассматриваемых предприятиях проведены суточные отборы проб и лабораторные испытания сточных вод от различных цехов и более детально изучен качественный состав сточных вод, формирующихся при производстве различных видов молочных продуктов. Обобщенные данные по качеству сточных вод приведены в табл. 6.

Проведенный анализ качественного состава сточных вод, формирующихся при производстве сыра, показал, что в случае сброса в сети канализации сыворотки, концентрации ХПК возрастают в 3 раза, по азоту общему – в 8,5 раза, фосфору общему – в 18 раз, по хлорид-иону – в 68 раз по отношению к концентрациям данных показателей в сточных водах предприятия, где сыворотка, образующаяся после производства сыра, перерабатывается.

Высокие концентрации ХПК характерны для сточных вод, формирующихся при производстве казеина, сухого молока и концентрированной сыворотки. Наиболее высокие концентрации сухого остатка (минерализации) характерны для сточных вод, формирующихся при производстве сыра и плавленых сыров. Наиболее высокие концентрации хлорид-иона характерны для сточных вод, формирующихся при производстве сухого молока и концентрированной сыворотки. Величина pH смещается в сторону кислой среды при производстве творога, сухого молока и сыворотки, в сторону щелочной среды при производстве сухих молочных продуктов (без сыворотки), казеина, масла. Приведенное в табл. 6 качество характерно для отдельных потоков производственных сточных вод, конкретного цеха, специализирующегося на выпуске определенного вида продукции.

Таблица 6

Концентрации загрязняющих веществ в производственных сточных водах (среднесуточные)

Table 6

Concentrations of pollutants in industrial wastewater (average daily)

Наименование производимой продукции	Наименование загрязняющего вещества (показателя)						
	ХПК, мгО ₂ /дм ³	азот общий, мг/дм ³	фосфор общий, мг/дм ³	фосфат-ион, мгР/дм ³	сухой остаток (минерализация), мг/дм ³⁽⁴⁾	хлорид-ион, мг/дм ³	водородный показатель, ед. рН
Сухие молочные продукты (без сыворотки) ¹⁾	1700–2700	23–65	18–24	17–23	1076–1150	45–61	9,1–10,5
Сухие молочные продукты и концентрированная сыворотка ¹⁾	3800–7600	–	–	–	–	750–870	4,7–6,5
Творог, сухие молочные продукты, включая сыворотку ¹⁾	2180–2500	92–123	–	–	600–900	–	4,2–4,6
Сыр ²⁾	3500–12700	500–2000	150–540	–	–	10300–17200	5,1–5,6
Сыр ³⁾	3300–3900	150–230	26–30	–	1900–4100	140–250	7,4–7,7
ЦМП, включая творог ¹⁾	1300–5200	33–105	9–31	–	200–1500	35–695	4,6–9,7
Масло ¹⁾	2800–5800	39–56	–	48–99	–	13–40	10–13,0
Творог ¹⁾	1400–2300	76–100	–	24–42	–	15–19	–
Плавленые сыры ¹⁾	4200–5000	120–140	40–52	–	1700–3600	130–145	5,3–6,7

Примечание. 1) качество по одному предприятию, включает 3 пробы сточных вод; 2) качество по одному предприятию, включает 3 пробы сточных вод, качество с учетом сброса сыворотки при нарушении технологического цикла; 3) качество по трем предприятиям, включает 6 проб сточных вод, качество с учетом переработки сыворотки; 4) сухой остаток (минерализация) – характеризует общее содержание в воде растворенных веществ, главным образом минеральных и частично органических веществ, имеющих температуру кипения выше 105 °С, нелетучих с водяным паром и не разлагающихся при данной температуре.

В то же время необходимо отметить, что в целом качественный состав сточных вод предприятия формируется за счет смешения разных потоков производственных сточных вод (загрязненных, слабозагрязненных, незагрязненных), дополнительных объемов (пермеат, вторичный пар), а также хозяйственно-бытовых сточных вод. Поэтому, говоря про качественный состав сточных вод, формирующихся на территории предприятия, необходимо также рассмотреть концентрации загрязняющих веществ в контрольном колодце предприятия либо приемной камере очистных сооружений при их наличии. Сводные данные качественного состава сточных вод в суточном разрезе при их общем смешении на территории предприятия приведены в табл. 7–8.

Таблица 7

Качественный состав сточных вод в суточном разрезе при общем смешении

Table 7

Qualitative composition of wastewater in the daily context with general mixing

Наименование вещества (показателя)	Производство ЦМП ¹			Производство ЦМП и казеина			Производство ЦМП, сухих молочных продуктов (без сыворотки)			Производство ЦМП, твердых сыров, плавленных сыров (без переработки сыворотки)		
	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.
ХПК, мгО ₂ /дм ³	3852	3306	4543	6932	5307	11113	3510	2040	5249	2664	1472	9610
Азот общий, мг/дм ³	87	64	115	80	52	114	65	33	105	88	67	116
Фосфор фосфатный, мг/дм ³	61	36	107	35	23	48	18	12	23	13	9	16
Фосфор общий, мг/дм ³	66	19	188	81	37	121	26	19	31	20	10	34
Хлорид-ион, мг/дм ³	604	82	2113	747	74	1725	120	35	234	158	70	411
Водородный показатель, ед. рН	7,5	5,9	11,0	5,7	4,3	11,3	6,8	4,6	9,8	7,4	6,6	9,4
Сухой остаток (минерализация), мг/дм ³	3740	500	9600	4378	1000	12200	1337	1234	1456	1387	200	2100
Взвешенные вещества, мг/дм ³	964	200	1500	944	300	1600	382	234	567	719	100	1900

Примечание. ¹ – высокие разовые концентрации хлорид-иона и сухого остатка (минерализации) связаны с переходом на следующий день после производства казеина, утренней санитарной обработки оборудования, участвовавшего в производстве казеина.

Из данных табл. 7–8 следует, что в суточном разрезе за счет постоянного смешения на территории предприятия разных потоков сточных вод и их неравномерности поступления в сети канализации, максимальные концентрации загрязняющих веществ ниже данных, приведенных по отдельным цехам в табл. 6. При этом снижение концентраций загрязняющих веществ даже наблюдается у предприятия, у которого на момент рекогносцировочного обследования фиксировался сброс сыворотки от сырцеа, – максимальная концентрация по хлорид-иону составила 17200 мг/дм³, в общем потоке сточных вод максимальная концентрация по хлорид-иону составила 1580 мг/дм³. Данный факт указывает, прежде всего, на необходимость обязательного усреднения сточных вод перед их отведением в централизованную сеть водоотведения (канализации) населенного пункта или на собственные очистные сооружения предприятия.

Дополнительно проведен анализ динамики изменений суточных концентраций загрязняющих веществ в сточных водах в общем потоке при близких объемах переработки молока и производства продукции. Сводные данные приведены в табл. 9.

Таблица 8

Качественный состав сточных вод в суточном разрезе при общем смешении

Table 8

Qualitative composition of wastewater in the daily context with general mixing

Наименование вещества (показателя)	Производство твердого сыра, масла, сыра плавленого, сухого молока и сухой сыворотки			Производство твердого сыра, масла, концентрированной сыворотки			Производство твердого сыра, масла, сухого молока и сыворотки концентрированной ¹			Производство сухого молока, творога, сывороточно-жирового концентрата		
	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.
ХПК, мгО ₂ /дм ³	3159	2227	4341	7866	3694	9870	3386	1854	4098	4665	3002	6344
Азот общий, мг/дм ³	101	78	138	214	154	315	456	296	600	152	96	250
Фосфор фосфатный, мг/дм ³	36	26	58	42	35	46	17,0	11,4	32,6	55	23	86
Фосфор общий, мг/дм ³	47	25	65	64	39	98	21	15	37	62	29	105
Хлорид-ион, мг/дм ³	283	205	513	4312	2580	6427	743	467	1580	173	63	298
Водородный показатель, ед. рН	7,6	6,7	8,9	5,2	4,1	7,4	7,8	4,8	10,3	8,1	6,6	10,5
Сухой остаток (минерализация), мг/дм ³	1600	500	2500	–	–	–	1466	990	2400	2733	1800	3800
Взвешенные вещества, мг/дм ³	743	300	1300	–	–	–	886	505	1400	1344	600	2800

Примечание. ¹ – качество с учетом сброса сыворотки при нарушении технологического цикла переработки сыворотки.

Таблица 9

Исходные данные по объему водопотребления, выпуску продукции, качеству сточных вод

Table 9

Initial data on the volume of water consumption, output, wastewater quality

№	Наименование и объем продукции, объем переработки молока в сутки	Объем водопотребления, м ³ /сут	Концентрация загрязняющего вещества среднесуточная)		
			ХПК, мгО ₂ /дм ³	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	азот общий, мг/дм ³
1	Переработано 146 т молока, в том числе изготовлено: молоко – 22,3 т; кефир – 9 т; сметана – 2 т; творог – 3,5 т; масло – 4,0 т	192	4800	1290	88
2	Переработано 150 т молока, в том числе изготовлено: молоко – 22 т; кефир – 6 т; сметана – 2,5 т; творог – 3,5 т; масло – 4,5 т	191	2300	680	45
3	Переработано 144 т молока, в том числе изготовлено: молоко – 8 т; кефир – 6 т; сметана – 2 т; творог – 2,5 т	183	1040	603	30,7
4	Переработано 127 т молока, в том числе изготовлено: молоко – 28 т; кефир – 9 т; сметана – 1,7 т; творог – 3 т	170	4420	1280	100
5	Переработано 140 т молока, в том числе изготовлено: молоко – 17 т; кефир – 7 т; сметана – 2,5 т; творог – 3,6 т; масло – 4,7 т	190	4200	1105	43,9

№	Наименование и объем продукции, объем переработки молока в сутки	Объем водопотребления, м ³ /сут	Концентрация загрязняющего вещества среднесуточная)		
			ХПК, мгО ₂ /дм ³	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	азот общий, мг/дм ³
6	Переработано 142 т молока, в том числе изготовлено: молоко – 21 т; кефир – 6,6 т; сметана – 1,4 т; творог – 3,6 т	160	4500	940	53,4
7	Переработано 143 т молока, в том числе изготовлено: молоко – 25 т; кефир – 9 т; сметана – 2,5 т; творог – 2 т.	189	4640	970	90,6
8	Переработано 147 т молока, в том числе изготовлено: молоко – 5 т; творог – 2 т.	129	2900	600	92,5
9	Переработано 141 т молока, в том числе изготовлено: молоко – 22 т; кефир – 7 т; сметана – 1,5 т; творог – 2 т.	144	3360	710	87,2

Приведенные данные указывают, что даже при равномерном ежедневном поступлении сырья, производстве продукции суточные концентрации загрязняющих веществ в общем колодце могут значительно отличаться: ХПК – от 1040 мгО₂/дм³ до 4800 мгО₂/дм³, азот общий – от 30 до 100 мг/дм³, что указывает на многофакторность условий формирования качественного состава сточных вод: качество исходного сырья; соотношение видов производимой продукции и ее номенклатуры.

На основании вышеизложенного следует, что на качественный состав сточных вод предприятий по производству молочных продуктов могут оказывать влияние факторы как ухудшающие, так и улучшающие качество сточных вод.

1. Качество поступающего сырья: при поступлении на предприятие несвежей сыворотки (закисленной) увеличивается показатель ХПК по отношению к низкому значению БПК₅; при поступлении молока с высокой долей механических и микробиологических примесей увеличивается количество осадка, сбрасываемого из сепаратора в канализацию (ухудшает качество).

2. Виды производимых продуктов в течение суток (ухудшает качество).

3. Технологии производства продукции (ухудшает качество).

4. Организация уровня возврата моющих средств при санитарных обработках (при циркуляции моющих – улучшает качество, при сбросе моющих – ухудшает качество).

5. Виды используемых моющих и дезинфицирующих средств (ухудшает качество).

6. Режимы санитарных обработок оборудования: в случае, если после мойки наблюдаются превышения по бак-анализу, оборудование автоматически включается на повторную мойку (улучшает качество).

7. Наличие мембранных установок по переработке молока, сыворотки (ухудшает качество).

Таким образом, с целью получения наиболее достоверной информации о качественном составе сточных вод предприятия по производству молочной продукции, необходимо проводить постоянный мониторинг качества сточных вод с учетом разных режимов производства продукции. И при наличии достаточно ряда статистических данных возможно более точно ежедневно прогнозировать качественный состав сточных вод в зависимости от видов поступающего сырья, производимой продукции.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы по выявленным зависимостям:

1. При производстве сыров и переработке сыворотки норматив водоотведения всегда будет превышать норматив водопотребления. Разница между нормативом водоотведения и нормативом водопотребления зависит от содержания сухого вещества в концентрированной сыворотке: с увеличением доли сухого вещества возрастает объем пермеата (при использовании мембранных установок), вторичного пара (при использовании вакуум-выпарных установок), отводимых в сети канализации предприятия.

2. При производстве сыров и отсутствии переработки сыворотки (за счет ее отгрузки на иные предприятия), норматив водопотребления всегда будет превышать норматив водоотведения за счет отсутствия сброса пермеата и вторичного пара в сети канализации предприятия. Разница между нормативом водопотребления и нормативом водоотведения будет зависеть от величины потерь воды в технологических процессах.

3. При производстве сыров, переработке сыворотки и производстве цельномолочной продукции (ЦМП) нормативы водопользования напрямую зависят от производимых видов молочных продуктов: при производстве только ЦМП норматив водоотведения будет меньше норматива водопотребления; при

одновременном производстве сыров, ЦМП и переработке сыворотки норматив водоотведения будет всегда превышать норматив водопотребления, разница между нормативом водоотведения и нормативом водопотребления будет зависеть от количества варок сыра в сутки.

Проведенный анализ качественного состава сточных вод позволил выявить следующие закономерности:

- высокие концентрации ХПК характерны для сточных вод, формирующихся при производстве казеина, сухого молока и концентрированной сыворотки;
- высокие концентрации сухого остатка (минерализации) характерны для сточных вод, формирующихся при производстве сыра, плавленых сыров;
- высокие концентрации хлорид-иона характерны для сточных вод, формирующихся при производстве концентрированной сыворотки;
- величина рН смещается в сторону кислой среды при производстве творога, сухого молока и сыворотки, а в сторону щелочной среды – при производстве сухих молочных продуктов (без сыворотки), казеина, масла.

Полученные данные могут использоваться проектными организациями при составлении баланса водопотребления и водоотведения в составе проектной документации, подборе технологии очистки сточных вод при проектировании очистных сооружений сточных вод.

Заключение

Молочная промышленность активно развивающаяся отрасль экономики, характеризующаяся постоянными модернизациями, которые сопровождаются внедрением нового технологического оборудования и новых видов молочной продукции, изменением режимов водопотребления и водоотведения, качественного состава сточных вод. Проведенная детализация статей водопользования в совокупности с анализом технологических процессов производства продукции позволили сформировать режимы водопотребления и водоотведения, диапазоны концентраций загрязняющих веществ в составе сточных вод для дальнейшего прогнозирования водопользования в увязке с видами производимой продукции для предприятий молочной промышленности.

Библиографические ссылки

1. Захарко ПН. Моделирование водопользования для предприятий по производству молочных продуктов Беларуси. В: 6-й Международный молодежный конгресс устойчивое развитие: защита окружающей среды, энергосбережение, сбалансированное природопользование, Львов 9–10 февраля 2021 г. Львов: [б. и.]; 2021. с. 246.
2. Захарко ПН, Дубенок СА. Методика расчета водопользования для предприятий по производству молочных продуктов с учетом перерабатываемого сырья и производимой продукции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;2:93–103.

References

1. Zakharko PN. *Modelirovaniye vodopol'zovaniya dlya predpriyatiy po proizvodstvu molochnykh produktov Belarusi* [Water use modeling for enterprises producing dairy products Belarus]. In: 6th International Youth Congress of Sustainable Development: Environmental Protection, Energy Saving, Balanced Nature Management, Lviv 2021 February 9–10. Lvov: [publisher unknown]; 2021. p. 246. Russian.
2. Zakharko PN, Dubenok SA. *Metodika rascheta vodopol'zovaniya dlya predpriyatiy po proizvodstvu molochnykh produktov s uchetom peverabatyvayemogo syr'ya i proizvodimoy produktsii* [Methodology for calculating water use for enterprises producing dairy products, taking into account processed raw materials and manufactured products]. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:93–103. Russian.

Статья поступила в редколлегию 04.05.2022.
Received by editorial board 04.05.2022.

СОДЕРЖАНИЕ

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

<i>Лучина В. Н., Сивуха В. В.</i> Влияние урбанизации на психофизиологическое здоровье жителей мегаполисов в условиях пандемии COVID-19.....	4
--	---

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Голубев А. П., Алехнович А. В., Бодиловская О. А., Улащик Е. А., Гопинатхан Анилкумар.</i> Опыт непрерывного подращивания сеголетков широкопалого рака <i>Astacus astacus</i> для потребностей аквакультуры	12
<i>Шавалда Е. С., Степанович И. М.</i> Флористический состав и пространственные изменения придорожной растительности в экспозиции «выемка» на примере автомобильных дорог г. Минска и Минской области	26
<i>Макаренко Т. В., Хаданович А. В., Пырх О. В., Парфенкова А. С.</i> Анализ загрязнения тяжелыми металлами мягких тканей двустворчатых моллюсков в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий	39

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Гарбарук Д. К., Углянец А. В.</i> Загрязнение древесины и коры ¹³⁷ Cs в высоковозрастных насаждениях ольхи черной в ближней зоне Чернобыльской атомной электростанции	48
---	----

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Пархимович О. Г., Бичан О. Д., Буланова К. Я.</i> Постлучевые изменения содержания в крови тромбоцитов и их функциональной активности	59
--	----

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Шачнева Е. Ю.</i> Получение сорбентов на основе природного минерального сырья	66
<i>Пашкевич А. М., Чайковский А. И., Рупасова Ж. А., Задаля В. С.</i> Влияние продолжительности светодиодного освещения на состояние пигментного фонда пластид микрозелени гороха овощного	75
<i>Горовых О. Г., Будько С. В., Саевич К. Ф.</i> Опыт использования биодеструктора «Деворойл» для очистки почв Брестского отделения железной дороги от нефтяных загрязнений	81
<i>Захарко П. Н., Дубенок С. А.</i> Устойчивое водопользование на основе регулирования водопотребления, водоотведения, качества сточных вод на предприятиях по производству молочных продуктов.....	88

CONTENTS

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

<i>Luchina V. N., Sivukha V. V.</i> The impact of urbanization on the psychophysiological health of residents of megacities in the conditions of the COVID-19 pandemic.....	4
---	---

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Golubev A. P., Alekhnovich A. V., Bodilovskaya O. A., Ulashchyk E. A., Gopinathan Anilkumar.</i> The experience of perennial growing up of fingerlings of noble crayfish <i>Astacus astacus</i> for aquaculture needs.....	12
<i>Shavalda Ya. S., Stepanovich I. M.</i> Floristic composition and spatial changes of roadside vegetation in the exposition <i>notch</i> on the example of Minsk and Minsk region highways	26
<i>Makarenko T. V., Khadanovich A. V., Pyrkh O. V., Parfenkova A. S.</i> Analysis of heavy metal contamination of soft tissues of bivalve mollusks in water bodies of Gomel and adjacent territories.....	39

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Garbaruk D. K., Uglyanets A. V.</i> Wood and bark ¹³⁷ Cs contamination in black alder high-age stands in the near zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant.....	48
--	----

MEDICAL ECOLOGY

<i>Parkhimovich O. G., Bichan O. D., Bulanova K. Ya.</i> Post-radiation changes in the content of platelets in the blood and their functional activity	59
--	----

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Shachneva E. Yu.</i> Obtaining sorbents based on natural mineral raw materials.....	66
<i>Pashkevich H. M., Tchaikovskiy A. I., Rupasova Zh. A., Zadalia V. S.</i> Influence of the duration of led lighting on the state of the pigment fund of plas-tids of vegetable pea microgreen	75
<i>Gorovykh O. G., Budko S. V., Saevich K. F.</i> Experience of using the biodestructor <i>Devoroil</i> for cleaning soils of railway sections from oil contaminations	81
<i>Zakharko P. N., Dubianok S. A.</i> Sustainable water use on the basis of regulation of water consumption, water disposal, wastewater quality at dairy production enterprises.....	88

Журнал включен Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований по биологическим, сельскохозяйственным и техническим (экология) наукам.

Журнал включен в библиографическую базу данных научных публикаций «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

**Журнал Белорусского
государственного университета. Экология.
№ 2. 2022**

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 25.06.2022.
Тираж 100 экз. **Заказ**.

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

© БГУ, 2022

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 2. 2022**

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 25.06.2022.
Edition 100 copies. **Order number**.

RUE «Information Computing Center of the Ministry
of Finance of the Republic of Belarus».
License for publishing No. 02330/89, 3 March, 2014.
17 Kalvaryjskaya Str., 220004, Minsk.

© BSU, 2022