



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

2020

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

УДК 796.5/332.1

АРХЕАЛАГІЧНАЯ СПАДЧЫНА БЕЛАРУСІ ЯК РЭСУРС УСТОЙЛІВАГА ТУРЫЗМУ: СТАН І ПЕРСПЕКТЫВЫ ВЫКАРЫСТАННЯ

М. А. ПЛАВІНСКІ¹⁾

¹⁾Міжнародны дзяржаўны экалагічны інстытут імя А. Д. Сахарава, Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт,
вул. Даўгабродская, 23/1, 220070, г. Мінск, Беларусь

Разглядаецца сучасны стан і перспектывы выкарыстання археалагічнай спадчыны Беларусі ў якасці рэсурсу ўстойлівага турызму. Аналіз сучаснага стану спраў у турыстычнай сферы дазваляе сцвярджаць, што яе значэнне ў якасці рэсурсу ўстойлівага турызму недаацэньваецца. У пэўнай ступені такое стаўленне да выкарыстання археалагічных помнікаў у якасці турыстычных аб'ектаў можа тлумачыцца неабходнасцю стварэння адмысловай інфраструктуры і інфармацыйнага суправаджэння, што прадугледжвае прыцягненне больш значных інвестыцый для турыстычнага засваення археалагічнай спадчыны ў параўнанні з прыродна-рэкрэацыйнымі рэсурсамі. Разам з тым, відавочна, што археалагічная спадчына Беларусі з'яўляецца выключна важным рэсурсам турызму, актывізацыя выкарыстання якога ў бліжэйшай перспектыве можа дазволіць забяспечыць устойлівасць яго развіцця.

Ключавыя словы: археалагічная спадчына; інфраструктура; устойлівы турызм; устойлівае развіццё.

Образец цитирования:

Плавинский МА. Археологическая спадчына Беларусі як рэсурс ўстойлівага турызму: стан і перспектывы выкарыстання. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:4–8.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-4-8>

For citation:

Plavinski MA. Archaeological heritage of Belarus as a resource of sustainable tourism: state and prospects of use. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:4–8. Belarusian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-4-8>

Автор:

Николай Александрович Плавинский – кандидат исторических наук, доцент; заведующий кафедрой социально-гуманитарных наук и устойчивого развития.

Author:

Mikalay A. Plavinski, PhD (history), docent; head at the department of social-humanitarian sciences and sustainable development.
plavinsky_arc@mail.ru

АРХЕОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ БЕЛАРУСИ КАК РЕСУРС УСТОЙЧИВОГО ТУРИЗМА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ

Н. А. ПЛАВИНСКИЙ¹⁾

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

Рассматривается современное состояние и перспективы использования археологического наследия Беларуси в качестве ресурса устойчивого туризма. Анализ современной туристической сферы дает возможность утверждать, что его значение как ресурса устойчивого туризма недооценивается. В некоторой степени такое отношение к использованию археологических памятников как туристических объектов объясняется необходимостью создания специальной инфраструктуры и организации информационного сопровождения, что предусматривает привлечение больших инвестиций для туристического освоения археологического наследия по сравнению с природно-рекреационными ресурсами. Вместе с тем очевидно, что археологическое наследие Беларуси является исключительно важным ресурсом туризма, активизация использования которого в ближайшей перспективе даст возможность обеспечить устойчивость его развития.

Ключевые слова: археологическое наследие; инфраструктура; устойчивый туризм; устойчивое развитие.

ARCHAEOLOGICAL HARITAGE OF BELARUS AS A RESOURCE OF SUSTAINABLE TOURISM: STATE AND PROSPECTS OF USE

M. A. PLAVINSKI^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daihabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: plavinsky_arc@mail.ru

The article discusses the state and prospects of using the archaeological heritage of Belarus as a sustainable tourism resource. An analysis of the current state of affairs in the tourism sector suggests that the importance of the archaeological heritage as a sustainable tourism resource is underestimated. To a certain wall, this attitude to the use of archaeological monuments as tourist sites can be explained by the need to create special infrastructure and information support. This involves attracting large investments for the development of the archaeological heritage in comparison with natural and recreational resources. At the same time, it is obvious that the archaeological heritage of Bialarus is an extremely important tourism resource, the intensification of the use of which in the near future can make it possible to ensure the sustainability of its development.

Keywords: archaeological heritage; infrastructure; sustainable tourism; sustainable development.

Уводзіны

Паняцце «ўстойлівы турызм» усё часцей выкарыстоўваецца ў Беларусі. Нягледзячы на адсутнасць адзінага агульнапрынятага вызначэння ўстойлівага турызму як экалагічнага, эканамічнага і сацыякультурнага феномена, абмеркаванне яго зместу прыкметна актывізавалася ў нашай краіне на працягу некалькіх апошніх гадоў. Гэтаму ў значнай ступені паспрыялі як канкрэтныя ўмовы і кірункі эканамічнага развіцця Беларусі, а менавіта, актыўны рост уязнога турызму, падтрымка якому аказваецца на дзяржаўным узроўні [5], так і міжнародныя ініцыятывы, накіраваныя на папулярызаванне ідэі ўстойлівага развіцця. Да ліку апошніх найперш належыць рэзалюцыя 70-й сесіі Генеральнай Асамблеі Арганізацыі Аб'яднаных Нацый ад 22 снежня 2015 г., якая абвясціла 2017 г. Міжнародным годам ўстойлівага турызму.

У межах мерапрыемстваў, прымеркаваных у Беларусі да гэтага года, праводзіліся асобныя навуковыя мерапрыемствы (круглы стол «Культурная спадчына і турызм», арганізаваны 18.04.2017 г. Міністэрствам культуры Рэспублікі Беларусь сумесна з Інстытутам культуры Беларусі і Мінгарвыканкамам у Мастацкай галерэі Міхаіла Савіцкага [10]) і выставы («Устойлівы турызм і ўстойлівае развіццё», 13.01–28.02.2017 г., Нацыянальная бібліятэка Беларусі) [11].

Разам з тым, можна заўважыць тэндэнцыю, у адпаведнасці з якой паняцце ўстойлівага турызму атаясамліваецца найперш з экалагічным турызмам і, адпаведна, у якасці асноўных турыстычных рэсурсаў разглядаюцца прыродна-рэкрэацыйныя. Лічыцца, што рэальна арганізаваны экатурызм больш за іншыя яго віды адпавядае крытэрыям ўстойлівасці. У сучасных беларускіх рэаліях у кантэксце ўстойлівасці абмяркоўваюцца пераважна такія віды турыстычнай дзейнасці, як аграэкатурызм і наведванне асабліва

ахоўваемых прыродных тэрыторый. Пры гэтым прызнаецца, што вызначэнне «ўстойлівы» можа адпавядаць не толькі экалагічнаму турызму [12]. Аднак на практыцы ў якасці рэсурсаў устойлівага турызму толькі час ад часу разглядаюцца аб'екты гісторыка-культурнай спадчыны, прычым гаворка звычайна ідзе пераважна аб помніках архітэктуры альбо гістарычных і архітэктурных ландшафтах.

У сваю чаргу, абмеркаванне патэнцыялу выкарыстання археалагічнай спадчыны ў якасці рэсурсу ўстойлівасці турызму практычна не адбываецца. На наш погляд, штучнае выключэнне археалагічных помнікаў з ліку патэнцыйных аб'ектаў турыстычнага выкарыстання значна збядняе рэсурсную базу турызму, што натуральным чынам уплывае на перспектывы яго ўстойлівага развіцця ў Беларусі.

Стан і перспектывы выкарыстання археалагічнай спадчыны Беларусі як рэсурсу ўстойлівага турызму. Згодна з дзеючым беларускім заканадаўствам, пад вызначэннем «археалагічная спадчына» разумеецца ўся сукупнасць існуючых у краіне археалагічных аб'ектаў і артэфактаў, у тым ліку помнікаў археалогіі. У сваю чаргу, пад археалагічнымі разумеюцца нерухомыя матэрыяльныя аб'екты або іх комплексы, якія ўзніклі ў выніку жыццядзейнасці чалавека больш за сто дваццаць гадоў таму і захаваліся ў зямлі або на дне прыродных і штучных вадаёмаў, маюць гістарычнае, мастацкае, навуковае або іншае культурнае значэнне. Да ліку археалагічных аб'ектаў належаць: рэшткі ўмацаваных паселішчаў (гарадзішчы, старажытныя гарады і замкі), неўмацаваныя паселішчы розных эпох, асобныя будынкі і іх комплексы, культавыя аб'екты (свяцілішчы, храмы і манастыры); культавыя камяні і крыжы, курганныя і грунтовыя могілнікі і асобныя старажытныя магілы, інфраструктура сухапутных, водных і водна-волакавых шляхоў [6]. Такім чынам, пералік відаў археалагічных помнікаў сведчыць аб іх вялікай разнастайнасці. Акрамя таго, археалагічныя аб'екты з'яўляюцца самай шматлікай па колькасці катэгорыяй нерукомых гісторыка-культурных каштоўнасцей Рэспублікі Беларусь [4]. Гэта, у сваю чаргу, дазваляе разглядаць археалагічную спадчыну ў якасці выключна важнага рэсурсу ўстойлівасці турыстычнай дзейнасці.

Уключэнне археалагічных помнікаў у экскурсійныя маршруты дазваляе ствараць арыгінальны турыстычны прадукт, унікальны для кожнага асобнага рэгіёна. Разам з тым, у працэсе турыстычнага выкарыстання археалагічных помнікаў варта мець на ўвазе некаторыя іх асаблівасці. Галоўная з іх заключаецца ў тым, што значная частка такіх археалагічных аб'ектаў, як неўмацаваныя паселішчы, курганныя і грунтовыя могілнікі, свяцілішчы, старажытныя дарогі і г. д. не валодаюць ярка выяўленай атрактыўнасцю. Адпаведна, дзеля таго, каб зрабіць іх прывабнымі і максімальна інфарматыўнымі для наведвання, дадзены тып аб'ектаў патрабуе стварэння адпаведнай інфраструктуры і інфармацыйнага суправаджэння. Менавіта неабходнасць прыцягнення большых інвестыцый для турыстычнага засваення археалагічных помнікаў у параўнанні з прыродна-рэкрэацыйнымі рэсурсамі пакуль запавольвае інтэнсіўнасць іх выкарыстання.

Разам з тым, сёння можна прывесці шэраг прыкладаў паспяховага турыстычнага выкарыстання археалагічнай спадчыны Беларусі. Найбольш атрактыўнай для турыстаў формай прэзентацыі археалагічных помнікаў з'яўляецца стварэнне музея пад адкрытым небам. Найлепшым прыкладам такога музея ў Беларусі з'яўляецца археалагічны музей «Бярэсце». Музей быў адкрыты ў 1982 г. Асновай яго экспазіцыі з'яўляюцца раскрытыя падчас раскопак, праведзеных у 1969–1981 гг. П. Ф. Лысенкам, рэшткі драўлянай забудовы дзядзінца летапіснага Бярэсця XIII ст. На глыбіні чатырох метраў на плошчы 1118 м² экспануюцца рэшткі 28 жылых і гаспадарчых пабудов, а таксама драўляныя маставыя, вастраколы і рэшткі глінабітных печаў [8]. Галоўнай асаблівасцю музея «Бярэсце» з'яўляецца выключна добрая захаванасць рэшткаў гарадской драўлянай забудовы старажытнарускага часу. Паводле існуючых даных, за час працы музея яго наведала больш за тры мільёны турыстаў [1].

Яшчэ адным прыкладам турыстычнага выкарыстання археалагічнага помніка шляхам ператварэння яго ў музей пад адкрытым небам з'яўляецца музей, які пачаў дзейнічаць у чэрвені 2019 г. у Нацыянальным парку «Белавежская пушча». На тэрыторыі новастворанага музея маецца некалькі археалагічных помнікаў, раскопкі якіх былі праведзеныя калектывам даследчыкаў з Інстытута гісторыі НАН Беларусі пад навуковым кіраўніцтвам В. Л. Лакізы. У выніку гэтых раскопак была выяўлена прадстаўнічая калекцыя археалагічных матэрыялаў, якія датуюцца часам ад мезаліту да эпохі Сярэднявекі. Сам музей уяўляе з сябе натурную рэканструкцыю гарадзішча позняга бронзавага – ранняга жалезнага веку. У працэсе рэканструкцыі абарончых збудаванняў гарадзішча, а таксама жылых і гаспадарчых пабудов на яго тэрыторыі ў якасці навуковага абгрунтавання былі выкарыстаныя вынікі даследаванняў помнікаў культуры штрыхаванай керамікі і мілаградскай культуры жалезнага веку ў межах Беларусі [2; 7].

У якасці прыкладаў паспяховага комплекснага турыстычнага выкарыстання археалагічнай спадчыны і прыродна-рэкрэацыйных рэсурсаў можна прывесці прыклад некаторых рэгіёнаў на паўночным захадзе Беларусі. Так, на працягу апошніх двух дзесяцігоддзяў склалася ўдалая практыка комплекснага асваення прыроднай і гісторыка-культурнай спадчыны Браслаўскага р-на Віцебскай вобл. Пры гэтым прыродныя помнікі рэгіёна сталі выкарыстоўвацца ў якасці рэсурсаў прыцягнення турыстаў яшчэ ў 1920–1930-е гг., калі гэта тэрыторыя ўваходзіла ў склад міжваеннай Польскай дзяржавы. Дадзеная практыка працягнулася

і ў другой палове XX ст., у адміністрацыйна-тэрытарыяльных межах БССР. Сёння актыўнае турыстычнае выкарыстанне Браслаўскага Паазер'я працягваецца ў значнай ступені дзякуючы дзейнасці Нацыянальнага парка «Браслаўскія азёры». У турыстычныя маршруты ўключаюцца не толькі архітэктурныя аб'екты, але і такія помнікі археалогіі, як сярэдневяковыя гарадзішчы (Замкавая Гара ў Браславе і Маскавічы). Працягваецца праца па стварэнні новых маршрутаў і ўключэнні археалагічных аб'ектаў ва ўжо дзеючыя.

У 2019 г. па ініцыятыве кіраўніка некамерцыйнага праекта «Востраў Манастыр – Кляштар» А. Шэўчык пры падтрымцы раённай адміністрацыі і кіраўніцтва Нацыянальнага парка «Браслаўскія азёры» пачаўся праект па вывучэнні, рэкрэацыі і музеефікацыі вострава Манастыр на возеры Неспіш. У межах і на першым этапе яго рэалізацыі на востраве Манастыр археалагічнай экспедыцыяй Міжнароднага дзяржаўнага экалагічнага інстытута імя А. Д. Сахарова Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта былі праведзеныя археалагічныя раскопкі. У працы экспедыцыі прымалі ўдзел валанцёры з розных рэгіёнаў Беларусі, значную частку з якіх склалі прадстаўнікі мясцовай грамадскасці. Мэтай даследаванняў было вызначэнне характару культурных напластаванняў і выяўленне падмуркаў будынкаў Браслаўскага Прачысценскага праваслаўнага манастыра, які ўпершыню згадваецца пад 1501 г., але час яго ўзнікнення можна аднесці, прынамсі, да XV ст. Пасля заключэння Брэсцкай царкоўнай уніі ў 1596 г. манастыр вызнаў юрысдыкцыю ўніяцкай царквы, а пасля 1617 г. увайшоў у склад базільянскага манаскага ордэна. Перыяд росквіту манастыра пачынаецца з сярэдзіны 1760-х гг., а фінал яго функцыянавання прыпадае на пачатак 1830-х гг., калі на востраве адбыўся пажар, які паклаў канец існаванню манастыра.

Вынікі археалагічных раскопак пакуль не дазваляюць падрабязна рэканструяваць паўсядзённае жыццё яго насельнікаў. Для дасягнення гэтай мэты патрабуюцца шматгадовыя археалагічныя раскопкі. Але ўжо сёння можна сцвярджаць, што ўдалося дасягнуць значных поспехаў у вырашэнні іншых, не менш істотных мэт праекта. Першай з іх з'яўляецца прыцягненне ўвагі мясцовай грамадскасці і патэнцыйных інвестараў да вострава Манастыр як да каштоўнага археалагічнага помніка і магчымага турыстычнага аб'екта. Другая дасягнутая мэта – далучэнне да праекта прадстаўнікоў мясцовай грамадскасці, зацікаўленых у вывучэнні і папулярызацыі гістарычнай спадчыны Браслаўшчыны, што само па сабе з'яўляецца гарантам дасягнення ўстойлівасці турыстычнага асваення рэгіёна.

Прыкладам актывізацыі цікавасці да археалагічнага помніка як да турыстычнага аб'екта ў выніку правядзення археалагічных даследаванняў з'яўляецца замак эпохі позняга Сярэдневякоўя і Новага часу, размешчаны на паўднёва-ўсходняй ускраіне Мядзеля, на паўвостраве возера Мястра. Замак быў заснаваны паміж 1484 і 1490 гг., калі на паўночна-ўсходнім краі замкавага пагорка была ўзведзеная магутная мураваная вежа з камянёў і цэгля. Прыкладна ў сярэдзіне XVI ст. адбылася мадэрнізацыя замкавых умацаванняў – па перыметры замкавага пагорка была пабудавана лінія ўмацаванняў з бастэямі – паўкруглымі пляцоўкамі для размяшчэння гармат. Акрамя таго, вакол замка з мэтай павелічэння яго абараназольнасці быў насыпаны дадатковы земляны вал з бастыёнамі. Пасля заканчэння Лівонскай вайны Мядзельскі замак паступова губляе сваё значэнне як сур'ёзнае фартыфікацыйнае збудаванне, а пасля войнаў сярэдзіны XVII ст. ён, верагодна, пачынае выкарыстоўвацца ў гаспадарчых мэтах. У 1735 г. на тэрыторыі замка адбыўся пажар: што было знішчана агнём, невядома, аднак, мяркуючы па тым, што замкавая зямля ў гэты час арандавалася мяшчанами, тут маглі размяшчацца толькі нейкія малазначныя гаспадарчыя пабудовы. Пасля пажару тэрыторыя замка была канчаткова закінутая і ператварылася ў ворыўныя палеткі жыхароў мястэчка [3; 9].

У працэсе археалагічных даследаванняў, якія праводзіліся экспедыцыяй пад кіраўніцтвам М. А. Плавінскага ў 2013–2015 гг., былі выпрацаваныя падыходы да рэкрэацыі дадзенага архітэктурна-археалагічнага помніка і інтэнсіфікацыі яго турыстычнага выкарыстання. На дадзены момант рэалізацыя гэтых падыходаў прывяла да інфраструктурнай мадэрнізацыі ваколіц замка і спрашчэння доступу да яго турыстаў.

Інтэнсіфікацыя выкарыстання археалагічных аб'ектаў у турыстычнай індустрыі дазваляе мадэрнізаваць мясцовую інфраструктуру і ствараць новыя працоўныя месцы ў рэгіёнах з абмежаваным патэнцыялам індустрыяльнага і сельскагаспадарчага развіцця. Актывізацыя турыстычнага асваення аб'ектаў археалагічнай спадчыны дазваляе прыцягваць не толькі органы мясцовай адміністрацыі і буйных тураператараў, але і прадстаўнікоў рэгіянальнага малога і сярэдняга бізнесу, а таксама шырокія колы мясцовай грамадскасці. У выніку, выкарыстанне археалагічнай спадчыны ў якасці турыстычнага рэсурсу можа стаць важным фактарам ўмацавання гарызантальных сувязей і фарміравання інстытутаў грамадзянскага грамадства на мясцовым узроўні, што з'яўляецца залогам дасягнення мэт устойлівага турызму.

Разам з тым, варта ўлічваць, што ў працэсе інтэнсіфікацыі выкарыстання археалагічнай спадчыны ў якасці турыстычнага рэсурсу непазбежна будзе ўзрастаць фактар антрапагеннага ўздзеяння на канкрэтныя археалагічныя помнікі. Гэта, у сваю чаргу, можа прывесці да значнага пагаршэння стану іх захаванасці, што, адпаведна, патрабуе распрацоўкі комплексу мер па аптымізацыі антрапагеннага ўздзеяння. Дадзеныя захады павінны спрыяць рацыяналізацыі і аптымізацыі выдаткаў на выкарыстанне археалагічных помнікаў у турыстычных мэтах, іх даследаванню, рэстаўрацыі і рэкрэацыі, што дазволіць забяспечыць максімальны эканамічны эфект і ўстойлівасць турыстычнай дзейнасці.

Заклучэнне

Праведзены аналіз дазваляе сцвярджаць, што апошнім часам у Беларусі ідэі ўстойлівага турызму паступова пашыраюцца ў асяроддзі спецыялістаў у дадзенай сферы і пачынаюць рэалізоўвацца на практыцы ў канкрэтнай турыстычнай дзейнасці. Разам з тым, можна прасачыць тэндэнцыю, у адпаведнасці з якой паняцце ўстойлівага турызму атаясамліваецца найперш з экалагічным турызмам, і ў якасці асноўных турыстычных рэсурсаў раглядаюцца прыродна-рэкрэацыйныя. У сваю чаргу, значэнне археалагічнай спадчыны ў якасці рэсурсу ўстойлівага турызму недаацэньваецца.

На наш погляд, шматлікія і разнастайныя аб'екты нерухомай археалагічнай спадчыны Беларусі валодаюць значным турыстычным патэнцыялам. Выкарыстанне археалагічных помнікаў у якасці турыстычных аб'ектаў патрабуе стварэння пэўнай інфраструктуры і інфармацыйнага суправаджэння, што прадугледжвае прыцягненне большых інвестыцый дзеля іх засваення ў параўнанні з прыродна-рэкрэацыйнымі рэсурсамі. Разам з тым, уключэнне археалагічных помнікаў у экскурсійныя маршруты дазваляе ствараць арыгінальны турыстычны прадукт, унікальны для кожнага асобнага рэгіёна.

Такім чынам, відавочна, што археалагічная спадчына Беларусі з'яўляецца выключна важным рэсурсам турызму, актывізацыя выкарыстання якога ў бліжэйшай перспектыве можа дазволіць забяспечыць устойлівасць яго развіцця.

Бібліяграфічныя спасылкі

1. Археалагічны музей «Бярэсце». [Інтэрнэт]. [Працытавана 11 сакавіка 2020]. Даступна па: <http://berestje.brest.museum.by/>.
2. Археологический музей под открытым небом. [Інтэрнэт]. [Працытавана 11 сакавіка 2020]. Даступна па: <https://npbp.by/tours/archaeological-museum-under-the-open-sky/>.
3. Волкаў МА, Плавінскі МА. Мядзельскі замак у святле пісьмовых і археалагічных крыніц. У: *Архіварыус: зборнік навуковых наведанняў і артыкулаў*. 2015; вып. 13:65–92.
4. Абламскі ВЯ, Чарняўскі ІМ, Барысюк ЮА. Дзяржаўны спіс гісторыка-культурных каштоўнасцей Рэспублікі Беларусь. складальнікі. Мінск: БЕЛТА; 2009. 684 с.
5. Закон Рэспублікі Беларусь «О туризме». [Інтэрнэт]. [Працытавана 11 сакавіка 2020]. Даступна па: <http://www.pravo.by/document/?guid=3961&p0=H19900326>.
6. Кодэкс Рэспублікі Беларусь аб культуры: уступіў у сілу з 3 лютага 2017 г. Мінск: Нацыянальны центр прававой інфармацыі Рэспублікі Беларусь; 2016. 272 с.
7. Лакіза ВЛ. Археалагічны турызм: падаражжы ў мінулае. *Навука і інновацыі*. 2013;7 (125):7–12.
8. Лысенко ПФ. *Открытие Берестя*. Мінск: Наука и техника; 1989. 159 с.
9. Плавінскі МА, Власюк ЮЛ. Мядзельскі замак: вынікі археалагічных даследаванняў і магчымасці іх візуалізацыі. *Беларускі гістарычны часопіс*. 2017; 10: 15–20.
10. Свірын І. Турызм – устойлівы? *Культура*. № 16 (1299) 22.04.2017–28.04.2017 г. [Інтэрнэт]. [Працытавана 10 сакавіка 2020]. Даступна па: <http://www.kimpress.by/index.phtml?page=2&id=14094>.
11. Устойчивый туризм и устойчивое развитие. [Інтернет]. [Прочитано 10 марта 2020]. Доступно по: https://www.nlb.by/content/news/book-exhibitions-nlb/ustoychivyy-turizm-i-ustoychivoe-razvitiye_18578/.
12. Шимова ОС. *Устойчивый туризм*. Мінск: РИПО; 2014. 158 с.

References

1. Archaeological museum «Biarescie». [Internet]. [Cited 2020 March 11]. Available from: <http://berestje.brest.museum.by/>.
2. Archaeological museum under the open sky. [Internet]. [Cited 2020 March 11]. Available from: <https://npbp.by/tours/archaeological-museum-under-the-open-sky/>.
3. Volkau M., Plavinski MA. *Miadzelski zamak usvialt pismovykh i arkhealahichnykh krynits* [Miadziel castle in the light of written and archaeological sources]. *Archivarius: collection of scientific reports and articles*. 2015;13:65–92. Belarusian.
4. Ablamski VJa, Čarniaŭski IM, Barysiuk JuA, compilers. *Dziarzhauy spis historyka-kulturnykh kashtounastsey Pespubliri Belarus* [State list of historical and cultural values of the Republic of Belarus]. Minsk.: BIELTA; 2009. 684 p. Belarusian.
5. The Law of the Republic of Belarus «On Tourism». [Internet]. [Cited 2020 March 11]. Available from: <http://www.pravo.by/document/?guid=3961&p0=H19900326>.
6. *Kodeks Respubliri Belarus ustupiu u sily z 3 ljutaha 2017 g.* [The Code of the Republic of Belarus on Culture: comes into force on February 3, 2017]. Minsk: National Center for Legal Information of the Republic of Belarus; 2016. 272 p. Belarusian.
7. Lakiza VL. Archaeological tourism: travels to the past. *Science and innovation*. 2013; 7 (125):7–12. Belarusian.
8. Lysenko PF. *Otkrytie Berestia* [Discovery of Berest'ye]. Minsk: Science and technology; 1989. 159 p. Russian.
9. Plavinski MA, Vlasjuk JuL. Miadziel castle: results of archaeological research and the possibility of their visualization. *Belarusian historical journal*. 2017;10:15–20. Belarusian.
10. Sviryn I. Is tourism sustainable? *Culture*. 2017;16(1299). [Internet]. [Cited 2020 March 10]. Available from: <http://www.kimpress.by/index.phtml?page=2&id=14094>.
11. Sustainable tourism and sustainable development. [Internet]. [Cited 2020 March 10]. Available from: https://www.nlb.by/content/news/book-exhibitions-nlb/ustoychivyy-turizm-i-ustoychivoe-razvitiye_18578/.
12. Shimova OS. *Ustojchivyy turizm* [Sustainable Tourism]. Minsk: RIPO; 2014. 158 p. Russian.

ИЗУЧЕНИЕ

И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY

AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 581.5

DISTRIBUTION PATTERN OF THREATENED PLANTS IN QAKH DISTRICT (AZERBAIJAN): ENVIRONMENTAL FACTORS AFFECTING AND PREDICTION OF THE POTENTIAL DISTRIBUTION

A. G. IBRAHIMOVA^a

^a*Institute of Botany, Azerbaijan National Academy of Sciences,
40 Badamdar Street, Baku AZ1004, Azerbaijan*

Floristic investigations are necessary for the assessment of the current diversity status and conservation of biodiversity on a global and national scale. Recently, biodiversity studies are taken up on different multidisciplinary methods and measurements. Qakh district, which is located in the northwestern part of Azerbaijan demonstrates an extremely diverse local flora, and it presents about 25 % of all plant species of the Caucasus. In the present study for the first time, we compiled a checklist of threatened plants diversity of the study area, the patterns of species range depending on the altitudinal gradient, to determine concentration areas with rich biodiversity and endemism. Besides, selected 15 threatened species were investigated based on multivariate statistical analysis (CCA) based on six environmental factors (temperature, prediction, carbon dioxide, humidity, altitude, and slope). For the first time, we used the Maximum Entropy Modeling (Maxent) approach of the Species Distribution Modelling (SDM) for Qakh district, to predict the potential distribution of *Platanthera chlorantha* (Custer) Rchb. (Orchidaceae), *Ophrys oestriifera* M. Bieb. (Orchidaceae) and *Castanea sativa* Mill. (Fagaceae). The key findings of the study were that the north and northeastern parts were identified as main rich centers of biodiversity and endemism in the study area. As a result of the statistical analysis, it became clear that as the elevation increases the

For citation:

Ибрагимова АГ. Распространение исчезающих растений в Кахском районе (Азербайджан): влияющие экологические факторы и прогнозирование потенциального распространения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:9–17. (На англ.)
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-9-17>

Образец цитирования:

Ibrahimova AG. Distribution pattern of threatened plants in Qakh district (Azerbaijan): environmental factors affecting and prediction of the potential distribution *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:9–17.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-9-17>

Автор:

Аида Гудрат Ибрагимова – заведующий сектором Семенного Банка, председатель совета молодых ученых и специалистов.

Author:

Aida G. Ibrahimova, head at the Seed Bank sector, chair of the council of young scientists and specialists.
aida_dadashova@mail.ru

richness of endemism is also raising. For many plants, the temperature and the humidity were indicated as the significant environmental variables that influenced the species abundance.

Key words: endemism; species richness; CCA; red list species; species distribution modeling; conservation.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИСЧЕЗАЮЩИХ РАСТЕНИЙ В КАХСКОМ РАЙОНЕ (АЗЕРБАЙДЖАН): ВЛИЯЮЩИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

А. Г. ИБРАГИМОВА¹⁾

¹⁾Институт ботаники, Национальная академия наук Азербайджана
ул. Bagamdar, 40, AZ1004, г. Баку, Азербайджан

Флористические исследования необходимы для оценки текущего состояния разнообразия и сохранения биоразнообразия в глобальном и национальном масштабе. В последнее время проводятся исследования биоразнообразия с использованием различных междисциплинарных методов и измерений. Кахский район, который расположен в северо-западной части Азербайджана, демонстрирует чрезвычайно разнообразную местную флору и представляет около 25 % всех видов растений Кавказа. В настоящем исследовании впервые мы составили контрольный список разнообразия растений, находящихся под угрозой исчезновения, в районе исследования, а также в пределах диапазона видов в зависимости от высотного градиента, чтобы определить районы концентрации с богатым биоразнообразием и эндемиками. Кроме того, 15 видов, находящихся под угрозой исчезновения, были исследованы на основе многомерного статистического анализа, основанного на шести факторах окружающей среды (температура, прогноз, содержание углекислого газа, влажность, высота над уровнем моря и уклон). Впервые мы использовали подход «Максимальное моделирование энтропии» для моделирования распределения видов Кахского района, чтобы предсказать потенциальное распределение *Platanthera chlorantha* (Cust.) Rchb. (Orchidaceae), *Ophrys oestrifera* Vieb. (Orchidaceae) и *Castanea sativa* Mill. (Fagaceae). Основные выводы исследования заключались в том, что север и северо-восточные районы были определены в качестве основных богатых центров биоразнообразия и эндемизма в районе исследования. В результате статистического анализа выяснилось, что с увеличением возвышенности разнообразие эндемизма также возрастает. Для многих растений температура и влажность были указаны в качестве значимых переменных среды, которые влияли на численность видов.

Ключевые слова: эндемизм; видовое разнообразие; CCA; красный список видов; моделирование распространения видов; сохранение.

Introduction

Biodiversity is changing by the day over the world and the impacts are mostly not positive. Each natural flora is not only a random composition of species; also it has a unique structure based on its internal compliance. Species diversity of the bioregion, ecoregion, local areas reflects the current state of vegetation and may have some changes and variations within over time. Comparing and assessment of vegetation cover based on differently diversity indexes, mathematical and statistical measures are one of the most widely accepted metrics on biological, ecological and biogeographic researches [Couto, 2005, Hofmann et al., 2017, Raimundo et al., 2017]. Diversity measures provide more information about similarity or dissimilarity of species composition of the areas, species richness, evenness, abundance or dominance of various species. These allow comparing different regions, areas, populations, taxa and etc. One of the main indications of the ecosystem services is diversity, and it directly affects the protection of the biodiversity of the ecosystem [Ricklefs, 1990].

Species distribution modelling is presently the main tool for predicting potential distribution of plant species under climate change [Guisan, Thuiller, 2005]. The maximum entropy modeling technique (Maxent) is one of the most often used [Kariyawasam et al., 2019; Sarıkaya, Örüçü, 2019] a machine-learning algorithm of the SDM methods. Numerous studies have demonstrated the reliability of Maxent [Wosz et al., 2008; Pearson et al., 2007].

Azerbaijan demonstrates an extremely diverse native flora, consisting of more than 4500 species of vascular plants that represent approximately 69 % of the total species of the Caucasus region (6,400 plant species) [Flora of Azerbaijan, 1950–1961; Asgarov, 2011, Alizade et al., 2019]. 200 of them are endemic species of Azerbaijan, 900 endemics of the Caucasus [Red book of Azerbaijan, 2013; Solomon et al., 2013]. Relict species of the Tertiary period can be found in all the areas of Azerbaijan. Although the vegetation of the country has been studied by a number of scientists in different areas, but flora the northwestern part of the Azerbaijan (Qakh region) have not

been thoroughly studied in detail. However, the flora of the Ilisu State Nature Reserve in 1996, which is 11% of the district's territory [Abdullayeva 1996]. In recent years, the flora of the Qakh district was studied in our research studies [Dadashova 2013; Dadashova 2014; Mehdiyeva et al., 2017]. In generally, the data of plant diversity, invasive alien plants, medicinal plants, forest ecosystems of the study area were studied by several researchers [Hajiyev, 2004; Musayev, 1991; Askerov, 2001; Karimov, 2000; Dmitriyeva, 1966; Mehdiyeva, 2007; Hatamov, 1997; Ahmadova, 2008]. The goal of the investigation was for the first time to compile a checklist of plant diversity of the northwestern of Azerbaijan (Qakh region), to study the patterns of distribution of species depending on altitude, to determine concentration areas with rich biodiversity and endemism. For the first time, we used the Maximum Entropy Modeling (Maxent) approach of the Species Distribution Modelling (SDM) for Qakh district, to predict the potential distribution habitat for *Platanthera chlorantha*, *Ophrys oestrifera*, and *Castanea sativa*.

Materials and methods

Study area

Azerbaijan located at the crossroads of Southwest Asia and Southeastern Europe, between latitudes 38° and 42° N, and longitudes 44° and 52° E, in the total area of 86,600 km². It is occupied the southeastern part of the Caucasus. The Caucasus Mountains system includes the Greater Caucasus and the Lesser Caucasus Mountain Ranges, at the intersection of Europe and Asia. The Southeastern part of the Greater Caucasus and the Western part of the Lesser Caucasus belongs to the territory of the country [Museyibov, 1998]. Qakh district located is in the northwestern part of Azerbaijan and the southern part of the Greater Caucasus within the country, in the total area of 1494 km² (fig. 1). There are two protected areas - Ilisu State Nature Reserve (173,81 ha) and Qakh State Nature Sanctuary (368,36 ha) [Ibrahimova, 2015]. According to the botanical-geographical region of Azerbaijan, the northern and northeastern parts of the region belong to the Western Greater Caucasus, central part to the Alazan-Ayrichay valley, and the southern part to Bozgir plateau botanical-geographical region [Flora of Azerbaijan, 1950–1961]. The study area is mainly the mountainous region, basically in the north and northeast parts; the southern and central parts are more lowland areas. Approximately 30 % of the total area of the region territory is forested [Museyibov, 1998]. Forest covered areas are mainly located in the northern and north-eastern part of the region; approximately 50 % of the central part and small areas of the southern part is covered with forests. The flora of the district is quite diverse, due to the various and favorable natural climatic conditions, physical-geographical location, the variety of vegetation types. There are alpine meadows and carpets, subalpine meadows and grass, mountain meadows and meadow steppes of the forest, forest plants, bushes plants, xerophyte light forests, steppe plants, and semi-desert plants vegetation types.

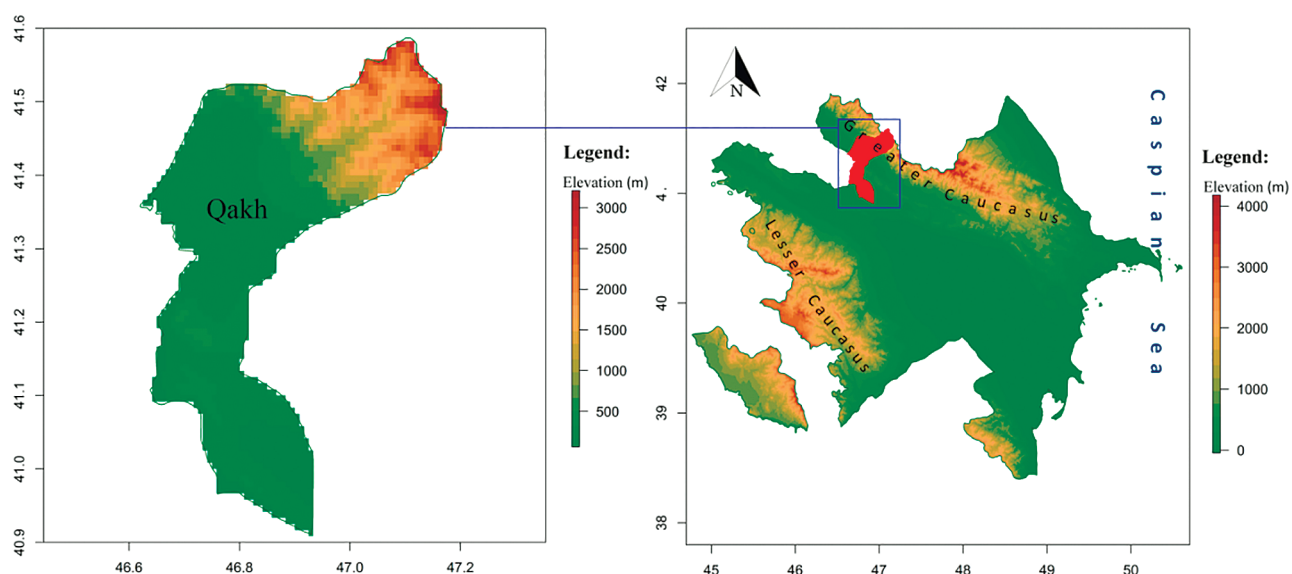


Fig. 1. Location map of Azerbaijan with indication of the altitudinal gradient.

Species occurrence and environmental data

Distribution and environmental data were acquired from our field surveys that were conducted in Qakh district, during the time period of 2012–2019. The threatened plant species checklist was prepared according to route and sampling methods during surveys and investigated literature resources [Flora of Azerbaijan 1950–1961; Alizade

and et al. 2019]. Accepted scientific names and synonyms were determined based on the Flora of Azerbaijan, then verified and updated according to other sources [Flora of Azerbaijan 1950–1961; www.worldfloraonline.org]. Collected herbarium vouchers during field surveys are stored in the Herbarium Foundation (BAK) of the Institute of Botany, Azerbaijan National Academy of Sciences.

Species distribution modeling and statistical analysis

Data of 15 threatened plant species (*Allium ursinum* L., *Castanea sativa* Mill., *Celtis caucasica* Willd., *Corylus colurna* L., *Diospyros lotus* L., *Galanthus caucasicus* (Baker) Grossh., *Limodorum abortivum* (L.) Sw., *Ophrys oestifera* Bieb., *Orchis purpurea* Huds., *Platanthera chlorantha* (Cust.) Reichb., *Pterocarya pterocarpa* (Michx.) Kunth. ex I. Iljinsk., *Punica granatum* L., *Pyracantha coccinea* M. Roem., *Rhus coriaria* L. and *Taxus baccata* L.) and six environmental variables (temperature, humidity, precipitation, carbon dioxide, elevation, and slope) were multivariate analyses using Canonical correspondence analysis (CCA) ordination, in order to understand the environmental factors controlling plant diversity [Palmer 1993; McDonald 2014; Oksanen 2015]. The species are represented as blue circles with the name of the plant and the environmental variables represent the centric green lines.

Climate data were obtained from the WorldClim Global Climate Data to represent present (1970–2000) [Fick et al., 2017; <http://worldclim.org/version2>, consulted on 2017] climatic conditions with a resolution of 30 seconds of arc (~1 km resolution at the equator). The combination of climatic variables used in the model for each species are the following: mean diurnal range (mean of monthly (max temp – min temp)) (Bio2), temperature seasonality (Bio4), min temperature of coldest month (Bio6), temperature annual range, bio5-bio6 (Bio7), mean temperature of coldest quarter (Bio11), annual precipitation (Bio12), precipitation of wettest quarter (Bio16), precipitation of driest quarter (Bio17), precipitation of warmest quarter (Bio18) for *Pl. chlorantha*; Bio2, Isothermality (BIO2/BIO7) (*100) (Bio3), Bio4, Bio6, Bio7, Bio12, precipitation of wettest month (Bio13), Bio17, and Bio18 for *O. oestifera*; Bio6, Bio7, Bio12, precipitation seasonality (coefficient of variation) (Bio15), Bio16, and Bio18 for *C. sativa*.

To predict the potential distribution of the selected threatened plant species (*Platanthera chlorantha*, *Ophrys oestifera* and *Castanea sativa*) we used the Maximum Entropy Modeling technique (Maxent) [Phillips et al., 2006] of a Species Distribution Modeling (SDM) approach [Guisan et al., 2005] via the dismo package [Hijmans et al., 2011] in R version 3.6.2 [R Core Team, 2019]. We compared the relative importance of all (19) bioclimatic predictors to the probability of the species distribution. Species distribution models are evaluated we used the receiver operator characteristic (ROC), summarized by the area under the curve (AUC) statistical test. For easy interpretation of the results, it was created a linear scale of values ranging from 0 to 1 on the maps. Predicted levels classified in four range values: Not suitable (0.00–0.25; white pixels), Low (0.25–0.50; yellow), Medium (0.50–0.75; light purple), High (0.75–1.00, dark purple).

Results and discussion

A threatened plant species generally endangered by changing environmental or human factors, as a result, they become few in numbers. The main criterion for the conservation of these species is to identify significant reasons why the species are becoming endangered. In the study area, we have recorded 4 endemic species of Azerbaijan, 242 endemics of Caucasus. From the total number of species, 54 plant species included in the Red Book of the Republic of Azerbaijan (2013) and 275 endemic plants to the Red List of the Caucasus (2013) (table 1, fig. 2). According to the results of floristically analysis and patterns of endemic richness the Western Greater Caucasus botanical-geography region was identified as the main rich centers of biodiversity and endemism in the study area. One of the main reasons is geographic location and isolation of biodiversity and endemic species among mountain ranges. The percentage of endemism gradually increasing from the lower mountain zone and recorded the highest number of endemic taxa in the middle mountain range, then partially reduced to the alpine zone.

The endemic and red list species varied differently along the altitudinal gradient (fig. 3). The endemic plants of Caucasus, as well as Red Book plant species, were analyzed depending on the altitudinal gradient. The endemic plants of Azerbaijan (4 species) were not taken into account in the analysis in terms of the small number of them. As a result of the analysis, it became clear that as the elevation increases the richness of endemism is also raising. The red list species distributed in all altitude zones in the study area,. The highest richness of endemic as well as red list taxa was found at lower and middle mountain elevation zones. The distribution of endemic species richness at high elevation is governed by a series of biological, geographical, climatic and ecological factors. One of the main reasons for high endemism in higher elevations that most of the endemic plants are located and conserving in the Ilisu State Natural Reserve, where they are have affected by low human activities.

Table 1

The diversity and distribution pattern of endemic and threatened plant species in Qakh district

Geographical range	endemic of Azerbaijan	endemic of the Caucasus	Red Book of Azerbaijan (2013)	Red List of the Caucasus (2013)
Botanical-geographical region				
Western Greater Caucasus	4	225	54	166
Alazan-Ayrichay valley	0	14	8	57
Bozgir plateau	0	29	12	52
Altitudinal zone				
Lowland	0	26	17	68
Lower mountain zone	0	58	29	104
Middle mountain zone	2	92	29	121
Upper mountain zone	2	75	17	67
Subalpine zone	1	72	14	37
Alpine zone	2	79	12	39



Orchis purpurea

Cephalanthera rubra

Limodorum abortivum

Castanea sativa

Astrantia maxima

Fig. 2. The threatened species in Qakh district

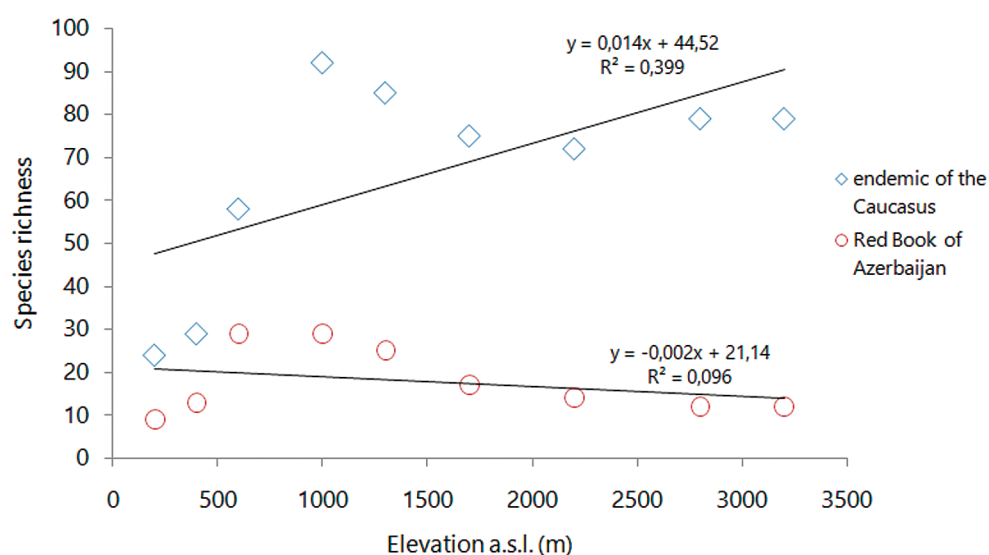


Fig. 3. Linear regression of the endemic and threatened plant species richness along an altitudinal gradient

Data of 15 rare and endangered species (*Allium ursinum* L., *Castanea sativa* Mill., *Celtis caucasica* Willd., *Corylus colurna* L., *Diospyros lotus* L., *Galanthus caucasicus* (Baker) Grossh., *Limodorum abortivum* (L.) Sw., *Ophrys oestifera* Bieb., *Orchis purpurea* Huds., *Platanthera chlorantha* (Cust.) Reichenb., *Pterocarya pterocarpa* (Michx.) Kunth. ex I. Iljinsk., *Punica granatum* L., *Pyracantha coccinea* M. Roem., *Rhus coriaria* L. and *Taxus baccata* L.) and six environmental variables (temperature, humidity, prediction, carbon dioxide, elevation and slope) were subjected multivariate analyses using CCA (Canonical correspondence analysis) for ordination, in order to understand the environmental factors controlling plant abundance. The results of ordination are presented in fig. 4.

For many plants the temperature and the humidity was indicated as the significant environmental variables influenced to the species abundance. *A. ursinum*, *G. caucasicus*, *O. purpurea* and *P. coccinea* are strongly correlated with amount of precipitation and negatively correlated with the temperature. *T. baccata* and *D. lotus* are positively correlated with altitude. The variance is 63 percentages in the species abundance with respect to the environmental variables. Consequently, fig. 2 reasonably faithful in displaying the fitted abundance values.

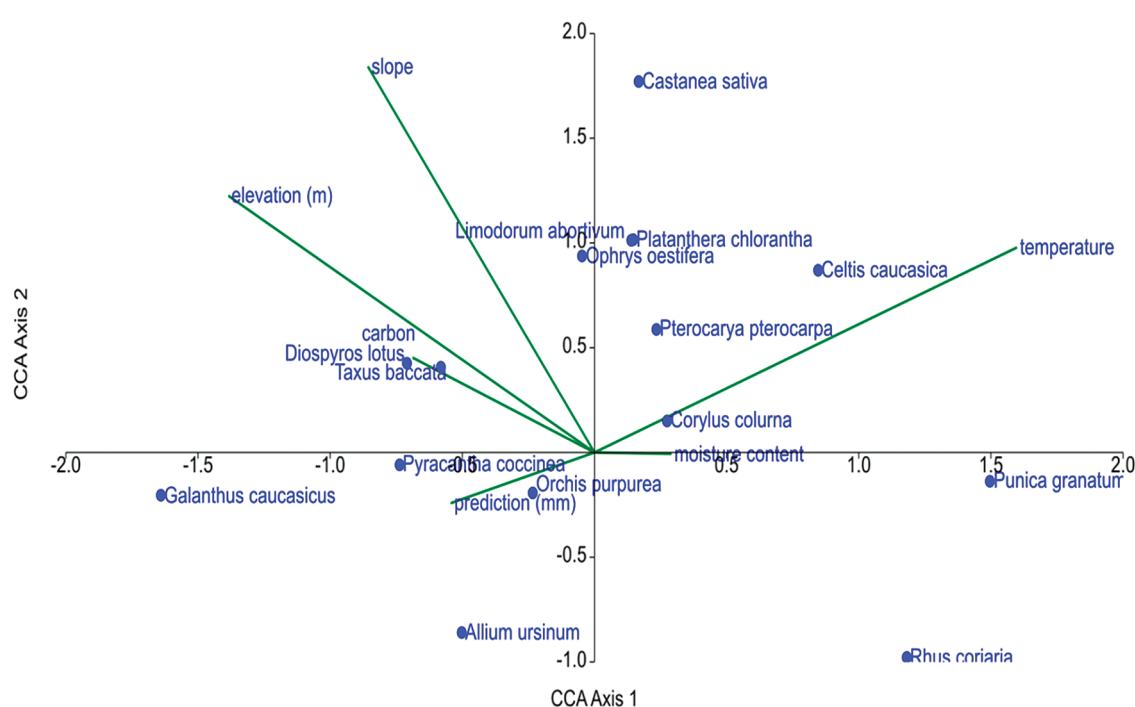


Fig. 4. Canonical correspondence analysis (CCA) ordination diagram relating plant species abundance to environmental variables along the recorded areas. The eigenvalues of axis 1 (horizontally) and axis 2 (vertically) are 0.82 and 0.81. The species are represented as blue circles with name of plant and the environmental variables represent as the centric green lines

Potential distribution of selected three threatened plant species

Out of the studied species, we selected the most threatened three species to research their present potential range in Qakh. They are the following: *Ophrys oestifera*, *Platanthera chlorantha*, and *Castanea sativa*. For *O. oestifera* and *Pl. chlorantha* has recorded only three populations with few individuals.

Before modeling, we compared the relative importance of all (19) environmental variables, to understand the climatic determinants (table 2, fig. 5). Then, we used the combinations of climatic responses that best predict the distribution of the species. These are Bio2, Bio4, Bio6, Bio7, Bio11, Bio12, Bio16, Bio17 and Bio18 for *Pl. chlorantha*, Bio2, Bio3, Bio4, Bio6, Bio7, Bio12, Bio13, Bio17, and Bio18 for *O. oestifera*, Bio2, Bio6, Bio7, Bio12, Bio15, Bio16, and Bio18 for *C. sativa*.

In the present study, the final SDM model obtained by the combination of various models had area under the curve (AUC) value of 0.99 for all studied plant species, showing that the model performed better in predicting the potential habitat area for the selected species.

All three plant species are currently distributed in the northern part of the Qakh district, however in recent years, *O. oestifera* also can be found in the areas of the central part. According to the analysis of the present habitat suitability, the model predicted the potential species distribution in the central part of the study area for *Pl. chlorantha* and *O. oestifera*. So it is possible to spread and optimal environmental conditions for *Pl. chlorantha* threatened plant species in the central part of the study region (fig. 6). The predicting map showed that under the present climatic conditions, about 200.2 km² of the total area of Qakh district is suitable for potential distribution by *Pl. chlorantha*, 311.9 km² by *O. oestifera*, 268.2 km² by *C. sativa* (table 3).

Table 2

Estimates of average contribution and permutation importance
of the environmental variables used the SDM modeling of study threatened plants

Platanthera chlorantha			Ophrys oestrifera			Castanea sativa		
Variable	Percent contribution	Permutation importance	Variable	Percent contribution	Permutation importance	Variable	Percent contribution	Permutation importance
Bio2	38.0	38.1	Bio2	38.1	21.1	Bio2	21.2	15
Bio4	0.4	0.1	Bio3	0.3	0.2	Bio6	15.8	13.1
Bio6	1.4	0.1	Bio4	4.7	8.1	Bio7	26.3	55.2
Bio7	0.4	0.2	Bio6	13.6	10	Bio12	33.3	7.2
Bio11	5.4	38	Bio7	0.1	0.1	Bio15	0.4	0.3
Bio12	30.2	0.5	Bio12	8.6	0.2	Bio16	2.2	9
Bio16	23.1	16.8	Bio13	21.4	59.1	Bio18	0.8	0.2
Bio17	0.3	0.1	Bio17	0.2	0.1			
Bio18	0.8	6.1	Bio18	13	1.1			

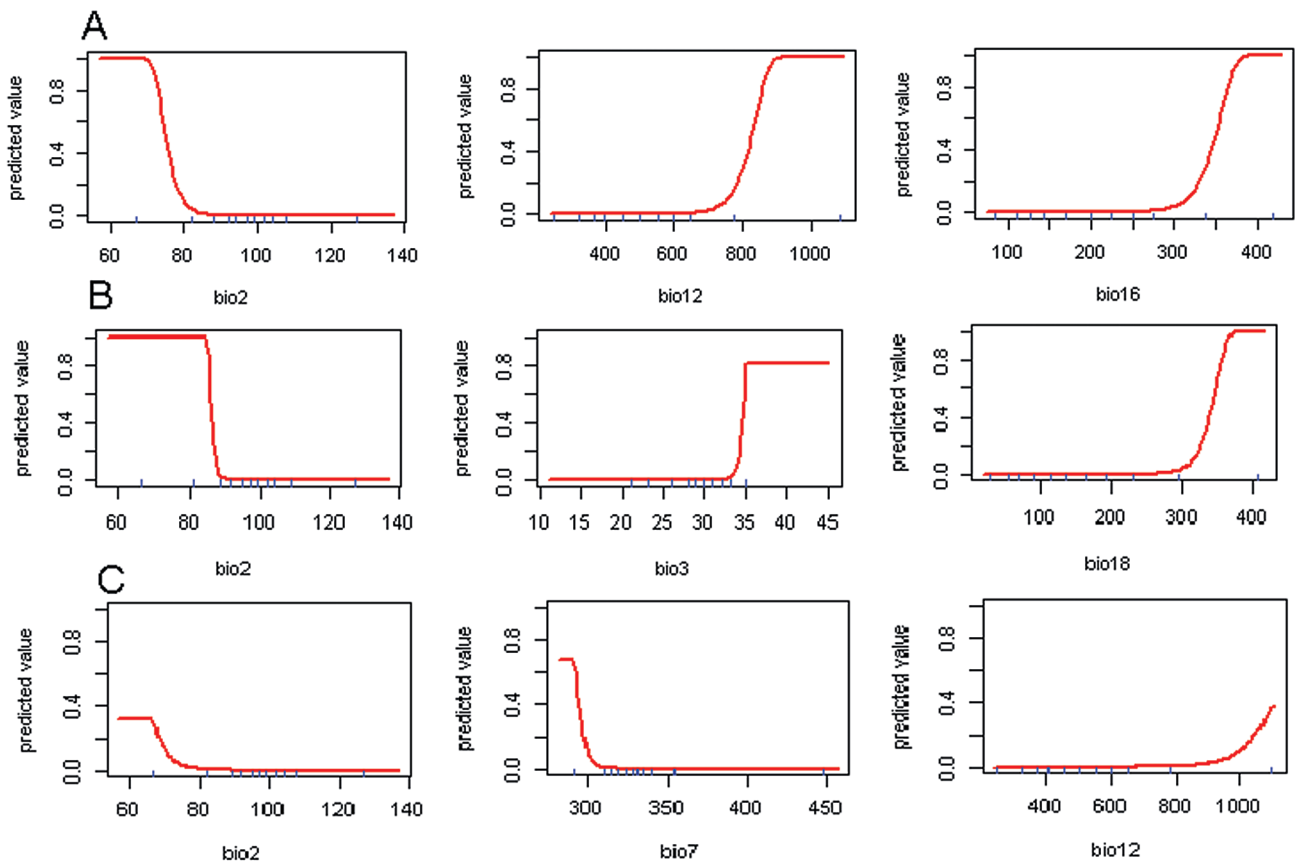


Fig. 5. The selected response curves (with higher values) of the logistic prediction of the distribution of *Platanthera chlorantha* (A), *Ophrys oestrifera* (B) and *Castanea sativa* (C) bioclimatic variables. The y axis shows the probability of presence expressed in logistic values, between 0–1

The present study, for the first time at a national scale, modelled the present distribution of *Ophrys oestrifera*, *Platanthera chlorantha*, and *Castanea sativa* using the SDM modelling approach. Based on the results of the model, it can be predicted that in the future these species can be found where they are shown on the forecast maps, in contrast to the distribution area in the present. The climate is recognized as the main factor affecting species occurrence. The present potential distribution of all studied species fits with the original occurrence records, thus showing that species distribution modeling methods are very helpful in predicting the suitable areas.

Table 3

Area in square kilometres (Km2) showing present suitable habitats in Qakh

Range	Habitat Suitability	Present area predicted in Azerbaijan, km ²		
		<i>Platanthera chlorantha</i>	<i>Ophrys oestrifera</i>	<i>Castanea sativa</i>
0.00-0.25	Not suitable	1293.8	1182.1	1225.8
0.25-0.50	Low suitable	60.3	76.4	64.8
0.50-0.75	Medium suitable	58.4	55.8	53.9
0.75-1.00	High suitable	81.5	179.7	149.5
0.25-1.00	Overall suitable	200.2	311.9	268.2

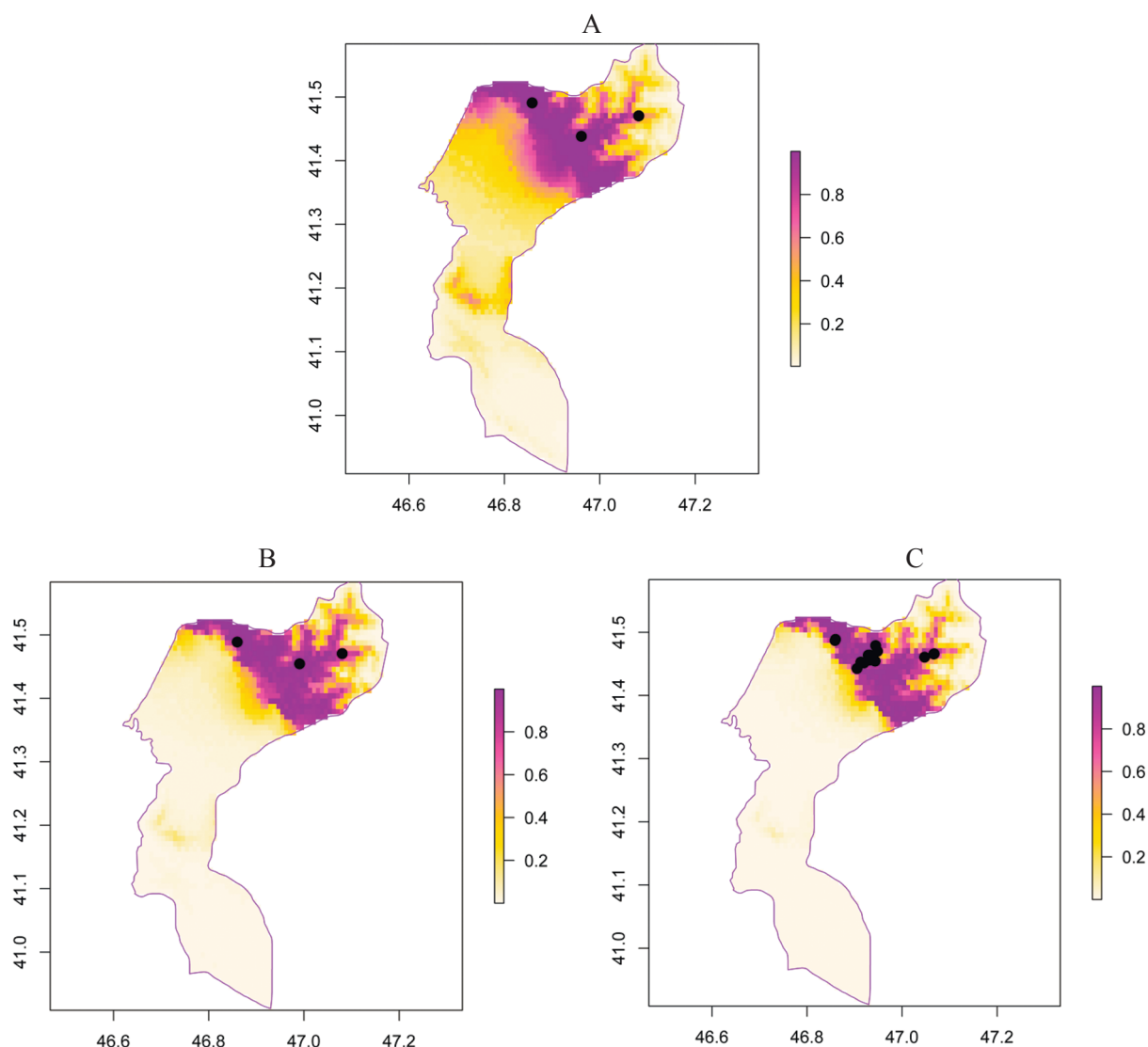


Fig. 6. The SDM maps showing the present potential distribution of *Platanthera chloranrantha*, *Ophrys oestrifera* and *Castanes sativa*. White = Not suitable, Yellow = Low suitable, Light purple = Medium suitable and Dark purple = High suitable.

Библиографические ссылки / References

1. Abdullayeva TA. Flora and its floristic analysis of the Ilisu State Reserve [dissertation]. Baku: [publisher unknown]; 1996. 164 p.
2. Ahmedova SZ. Vegetation of winter pastures of Jeyranchol and Ajinoure of Azerbaijan and its bioecological and agrophytocenotic features [PhD dissertation]. Baku: [publisher unknown]; 2008. 319 p.
3. Alizade VM, Mehdiyeva NP, Karimov VN, Ibrahimova AG. Plants of the Greater Caucasus (Editor Thomas Borsch). Baku: Red N Line; 2019. 352 p.

4. Askerov AM. Concept of the flora of Azerbaijan. Baku: Science; 2011. 204 p.
5. Atamov VV. Steppe vegetation of Azerbaijan [PhD dissertation]. Baku: [publisher unknown]; 1997. 163 p.
6. Couto HTZ. Métodos de inventário da biodiversidade de espécies arbóreas. ESALQ/FAPESP: Piracicaba, SP; 2005. p. 108.
7. Dadashova AG. Floristic study of vegetation cover of Gakh region. In: *Proceedings of the Institute of Botany of ANAS*. Baku: [publisher unknown]; 2013. Volume 33. 42–45 p.
8. Dadashova AG. Taxonomic, bioecological and biomorphological analysis of the flora of the central part of the Alazan-Ayrichay botanical-geographical region of Gakh region. In: *Proceedings of the Institute of Botany of ANAS*. Baku: [publisher unknown]; 2014. Volume 34. 95–100 p.
9. Dmitriyeva SI. Weed vegetation of the northwestern part of the Alazan-Avtaran valley (within Azerbaijan) and measures struggle with her [PhD dissertation]. Baku: [publisher unknown]; 1966. 29 p.
10. Flora of Azerbaijan Baku: AN Azerb. SSR; 1950–1961. Volume I–VIII.
11. Hajiyev VC. Ecosystem of the highland vegetation of Azerbaijan. Baku: Education; 2004. 130 p.
12. Hofmann S, Everaars J, Schweiger O, Frenzel M, Bannehr L, Cord AF. Modelling patterns of pollinator species richness and diversity using satellite image texture. *PLoS ONE*. 2017. 12(10):e0185591.
13. Ibadullaeva S, Alekperov R. Medicinal herbs (ethnobotany and phytotherapy). Baku: Education; 2013. 331 p.
14. Ibrahimov T. Natural Reserves of Azerbaijan. Baku: [publisher unknown]; 2015. 160 p.
15. Karimov VN. Boraginaceae of the Sheki-Zagatala region. [PhD dissertation]. Baku: [publisher unknown]; 2000. 168 p.
16. McDonald JH. Handbook of Biological Statistics (third edition). USA: Sparky house publishing; 2014. 299 p.
17. Mehdiyeva NP, Dadashova AG, Alizade VM. *Phalacroloma annuum* (Asteraceae), a new species for the flora of Azerbaijan. *Botanicheskii zhurnal*. 2017;102(5):689–692.
18. Mehdiyeva NP, Guliyev IS, Alizade VM, Alirzayeva ES, Bussmann RW. Baku: Ethnobotany of the Caucasus – Azerbaijan Springer; 2017. p. 37–46.
19. Musayev SH. *Poaceae* of Azerbaijan. Baku: Education; 1991. 420 p.
20. Mehdiyeva NP. Taxonomic and biomorphological analysis of medicinal plants of the Alazan-Agrichay valley. In: *Materials International Conference «Biomorphological research in modern botany»*. Vladivostok: [publisher unknown]; 2007. p. 300–303.
21. Oksanen J. Multivariate Analysis of Ecological Communities in R: vegan tutorial. Baku: [publisher unknown]; 2015. 43 p.
22. Palmer MW. Putting things in even better order: the advantages of canonical correspondence analysis. *Ecology, Ecological Society of America*. 1993. 74(8): 2215–2230.
23. Raimundo RA, Márcia B, Bull JW. Species Distributions, Quantum Theory, and the Enhancement of Biodiversity Measures. *Systematic Biology*. 2017;66 (3):453–462.
24. Red book of Azerbaijan. Rare and endangered plant and fungi species. Second edition., Baku: [publisher unknown]; 2013. 676 p.
25. Ricklefs RE. Ecology. 3rd edition. New York, NY: Freeman; 1990. 456 p.
26. Sankaya A, Örcü Ö. Prediction of potential and future distribution of Anatolian chesnut (*Castanea sativa* Mill.) by using Maximum entropy (Maxent) modeling depending on climate change in Turkey. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*. 2019; 9(4):699–708.
27. Solomon J, T. Shulkin & G. E. Schatz (editors) Red list of the Endemic Plants of the Caucasus: Armenia, Azerbaijan, Georgia, Iran, Russia and Turkey. Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden (MSB) 125. Missouri Botanical Garden Press: Saint Louis; 2013. p. 451.
28. The World Flora Online (WFO) [Internet]. [Cited 2019 October 16]. Available from: <http://www.worldfloraonline.org>.

Статья поступила в редколлегию 10.04.2020.
Received by editorial board 10.04.2020.

УДК 574.5(476)574.583

СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР НАРОЧЬ, МЯСТРО И БАТОРИНО

О. С. СМОЛЬСКАЯ¹⁾, А. А. ЖУКОВА¹⁾

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

Приведены результаты исследования растительных пигментов донных отложений озер Нарочанской группы (Нарочь, Мясстро и Баторино). Исследования на выбранных водоемах были направлены на выявление количественных изменений растительных пигментов в донных осадках по глубинам отбора проб. Показано, что с увеличением глубины станции наблюдается повышение влажности донных отложений и содержания в них органического вещества, но идет снижение плотности седиментов. Выявлено наличие положительной связи между содержанием суммарного хлорофилла и каротиноидов в донных отложениях и глубиной сбора образцов ($r=0,6$ для оз. Нарочь и $r=0,7$ для оз. Мясстро). Содержание суммарного хлорофилла-*a* (без поправки на присутствие феопигментов) было невысоким: в оз. Нарочь в среднем составило $16,5 \pm 18,2$ мкг/г, в оз. Мясстро – $6,4 \pm 6,2$ мкг/г, в оз. Баторино – $22,8 \pm 17,1$ мкг/г сухой массы донных отложений. Во всех пробах отмечалась высокая доля феопигментов – 60–100 % от суммарного содержания хлорофилла-*a* и его производных. Содержание каротиноидов было невысоким в озерах Нарочь и Мясстро (составив в среднем $3,3 \pm 4,5$ мкг/г и $3,6 \pm 4,1$ мкг/г сухой массы донных отложений соответственно), однако в оз. Баторино содержание данной группы растительных пигментов было аномально высоким – $35,8 \pm 26,6$ мкг/г сухой массы донных отложений.

Ключевые слова: хлорофилл; феопигменты; каротиноиды; донные отложения; органическое вещество.

THE CONTENTS OF PLANT PIGMENTS IN BOTTOM SEDIMENTS OF LAKES NAROCH, MYASTRO AND BATORINO

V. S. SMOLSKAYA^a, H. A. ZHUKAVA^a

^aBelarusian State University, 4 Nezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus
Corresponding author: sylimova_1991@mail.ru

The paper presents the results of the study of plant pigments in bottom sediments of the Narochansk lakes (Naroch, Myastro and Batorino). Studies at the selected sites were aimed at identifying quantitative changes in plant pigments content in sediments at various depths. It has been shown that with increasing depth of the lakes there is an increase in the moisture content of bottom sediments and the content of organic matter in them, but there is a decrease in the density of sediments. A positive relationship was found between the content of total chlorophyll and carotenoids calculated on the unit of dry matter of bottom sediments and the depths of sample collection ($r = 0.6$ for Lake Naroch and $r = 0.7$ for Lake Myastro). All samples showed a high proportion of pheopigments in total chlorophyll (60–100 %). The content of total chlorophyll-*a* (without correction for the presence of pheopigments) was low: in Lake Naroch averaged

Образец цитирования:

Смольская ОС, Жукова АА. Содержание растительных пигментов в донных отложениях озер Нарочь, Мясстро и Баторино. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2020;2:18–25.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-18-25>

For citation:

Smolskaya VS, Zhukava HA. The contents of plant pigments in bottom sediments of lakes Naroch, Myastro and Batorino. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2020;2:18–25. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-18-25>

Авторы:

Ольга Сергеевна Смольская – кандидат биологических наук; старший преподаватель кафедры зоологии биологического факультета.

Анна Анатольевна Жукова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры экологии и методики преподавания биологии биологического факультета.

Authors:

Volha S. Smolskaya, PhD (biology); senior lecturer at the department of zoology, faculty of biology.

sylimova_1991@mail.ru

Hanna A. Zhukava, PhD (biology), docent; associate professor at the department of ecology and methods of biology teaching, faculty of biology.

anna_eco@tut.by

($\pm$ SD) $16.5 \pm 18.2 \text{ } \mu\text{g/g}$ in Lake Myastro – $6.4 \pm 6.2 \text{ } \mu\text{g/g}$ and in Lake Batorino – $22.8 \pm 17.1 \text{ } \mu\text{g/g}$ of dry mass of bottom sediments. The content of carotenoids was relatively low in the lakes Naroch and Myastro (on average $3.3 \pm 4.5 \text{ } \mu\text{g/g}$ and $3.6 \pm 4.1 \text{ } \mu\text{g/g}$ of dry mass of bottom sediments, respectively), but in the Lake Batorino the content of this group of plant pigments was abnormally high – $35.8 \pm 26.6 \text{ } \mu\text{g/g}$ dry weight of bottom sediments.

Key words: chlorophyll; pheopigments; carotenoids; bottom sediments; organic matter.

Введение

В настоящее время единственным быстрым химическим методом, известным для оценки содержания растительной биомассы в водных экосистемах, является определение растительных пигментов – хлорофиллов и каротиноидов [1–4]. Хлорофилл – неотъемлемый элемент процессов синтеза органического вещества, каротиноиды в клетках растений выполняют светособирающую функцию и участвуют в фотозащите, поэтому пигментные характеристики донных отложений отражают интенсивность функционирования автотрофного блока в водной экосистеме в период, предшествующий изучению, дают представление о ее устойчивости и способности к самоочищению и могут служить индикаторами происходящих изменений [5].

Концентрация хлорофилла и продуктов его распада в донных отложениях в эвфотной зоне определяется функционированием комплекса микробентических водорослей и процессами седиментации хлорофиллсодержащей взвеси из водной толщи. В пелагической зоне определяющую роль играют процессы седиментации, отражающие сезонную динамику оседания и последующего разложения водорослей планктона, что было показано и для оз. Нарочь [6]. Таким образом, основными источниками пигментов в донных отложениях водоемов являются планктонные и бентические микроводоросли и фототрофные бактерии, а также макрофиты, пигменты которых сохраняются длительное время после того, как разлагаются их морфологические структуры [2].

Определяющей характеристикой состава седиментов является скорость осаждения органического биогенного материала, на которую оказывают влияние многие факторы, например, питание планктонных беспозвоночных и скорость осаждения клеток. Все эти особенности необходимо учитывать при изучении пигментного состава донных осадков [2].

Ввиду вышесказанного проведено исследование, в рамках которого было прослежено изменение пигментных и физико-химических показателей в поверхностном 5-сантиметровом слое донных отложений в различных участках акватории озера Нарочь, Мясстро и Баторино на современном этапе эволюции озерной экосистемы.

Материалы и методы исследования

Сбор материала проводили в середине лета (конец июня – начало августа в 2016–2018 гг.). Всего за 2016 г. в Малом и Большом плесах оз. Нарочь было отобрано 25 проб на 5 трансектах, направленных от берега к центру озера (маркированы индексом S) на глубинах от 1,5 до 7,4 м, в 2017 г. – 17 проб (N-станции) на 4 трансектах в акватории Большого плеса оз. Нарочь на глубинах от 1,9 до 8,0 м. Также в 2017 г. были отобраны пробы на 13 станциях (M-станции) по периферии оз. Мясстро на глубинах от 2,0 до 5,6 м. В 2018 г. – на 8 станциях (B-станции) оз. Баторино на глубинах от 0,5 до 2,5 м.

Пробы фитопланктона на глубоких станциях отбирали 1-метровым батометром тотально из всей толщи или из верхнего 2-метрового слоя, относящегося к фотосинтезирующей зоне, на мелководных участках – батометром Рутнера. Для отбора небольших колонок донных отложений использовали дночерпатель Uvites Corer. Пробы донных отложений на глубоких станциях отбирали вручную из верхнего 5-сантиметрового слоя. Пробы доставляли в лабораторию и незамедлительно приступали к их обработке.

Для экстракции пигментов из проб донных отложений использовали 90 %-ный ацетон, принятый в качестве растворителя во многих методиках [1; 3; 7]. Все этапы исследования проводили сразу же после сбора материала, так как задержка обработки проб может привести к их существенной дополнительной феофитинизации [8].

Собранные образцы грунта донных отложений перемешивали до однородной массы, из которой отбирали навеску для анализа содержания хлорофилла-а (суммарного, без поправки на присутствие в смеси других пигментов) и продуктов его разложения [9], а также каротиноидов [10]. Оставшуюся часть пробы использовали для определения плотности, влажности грунта и содержания в нем органического вещества. В зависимости от типа грунта исходная влажная масса исследованной навески колебалась от 2 до 11 г. Навеску грунта взвешивали на электронных весах (SPU 202, USA), помещали в пробирки и заливали 90 %-ным ацетоном, перемешивали и оставляли на несколько часов для экстракции в темном месте. Далее пробирки центрифугировали (SIGMA 1-6, Germany) дважды по 15 мин при 5000 об./мин, полученный экс-

тракт осторожно переносили в стеклянные пробирки, измерения на спектрофотометре проводили в 2-сантиметровых кварцевых кюветах.

Для определения содержания хлорофилла и феопигментов в общем экстракте использовали спектрофотометрический метод (приложение ADL Shell спектрофотометра *Cary 50*), который широко применяется для изучения продуктивности фитопланктона в разнотипных водных объектах [1; 9]. Одновременно с определением концентрации хлорофилла и его дериватов было рассчитано содержание каротиноидов по стандартной формуле [11]. Также в донных отложениях общепринятыми методами определяли плотность осадка естественной влажности (г/см^3), относительную влажность (отношение удаляемой при сушке воды к единице массы осадка естественной влажности, %), содержание золы (потери при прокаливании) после сжигания донных отложений в муфельной печи при температуре 450°C [12].

При обработке количественных данных использовали статистические методы с применением персонального компьютера и программных пакетов *Microsoft Excel* и *Statistica Trial 13*. В таблицах и по тексту приведены рассчитанные средние значения $\pm$ стандартное отклонение (SD). Для изучения взаимозависимости исследованных параметров проводили корреляционный анализ (r) по Пирсону, связь считали статистически значимой при $p < 0,05$ [13].

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование базовых физико-химических показателей донных отложений показало, что на мелко-водных участках оз. Нарочь (глубиной до 2 м) донные отложения представлены песком, который при погружении вглубь озера сменяется заиленным песком (около 3–4 м) и далее (на 6–8 м) – разного типа сапропелями. В оз. Мясро и оз. Баторино на исследованных станциях донные грунты также представлены заиленным песком и илами [14].

Анализ полученных данных показал, что с увеличением глубины отбора проб в оз. Нарочь возрастала относительная влажность седиментов (коэффициент корреляции $r=0,79$), снижалась их плотность ($r=-0,55$) и увеличивалось содержание органических веществ ($r=0,89$). В оз. Мясро также отмечено возрастание относительной влажности седиментов с увеличением глубины отбора ($r=0,85$), снижалась их плотность ($r=-0,83$) и увеличивалось содержание органических веществ ($r=0,87$). Для оз. Баторино поиск зависимости не проводили ввиду малой выборки и небольшого диапазона исследованных глубин.

Основные данные по содержанию растительных пигментов в донных отложениях и их распределение по глубинам отбора проб в оз. Нарочь приведены в табл. 1.

Таблица 1

Содержание растительных пигментов в донных отложениях оз. Нарочь в 2016 (S-станции) и 2017 (N-станции) гг.

Table 1

The content of plant pigments in the bottom sediments of Lake Naroch in 2016 (S-stations) and 2017 (N-stations)

Станция	Глубина станции, м	Плотность, г/см^3	Влажность, %	Содержание суммарного хлорофилла		Доля феопигментов в общем пуле, %	Содержание каротиноидов	
				в сырой массе донных отложений, мкг/г	в органическом веществе, мг/г		в сырой массе донных отложений, мкг/г	в органическом веществе, мг/г
S1	1,9	1,31	23,1	12,32	2,29	90,7	1,80	0,33
S3	3,1	1,27	74,8	11,42	1,05	94,9	0,55	0,05
S4	3,0	1,32	74,6	2,95	0,28	83,6	0,13	0,01
S7	6,6	1,18	86,0	9,03	0,41	≈ 100	1,51	0,07
S10	3,0	1,27	74,3	3,09	0,28	84,0	0,36	0,03
S11	2,5	1,30	37,9	16,96	1,05	89,0	1,98	0,12
S13	2,1	1,30	34,1	7,99	0,55	91,0	0,63	0,04
S14	2,2	1,29	34,9	8,25	0,51	≈ 100	0,56	0,03
S15	2,2	1,28	37,5	4,72	0,29	96,9	0,29	0,02

Окончание табл. 1

Ending table 1

Станция	Глубина станции, м	Плотность, г/см ³	Влажность, %	Содержание суммарного хлорофилла		Доля феопигментов в общем пуле, %	Содержание каротиноидов	
				в сырой массе донных отложений, мкг/г	в органическом веществе, мг/г		в сырой массе донных отложений, мкг/г	в органическом веществе, мг/г
S16	1,5	1,33	28,9	4,19	0,98	89,5	0,33	0,08
S17	4,6	1,25	78,1	2,23	0,16	≈100	0,12	0,01
S19	1,6	1,33	25,5	9,37	1,80	94,3	0,73	0,14
S20	1,6	1,36	23,3	1,57	0,51	93,5	0,09	0,03
S21	1,7	1,33	27,1	4,76	1,09	81,4	0,42	0,10
S22	2,1	1,36	37,4	3,73	0,25	98,4	0,22	0,01
S23	2,4	1,29	60,0	9,48	0,59	89,4	0,70	0,04
S24	3,0	1,27	75,8	5,59	0,52	88,7	0,24	0,02
S25	2,6	1,49	58,3	0,93	0,05	≈100	0,28	0,02
S26	3,8	1,39	79,8	3,06	0,22	85,2	0,26	0,02
S27	4,5	1,25	73,0	4,10	0,27	76,9	0,07	0,00
S28	7,0	1,12	92,1	1,98	0,14	99,3	0,02	0,00
S29	7,4	1,07	95,4	4,07	0,35	96,3	0,30	0,03
N1	2,0	2,04	30,1	0,80	0,12	≈100	1,41	0,22
N2	3,5	1,26	74,8	1,27	0,11	86,1	0,70	0,06
N3	5,1	1,05	80,1	1,36	0,06	95,2	0,29	0,01
N4	7,5	1,14	91,5	1,23	0,07	84,2	0,46	0,03
N5	2,2	2,17	32,4	1,20	0,19	62,4	0,37	0,06
N6	4,3	1,07	71,0	0,63	0,04	≈100	0,50	0,03
N7	6,2	1,08	82,5	3,63	0,49	≈100	2,06	0,28
N8	8,0	1,06	89,4	2,65	0,11	≈100	1,48	0,06
N9	3,0	1,22	73,6	0,44	0,04	97,4	0,57	0,05
N10	4,0	1,08	73,7	1,40	0,08	≈100	0,30	0,02
N11	5,5	1,04	76,1	2,30	0,10	≈100	1,26	0,06
N12	6,8	1,10	87,5	6,73	0,27	≈100	2,82	0,11
N13	3,0	1,26	71,6	0,57	0,04	89,5	0,40	0,03
N14	2,0	1,06	80,1	1,15	0,08	≈100	0,62	0,04
N15	4,0	1,06	82,0	1,56	0,09	≈100	1,27	0,07
N16	5,0	1,08	87,4	2,77	0,11	≈100	0,76	0,03
N17	8,0	1,05	89,8	2,33	0,09	≈100	0,37	0,01

Доля феопигментов была достаточно высокой во всех пробах, что типично для донных отложений на средних и больших глубинах озер. Данный показатель изменялся от 62 до практически 100 %. Для удельного содержания феопигментов в составе суммарного хлорофилла-*a* (без поправки на присутствие феопигментов) на исследованных станциях не выявлено зависимости от глубины отбора образцов.

В образцах донных отложений оз. Нарочь содержание хлорофилла и продуктов его распада было невысоким и составило в среднем $4,2 \pm 3,7$ мкг/г сырой массы, при колебаниях от 0,4 до 17 мкг/г. Содержание каротиноидов за период исследования составило в среднем $0,69 \pm 0,64$ мкг/г сырой массы донных отложений, при колебаниях от 0,02 до 2,82 мкг/г. Проанализировав изменения содержания хлорофилла-*a* и каротиноидов, можно сделать вывод об отсутствии связи между этими показателями ($r = -0,2$). Содержание суммарного хлорофилла-*a* (без поправки на присутствие феопигментов) при пересчете на сухую массу донных отложений составило $16,5 \pm 18,1$ мкг/г.

Выявлено наличие положительной связи (рис. 1 *a*) между содержанием суммарного хлорофилла в расчете на сухое вещество донных отложений и глубинами сбора образцов ($r = 0,6$). Содержание каротиноидов при пересчете на сухую массу донных отложений составило $3,25 \pm 4,54$ мкг/г. Также обнаружено возрастание содержания каротиноидов (рис. 1 *б*) в расчете на сухое вещество донных отложений с увеличением глубины их отбора ($r = 0,6$).

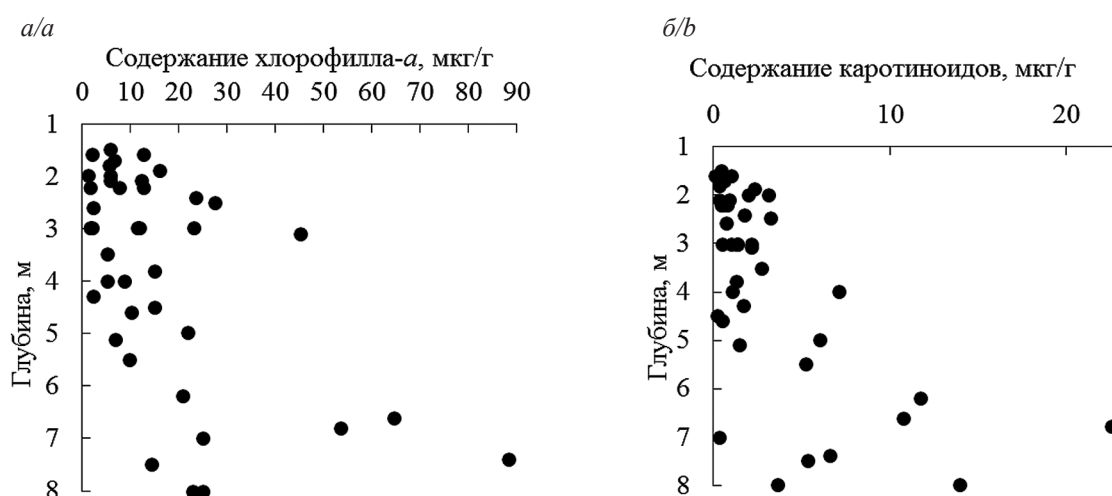


Рис. 1. Распределение содержания суммарного хлорофилла (*a*) и каротиноидов (*б*) в сухой массе донных отложений по глубинам сбора проб в оз. Нарочь

Fig. 1. Distribution of total chlorophyll (*a*) and carotenoids (*b*) content in the dry mass of bottom sediments by the sampling depths in Lake Naroch

Отношение каротиноидов к хлорофиллу в сухой массе донных отложений в озере Нарочь колебалось от 0,01 до 1,76, составив в среднем $0,30 \pm 0,37$.

Распределение растительных пигментов в донных отложениях по глубинам на 13 станциях в оз. Мясро представлено в табл. 2. Доля феопигментов была в среднем чуть ниже, чем в оз. Нарочь и составила около 90 %, изменяясь в диапазоне от 59 % до практически 100 % [15].

Для оз. Мясро содержание суммарного хлорофилла (без поправки на присутствие феопигментов) колебалось от 0,25 до 5,3 мкг/г, составив в среднем $1,8 \pm 1,3$ мкг/г в сырой массе донных отложений. Содержание каротиноидов составило за период исследования $0,95 \pm 0,89$ мкг/г сырой массы донных отложений. Проанализировав изменения содержания суммарного хлорофилла-*a* и каротиноидов по глубинам, можно сделать вывод о наличии слабой связи между этими показателями ($r = 0,4$). Содержание суммарного хлорофилла-*a* при пересчете на сухую массу донных отложений составило $6,4 \pm 6,2$ мкг/г, при колебаниях от 1,1 до 22,6 мкг/г. Выявлена положительная корреляция (рис. 2 *a*) содержания суммарного хлорофилла в расчете на сухую массу донных отложений от глубины отбора проб ($r = 0,7$).

Содержание каротиноидов при пересчете на сухую массу донных отложений составило $3,57 \pm 4,11$ мкг/г, что очень схоже с данными по оз. Нарочь. Выявлено наличие положительной связи ($r = 0,7$), как и в случае с содержанием суммарного хлорофилла, между содержанием каротиноидов в расчете на сухое вещество донных отложений и глубинами отбора проб (рис. 2 *б*). Содержание хлорофилла в органическом веществе в оз. Мясро составило $0,15 \pm 0,11$ мг/г, а содержание каротиноидов в органическом веществе было в разы больше – $1,51 \pm 2,49$ мг/г (табл. 2).

На исследованных станциях оз. Баторино в 2018 г. были определены основные физико-химические свойства донных отложений, а также пигментные показатели, представленные в табл. 3.

Таблица 2

Содержание растительных пигментов в донных отложениях оз. Мястро в 2017 г. (М-станции)

Table 2

The content of plant pigments in the bottom sediments of Lake Myastro in 2017 (M-stations)

Станция	Глубина станции, м	Плотность, г/см ³	Влажность, %	Содержание суммарного хлорофилла		Доля феопигментов в общем пуле, %	Содержание каротиноидов	
				в сырой массе донных отложений, мкг/г	в органическом веществе, мг/г		в сырой массе донных отложений, мкг/г	в органическом веществе, мг/г
M1	3,1	1,19	70,9	1,50	0,10	83,3	0,86	3,06
M2	4,7	1,11	76,6	5,30	0,31	99,8	3,42	4,73
M3	5,6	1,11	81,6	2,18	0,11	≈100	1,56	7,78
M4	2,0	2,03	26,3	0,81	0,16	73,2	0,24	0,20
M5	4,2	1,15	74,4	0,45	0,02	97,4	0,31	5,56
M6	2,3	1,89	32,0	1,85	0,31	92,3	0,68	0,32
M7	3,6	1,12	76,0	1,40	0,10	≈100	0,48	2,10
M8	4,5	1,12	77,1	1,46	0,08	≈100	1,17	6,11
M9	2,0	1,88	31,9	0,80	0,13	88,9	0,30	0,34
M10	4,6	1,07	75,2	1,57	0,08	76,0	0,57	2,71
M11	3,0	1,04	81,4	0,25	0,01	59,2	0,03	1,12
M12	1,9	2,03	29,9	2,50	0,38	≈100	1,54	0,57
M13	4,5	1,09	79,2	2,65	0,17	≈100	1,17	3,27

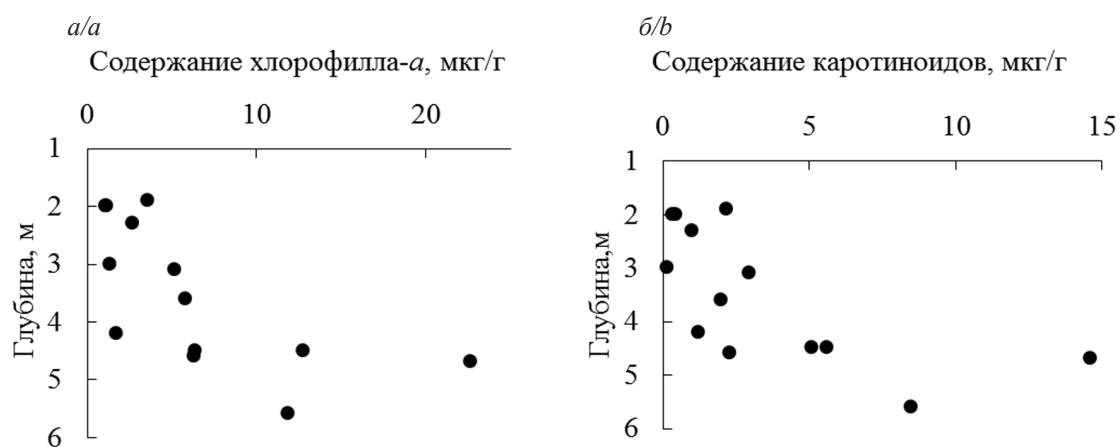


Рис. 2. Распределение содержания суммарного хлорофилла-а (а) и каротиноидов (б) в сухой массе донных отложений по глубинам сбора проб в оз. Мястро

Fig. 2. Distribution of total chlorophyll-a (a) and carotenoids (b) in the dry mass of bottom sediments by the sampling depths in Lake Myastro

Таблица 3

Содержание растительных пигментов в донных отложениях оз. Баторино в 2018 г. (В-станции)

Table 3

The content of plant pigments in the bottom sediments of Lake Batorino in 2018 (B-stations)

Станция	Глубина станции, м	Плотность, г/см ³	Влажность, %	Содержание суммарного хлорофилла		Доля феопигментов в общем пуле, %	Содержание каротиноидов	
				в сырой массе донных отложений, мкг/г	в органическом веществе, мг/г		в сырой массе донных отложений, мкг/г	в органическом веществе, мг/г
B1	1,5-2,5	1,14	80,8	3,78	0,83	94,4	4,10	0,90
B2	1,5-2,5	1,12	85,3	6,23	1,20	91,9	10,53	2,03
B3	1,7	1,63	20,3	2,31	0,71	86,6	4,15	1,27
B4	1,7	1,08	94,5	2,56	3,85	89,3	2,92	4,38
B5	1,5	1,66	34,6	1,23	0,32	98,2	1,74	0,46
B6	1,5-2,5	1,08	88,9	2,33	1,02	87,8	7,12	3,13
B7	0,4-0,6	1,20	77,6	2,77	0,46	96,2	4,84	0,80
B8	1,6	1,08	92,4	2,69	2,46	86,8	3,57	3,26

Относительная влажность донных отложений колебалась в широких пределах от 20,3 до 94,5 %, большой размах колебаний отмечен также по плотности донных грунтов – от 1,08 до 1,66 г/см³, содержание органического вещества в сухой массе донных отложений изменялось от 0,58 до 3,53 %. Проанализировав изменения физико-химических свойств донных отложений по глубинам на исследованных станциях оз. Баторино, можно сделать вывод об отсутствии связи между этими показателями, что, вероятнее всего, было следствием малой выборки.

На исследованных станциях в донных грунтах оз. Баторино содержание суммарного хлорофилла было невысоким, составив $3,0 \pm 1,4$ мкг/г сырой массы донных отложений, и колебалось от 1,2 до 6,2 мкг/г (в пересчете на сухую массу донных отложений составив $22,8 \pm 17,1$ мкг/г). Доля феопигментов в суммарном пуле была достаточно высокой – $91,4 \pm 4,4\%$ (табл. 3). Содержание каротиноидов в сухой массе донных отложений было также высоким и составило $35,8 \pm 26,6$ мкг/г. Соотношение содержания каротиноидов к хлорофиллу в донных грунтах оз. Баторино было наивысшим по сравнению с другими исследованными озерами, изменяясь от 1,08 до 3,06.

Заключение

В исследованных пробах донных отложений в озерах Нарочь, Мясро и Баторино были изучены концентрации хлорофилла-а и его дериватов и каротиноидов. Во всех образцах в суммарном хлорофилле преобладали феопигменты (достигая 100 %), что свидетельствовало о деструкции хлорофилла-а и снижении количества в фитопланктоне жизнеспособных активных клеток. Содержание суммарного хлорофилла было невысоким в оз. Нарочь, составляя $4,2 \pm 3,7$ мкг/г, в оз. Мясро и оз. Баторино – $1,8 \pm 1,3$ и $3,0 \pm 1,4$ мкг/г сырой массы донных отложений (или $16,5 \pm 18,2$, $6,4 \pm 6,2$ мкг/г и $22,8 \pm 17,1$ мкг/г сухой массы донных отложений соответственно).

Содержание каротиноидов было невысоким в озерах Нарочь и Мясро ($3,3 \pm 4,5$ и $3,6 \pm 4,1$ мкг/г сухой массы донных отложений), однако в оз. Баторино содержание данной группы растительных пигментов оказалось на порядок выше – $35,8 \pm 26,6$ мкг/г сухой массы донных отложений.

Связь между глубиной станции отбора поверхностного слоя донных отложений и удельным содержанием хлорофилла на сырое вещество в общем экстракте пигментов в исследованном диапазоне глубин отсутствовала. Однако с глубиной сбора образцов отмечено закономерное увеличение суммарного хлорофилла-а и каротиноидов в пересчете на сухую массу донных отложений.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 17.1.04.02.90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла-а. Москва: [б. и.]; 2009.
2. Leavitt PR, Hodgson DA. Sedimentary Pigments. In: Smol JP, Birks HJ, Last WM, editors. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2006. p. 295–325. DOI: 10.1007/0-306-47668-1_15.
3. Ritchie RJ. Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls a, b, c, and d and total chlorophylls in natural assemblages of photosynthetic organism using acetone, methanol, or ethanol solvents. *Photosynthetica*. 2008;46(1):115–126.
4. Swain EB. Measurement and interpretation of sedimentary pigments. *Freshwater Biology*. 1985;15:53–75.
5. Cyr H. How does the vertical distribution of chlorophyll vary in littoral sediments of small lakes? *Freshwat. Biol.* 1988;40:25.
6. Жукова АА. Оценка значимости различных автотрофных компонентов в формировании продуктивности мезотрофного озера [диссертация]. Минск: БГУ; 2007. 218 с.
7. Nayek S, Choudhury Imranul H, Jaishee N, Roy S. Spectrophotometric Analysis of Chlorophylls and Carotenoids from Commonly Grown Fern Species by Using Various Extracting Solvents. *Research Journal of Chemical Sciences*. 2014;4(9):63–69.
8. Смольская ОС, Жукова АА. Спектральные пигментные индексы фитопланктона в разнотипных водных объектах Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2018;1:113–123.
9. Lorenzen CJ. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnology Oceanography*. 1967;12:343–346.
10. Strickland JDH. & Parsons TR. A practical handbook of seawater analysis. Ottawa: Fisheries Research Board of Canada, *Bulletin* 167; 1968. p. 185–196.
11. Винберг ГГ. *Первичная продукция водоемов*. Минск: [б.и.]; 1960.
12. Жукова АА. Продукционно-деструкционные показатели микрофитобентоса оз. Нарочь. В: *Актуальные проблемы экологии и окружающей среды. Татищевские чтения : актуальные проблемы науки и практики : материалы 7 Международной научно-практической конференции*. Тольятти [б.н.]; 2010. с. 50–57.
13. Мاستицкий СЭ. Методическое пособие по использованию программы STATISTICA при обработке данных биологических исследований. Минск: [б. и.]; 2009.
14. Смольская ОС., Жукова АА., Люля АС. Пигментные и физико-химические характеристики донных отложений озер Нарочь и Мясстро. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2018;2:65–77.
15. Смольская ОС. Оценка содержания хлорофилла и продуктов его распада в донных отложениях озер Нарочь и Мясстро. В: *Клеточная биология и биотехнология растений: тезисы докладов II Международной научно-практической конференции*, Минск: БГУ; 2018. с. 44.

References

1. GOST 17.1.04.02.90. *Voda. Metodika spektrofotometricheskogo opredeleniya khlorofilla-a* [Water. The method of spectrophotometric determination of chlorophyll-a]. M.: 2009. Russian.
2. Leavitt PR, Hodgson DA. Sedimentary Pigments. In: Smol JP, Birks HJ, Last WM, editors. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2006. p. 295–325. DOI: 10.1007/0-306-47668-1_15.
3. Ritchie RJ. Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls a, b, c, and d and total chlorophylls in natural assemblages of photosynthetic organism using acetone, methanol, or ethanol solvents. *Photosynthetica*. 2008;46(1):115–126.
4. Swain EB. Measurement and interpretation of sedimentary pigments. *Freshwat. Biol.* 1985;15:53–75.
5. Cyr H. How does the vertical distribution of chlorophyll vary in littoral sediments of small lakes? *Freshwat. Biol.* 1988; 40:25.
6. Zhukova AA. *Otsenka znachimosti razlichnykh avtotrofnikh komponentov v formirovanii produktivnosti mezotrofnogo ozero* [Assessment of the importance of various autotrophic components in the formation of the productivity of a mesotrophic lake] [dissertation]. Minsk: BSU; 2007. 218 p. Russian.
7. Nayek S, Choudhury Imranul H, Jaishee N, Roy S. Spinectrophotometric Analysis of Chlorophylls and Carotenoids from Commonly Grown Fern Species by Using Various Extracting Solvents. *Research Journal of Chemical Sciences*. 2014;4(9):63–69.
8. Smolskaya VS, Zhukova AA. *Spektral'nyye pigmentnyye indeksy fitoplanktona v raznotipnykh vodnykh ob'yektakh Belarusi* [Spectral pigment indices of phytoplankton in various water bodies of Belarus]. *Journal of the Belarusian State University. Ekologiya*. 2018;1:113–123. Russian.
9. Lorenzen CJ. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnology Oceanography*. 1967;12. p. 343–346.
10. Strickland JDH. & Parsons TR. A practical handbook of seawater analysis. Ottawa: Fisheries Research Board of Canada, *Bulletin* 167; 1968. p. 185–196.
11. Vinberg GG. *Pervichnaya produktsiya vodoyemov* [Primary production of reservoirs]. Minsk: [publisher unknown]; 1960. Russian.
12. Zhukova AA. *Produktsionno-destruktsionnyye pokazateli mikrofitobentosa oz. Naroch'* [Production and destruction indicators of microphytobenthos oz. Naroch]. In: *Aktual'nyye problemy ekologii i okruzhayushchey sredy : Tatishchevskiy chteniye : aktual'nyye problemy nauki i praktiki : materialy 7 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Toliatti: [publisher unknown]; 2010. p. 50–57. Russian.
13. Mastitskiy SE. *Metodicheskoye posobiye po ispol'zovaniyu programmy STATISTICA pri obrabotke dannykh biologicheskikh issledovaniy* [Methodological manual on the use of the STATISTICA program in the processing of biological research data]. Minsk; 2009. Russian.
14. Smolskaya VS, Zhukova AA, Lyulya AS. *Pigmentnyye i fiziko-khimicheskiye kharakteristiki donnykh otlozheniy ozer Naroch' i Myastro* [Pigment and physico-chemical characteristics of bottom sediments of the lakes Naroch and Myastro]. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2018;2:65–77. Russian.
15. Smolskaya VS. *Otsenka soderzhaniya khlorofilla i produktov yego raspada v donnykh otlozheniyakh ozer Naroch' i Myastro* [Assessment of the content of chlorophyll and its decay products in the bottom sediments of the lakes Naroch and Miastro]. In: *Kletochnaya biologiya i biotekhnologiya rasteniy: tezisy dokladov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Minsk: BGU; 2018. p. 44. Russian.

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 319.16:504

СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА РАДИОЭКОЛОГИИ И СИСТЕМА РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

М. Г. ГЕРМЕНЧУК¹⁾

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

Представлена современная парадигма радиоэкологии, которая рассматривает человека и окружающую среду как равноправные объекты радиационной защиты и определяет биосферу в качестве деятельной силы, влияющей на радиационную безопасность. Система радиационного мониторинга окружающей среды как система в строгом математическом смысле подчиняется общесистемным законам, имеет свои основные цели и свойства, а также является типологически неоднородной, динамической, открытой, иерархической, многоуровневой и обладает обратными связями. В исследовании представлены строгие определения эффективности системы радиационного мониторинга окружающей среды в терминах лингвистического и теоретико-множественного подходов. Показано, что необходимо дальнейшее ее изучение для создания целостного описания системы и прогноза поведения в различных типах ситуаций облучения, что актуально в условиях ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС.

Ключевые слова: парадигма радиоэкологии; радиационная безопасность; Белорусская АЭС; катастрофа на Чернобыльской АЭС; ситуации облучения; свойства системы радиационного мониторинга окружающей среды; типологическая неоднородность системы.

Образец цитирования:

Герменчук МГ. Современная парадигма радиоэкологии и система радиационного мониторинга окружающей среды. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:26–35.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-26-35>

For citation:

Germenchuk MG. Modern paradigm of radioecology and environmental radiation monitoring system. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:26–35. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-26-35>

Авторы:

Мария Григорьевна Герменчук – кандидат технических наук, доцент; заместитель директора по научной работе.

Authors:

Maria G. Germenchuk, PhD (engineering), docent; deputy director research.
margermen@gmail.com

MODERN PARADIGM OF RADIOECOLOGY AND ENVIRONMENTAL RADIATION MONITORING SYSTEM

M. G. GERMENCHUK^a

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

The article presents the modern paradigm of radioecology, which considers people and the environment as equal objects of radiation protection and defines the biosphere as an active force affecting radiation safety. Using the result of environmental radiation monitoring in the Republic of Belarus after the Chernobyl disaster, it was shown that the environmental radiation monitoring system, as a mathematical system, obeys system-wide laws, has its main system goals and properties and is typologically heterogeneous, dynamic, open, hierarchical, multi-level and has feedbacks. The article presents rigorous definitions of the effectiveness of the environmental radiation monitoring system in terms of linguistic and set-theoretic approaches. This implies that further research is needed to create a holistic description of the system and a forecast of its behavior in various types of exposure situations, which is relevant in the context of commissioning of the Belarusian NPP.

Key words: paradigm of radioecology; radiation safety; Belarusian NPP; disaster at the Chernobyl NPP; exposure situations; properties of the radiation monitoring system of the environment; typological heterogeneity of the system.

Введение

В первой четверти XXI в. проблемы обеспечения радиационной безопасности человека и биосферы относятся к основным угрозам и рискам, угрожающим человечеству. Повсеместное развитие и применение ядерных технологий, а также последствия глобального радиоактивного загрязнения биосферы после испытаний ядерного оружия в окружающей среде, аварий на радиационно-опасных промышленных объектах и, наконец, катастроф на Чернобыльской и Фукусимской АЭС обусловили высокий уровень радиационной опасности и уязвимости настоящих и будущих поколений людей, а также биосферы в целом. Более того, дальнейшее развитие ядерных технологий и атомной энергетики, в том числе строительство первой атомной электростанции (далее – АЭС) в Республике Беларусь, усиливают действующие и потенциальные угрозы и риски в сфере радиационной безопасности [1].

Современное общество нуждается в защите от этих угроз и рисков, реализуемых через систему радиационной безопасности человека и окружающей среды, как это предусматривает новая редакция Закона Республики Беларусь «О радиационной безопасности» [2].

Для обеспечения радиационной безопасности на социально-приемлемом уровне государство и общество должны иметь эффективные механизмы управления рисками для их предотвращения или последующей минимизации, основанные на информации об оценке и прогнозе радиационной обстановки, дозовых нагрузках на человека и доказательствах защищенности объектов окружающей среды. Таким образом, радиационный мониторинг окружающей среды является необходимой частью таких механизмов.

Развитие радиоэкологии как науки во всем мире и в Республике Беларусь (особенно после катастрофы на Чернобыльской АЭС) позволило получить эмпирический материал, который является основой для изучения взаимодействия ионизирующего излучения (далее – ИИ) с веществом, оценки и прогнозирования радиационной обстановки в окружающей среде, а также текущих и прогнозных дозовых нагрузок на человека в условиях известных угроз и рисков [3; 4].

В практике обеспечения радиационной безопасности радиационный мониторинг окружающей среды по умолчанию уже определен как система, которая имеет генеральные цели, внешнюю и внутреннюю среду, а также входит во внешние надсистемы, например, радиационной безопасности или национальную систему мониторинга окружающей среды. Отметим, что, согласно общей теории систем (далее – ОТС), радиационная безопасность человека и биосферы выступает в качестве проблемосодержащей области в качестве внешней среды системы – угрозы, риски и информационные потребности общества в сфере радиационной безопасности, в качестве внутренней среды – системы измерений: приборы и оборудование, база данных, расчетные модели и т. д.

Анализ состояния радиационной безопасности в Республике Беларусь показывает, что к известным действующим угрозам и рискам относятся радиоактивное загрязнение окружающей среды после катастрофы на Чернобыльской АЭС, 4 АЭС вдоль границ, а также Белорусская АЭС [1]. Кроме того, по данным Департамента по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, по состоянию на 31 декабря 2019 г. в стране зарегистрированы 22932 источника ИИ (далее – ИИИ).

К потенциальным угрозам и рискам следует отнести актуальные угрозы ядерного (радиологического) терроризма, несанкционированное перемещение ИИИ и ядерных материалов, трансграничное

радиоактивное загрязнение, а также утерянные ИИИ. Отметим, что принятая ранее в прошлом столетии парадигма так называемой «сельскохозяйственной» радиоэкологии уже не соответствует современным научным и практическим потребностям в сфере обеспечения радиационной безопасности [5].

Таким образом, на современном этапе обеспечения радиационной безопасности при описании радиационного мониторинга как системы возникает методологическая проблема, которая в настоящее время не имеет удовлетворительного научного разрешения.

Суть проблемы заключается в том, что в отсутствие целостного строгого описания радиационного мониторинга как системы невозможно дать научно обоснованное заключение о том, что радиационная безопасность человека и биосферы будет обеспечена на социально-приемлемом уровне в различных ситуациях облучения и радиоактивного загрязнения окружающей среды с учетом действующих и потенциальных рисков и угроз.

Важно отметить, что категории рисков, угроз и информационных потребностей органов государственного управления в сфере радиационной безопасности, критической инфраструктуры государства, научной общественности, СМИ и населения имеют социальную природу и типологически отличаются от научно-технической части мониторинга, что затрудняет или делает невозможным целостное описание системы и прогноз ее поведения с использованием традиционных методов.

Это связано с тем, что, как правило, радиационный мониторинг рассматривается в качестве научно-технической системы, которая включает в себя приборы и оборудование, системы сбора и передачи информации и т. д. По результатам функционирования научно-технической системы формируются базы эмпирических данных, которые в дальнейшем используются для оценки и прогнозирования радиационной обстановки, иными словами, в системе действуют прямые связи «снизу вверх»: «наблюдения» → «оценка и прогноз».

Однако анализ и обобщение практического опыта в сфере обеспечения радиационной безопасности, в том числе негативного, требует, чтобы для обеспечения ожидаемой эффективности радиационного мониторинга существовали не только прямые связи «снизу вверх», но и обратные – «сверху вниз»: «угрозы и риски» → «информационные потребности» ↔ «оценка и прогноз» ↔ «наблюдения» (рис.). Это означает, что в случае, если система в текущем периоде не обеспечивает достижения своих целей, как это произошло в 1986 г. во время катастрофы на Чернобыльской АЭС, обратные связи, которые в том числе имеют социальные аспекты, должны привести систему в такое состояние, когда полностью удовлетворены информационные потребности общества для обеспечения радиационной безопасности и система станет эффективной.

Для разрешения этой научной проблемы необходимо разработать единый методологический подход, который позволит установить связи между внешней и внутренней средой системы радиационного мониторинга, ее техническими и социальными аспектами и предоставит научно обоснованные методы для оценки и прогнозирования ее состояния и эффективности в различных условиях с учетом типологической сложности (неоднородности).

Изучая процессы обеспечения радиационной безопасности на социально-приемлемом уровне, необходимо учитывать, что для современной стадии ускоренных социальных изменений характерны неупорядоченность, неустойчивость, разнообразие, неравновесность, нелинейность и темпоральность [6].

Цель исследования: представить современную парадигму радиоэкологии и обосновать применение принципов общесистемных изоморфизмов для целостного описания системы радиационного мониторинга окружающей среды.

В статье изучены и описаны общие свойства радиационного мониторинга как системы в строгом математическом смысле, а также дано определение эффективности системы.

Материалы и методы исследования

Основные методологические подходы. Первый из этих подходов (эмпирический) включает анализ и обобщение практического опыта использования системы радиационного мониторинга для обеспечения радиационной безопасности и предоставляет решения для конкретных ситуаций облучения и базируется на индуктивном методе. Второй (теоретический) с использованием гипотетико-дедуктивного метода позволяет рассматривать и описывать радиационный мониторинг как систему в строгом смысле, с ее свойствами и характеристиками, дает оценку и прогноз ее состояния и поведения.

Для описания радиационного мониторинга окружающей среды как целостной системы представляется эффективным использовать основные принципы научного познания: детерминизма, соответствия и дополнительности, а также принцип общесистемных изоморфизмов, индуктивный и гипотетико-дедуктивный, логико-исторический подходы и методы, применяемые в математической логике, ОТС в системном и теоретико-множественном анализе.



Модель внешней и внутренней среды системы радиационного мониторинга окружающей среды

Model of the external and internal conditions of the system of the environmental radiation monitoring

Принцип детерминизма. Исходя из этого принципа, в его современном понимании сформулирована в общем виде основная гипотеза исследования. Ее содержание составляет наличие объективно существующих, но не формализованных в строгой форме, существенных связей между типологически неоднородными объектами системы радиационного мониторинга. Эти связи определяют поведение системы во времени и в фазовом пространстве решений (состояний), важных для радиационной безопасности.

Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что для системы радиационного мониторинга большое значение имеют неопределенности, связанные со статистическим (случайным) характером поведения внешней среды, ее неупорядоченностью, неустойчивостью и нелинейностью. Это означает, что правильные решения в области радиационной безопасности необходимо формулировать с использованием вероятностных оценок и интервальных величин.

Принцип соответствия. Применение этого принципа позволяет осуществить переход от традиционного понимания мониторинга как научно-технической системы к существенно более широкому научно обоснованному представлению как о системе, состоящей из неживых материальных элементов (приборы, системы наблюдений, измерений, связи и т. д.) и живых (персонал и лица, принимающие решения), а также виртуальных элементов (базы данных, системы законодательства и нормирования в сфере обеспечения радиационной безопасности и т. д.).

Принцип дополнительности. Научная результативность и обоснованность применения общесистемных изоморфизмов в сфере радиационной безопасности и, соответственно, в системе радиационного мониторинга, наиболее ясно подтверждается принципом дополнительности. Это принцип, в том числе постулирует правомерность и равноправие различных научных описаний. И в нашем случае – это применение

разнообразных научных подходов, описывающих одни и те же объекты и предметы исследования: логико-исторический и логико-математический подходы, теоретико-множественный и системный анализ, а также методы, используемые в теории риска и ОТС.

Критерии подтверждения и научной обоснованности. В качестве подтверждения научной обоснованности теоретических результатов использованы критерии, которые, с одной стороны, определяют правила оперирования абстракциями для их введения и удаления в рамках применения теоретико-множественного анализа и ОТС, с другой стороны, позволяют оценивать теоретические результаты с точки их реализации на практике.

Самым наглядным способом, подтверждающим обоснованность полученных результатов, является научная интерпретация результатов общественной практики в сфере обеспечения радиационной безопасности, например, потребность изменения парадигмы радиоэкологии. Исходя из научно обоснованных результатов анализа и обобщения практики радиационной защиты и безопасности в различных типах ситуаций облучения, разработаны, внедрены и проверены на практике рекомендации по развитию системы радиационного мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь.

Результаты исследования и их обсуждение

Итак, для удовлетворительного разрешения научных проблем системы радиационного мониторинга окружающей среды на базе описанных выше методов представим научно обоснованную современную парадигму радиоэкологии и основные определения системы радиационного мониторинга окружающей среды.

Основная гипотеза исследования радиационного мониторинга как системы состоит в том, что радиационный мониторинг окружающей среды является системой в строгом смысле и подчиняется общесистемным законам, имеет свои основные, генеральные цели, свойства и характеристики, которые описываются специально разработанным логико-математическим аппаратом. Последнее позволяет оценивать и прогнозировать ее поведение в различных типах ситуаций облучения для обеспечения радиационной безопасности на социально-приемлемом уровне. При этом система радиационного мониторинга окружающей среды является важнейшим механизмом радиоэкологических исследований в биосфере и ее успешность существенным образом зависит от действующей парадигмы радиоэкологии. Модель внешней и внутренней среды системы радиационного мониторинга окружающей среды представлена на рис.

Научная и практическая необходимость обновления парадигмы радиоэкологии. Первоначально в конце 40 – начале 50-х гг. прошлого века в условиях глобального радиоактивного загрязнения вследствие испытаний ядерного оружия в атмосфере и последующего использования ядерной энергии в экономике российским ученым В. М. Ключевским была предложена парадигма «сельскохозяйственной» радиоэкологии: «При широком использовании ядерной энергии в мирных целях, связанным с выведением в окружающую среду искусственных радионуклидов и интенсификацией круговорота естественных радионуклидов, основное значение имеет не прямое воздействие на сельскохозяйственные растения и животных, хотя эту проблему нельзя игнорировать, а накопление ими радионуклидов, поступающих с сельскохозяйственными продуктами в организм человека, что приводит к его дополнительному (сверхфоновому) облучению».

Этот постулат на долгие годы предопределил основные направления исследований в радиоэкологии исходя из того, что основным объектом радиационной защиты является человек: изучение физико-химических закономерностей взаимодействия радионуклидов с почвенными комплексами и оценке количественных параметров их накопления в сельскохозяйственной продукции.

Однако в XXI в. проблемы в области радиационной безопасности потребовали в качестве объекта защиты признать не только человека, но и окружающую среду, что соответствующим образом отражено в рекомендациях МАГАТЭ МКРЗ. Кроме того, в практику обеспечения радиационной безопасности введены понятия типа ситуации облучения (планового, существующего и аварийного) [7; 8]. Новые подходы существенным образом повлияли на характер проведения радиоэкологических исследований поведения радионуклидов в биосфере, оценок радиационной обстановки и, соответственно, на систему радиационного мониторинга.

Таким образом, необходимо найти научное решение проблемы обеспечения радиационной безопасности человека и, одновременно, обеспечения радиационной безопасности наиболее уязвимых объектов окружающей среды (биосферы).

Для описания радиоэкологических аспектов обеспечения радиационной безопасности используем прием ввода и вывода абстракций и их замену конструктивными элементами, следующими из анализа и обобщения практического опыта в сфере радиационной безопасности.

Такой подход позволяет из неограниченного множества абстракций в сфере радиационной безопасности выделить только радиоэкологические и заменить их конструктивными элементами, которые являются базовыми и в радиоэкологии: «радиационная обстановка», «радиационное состояние» и «радиоактивное загрязнение окружающей среды». В таком случае, процессы воздействия природных и антропогенных факторов, которые приводят к радиоактивному загрязнению окружающей среды, рассматриваются в качестве функторов. Отметим, что такой выбор конструктивных элементов следует из практики обеспечения радиационной безопасности согласно требованиям Закона Республики Беларусь «О радиационной безопасности», «Об охране окружающей среды» и рекомендаций МАГАТЭ и МКРЗ [2; 7–9].

Применительно к радиационному мониторингу в качестве процессов воздействия на состояние и радиоактивное загрязнение окружающей среды рассматриваются механизмы переноса массы и энергии радионуклидов природного и искусственного происхождения за счет природных и антропогенных факторов. При этом «окружающая среда» для целей обеспечения радиационной безопасности теперь должна рассматриваться в широком смысле как «биосфера» и понятно, что биосфера в целом становится не только фоном, на котором разворачиваются события, важные для обеспечения радиационной безопасности, но и деятельной силой, которая проявляется через перенос энергии и массы.

Особенности радиоактивного загрязнения биосферы. Отметим, что именно при таком комплексном биосферном подходе появляются методологические возможности выявить, описать и учесть две важные особенности присутствия и поведения радионуклидов в биосфере. Во-первых, важно указать на конечность присутствия радионуклидов в биосфере, которая обусловлена фундаментальным свойством радиоактивного распада и определяет временные периоды, значимые для оценки воздействия ИИ на объекты биосферы. Эта особенность имеет как радиологическую значимость с точки зрения оценки и прогнозирования дозовых нагрузок, так и практическую – для формирования программ мониторинга, что позволяет оптимально использовать доступные ресурсы. Отметим, что поведение системы радиационного мониторинга в фазовом пространстве состояний (решений) в сфере радиационной безопасности имеет высокую темпоральность, которая существенным образом влияет на эффективность самой системы.

В подтверждение значимости этой особенности уместно привести два примера, важных для программ «чернобыльского» мониторинга и имеющих разную временную направленность: радиоактивное загрязнение короткоживущими радионуклидами, в том числе йодом-131 и долгоживущим америцием-241. Понятно, что измерения удельной активности йода-131 в биотических и абиотических объектах были чрезвычайно важны для оценки доз и дальнейших радиологических рисков для населения в «острый» период катастрофы, однако его активность быстро уменьшалась и через 90 дней после катастрофы практически не поддавалась измерениям. В результате, из-за недостатков программного планирования радиационного мониторинга на этом этапе не были получены надежные экспериментальные данные для репрезентативных оценок доз и рисков. В случае с америцием-241 временной тренд имеет обратное направление, его удельная активность была незначительна в момент катастрофы и будет возрастать вплоть до 2058 г. В наше время программы уже предусматривают его включение в состав множества параметра мониторинга.

Во-вторых, после попадания в окружающую среду, радионуклиды включаются в общий процесс переноса энергии и массы между резервуарами биосферы и, несмотря на крайне незначительные массовые количества и преимущественно «рассеянную» форму, встречаются повсеместно. В терминах геохимии можно говорить о вовлечении радионуклидов в геохимический трансфер вещества, что, помимо миграции радионуклидов из одного резервуара биосферы в другой, создает условия для их накопления в отдельных элементах биосферы. Таким образом, для создания новых источников радиоактивного загрязнения, сформированных природными процессами, это также должно находить отражение в программах мониторинга.

В качестве иллюстрации такого механизма можно рассматривать хорошо известные эмпирические результаты многолетнего радиационного мониторинга накопления радиоактивного цезия-137 на так называемых геохимических барьерах в почвах. Другим ярким примером является накопление радионуклидов, в том числе цезия-137, в донных отложениях поверхностных водных объектов, где их удельная активность может достигать 80 тыс. Бк/кг (р. Брагинка, Полесский государственный радиоэкологический заповедник, Республика Беларусь).

В обоих случаях в отдельном резервуаре биосферы идет увеличение удельной активности радионуклидов (по сравнению с прилегающими резервуарами), что создает условия для возникновения нового источника радиоактивного загрязнения.

Наиболее показательным примером формирования новых источников радиоактивного загрязнения в биосфере после катастрофы на Чернобыльской АЭС является процесс появления и накопления в отдельных резервуарах биосферы америция-241, который является продуктом распада плутония-241

и, как указано выше, первоначально в аварийном выбросе практически отсутствовал. Однако сейчас его удельная активность в объектах окружающей среды увеличивается, в том числе в тех «местах», где, согласно определению радиоактивного загрязнения, которое дает МАГАТЭ, его присутствие «не ожидалось или нежелательно» [3; 10].

Итак, теоретическими и практическими предпосылками к созданию новой парадигмы радиоэкологии являются: расширение объектов защиты «человек и окружающая среда» (ранее – только человек), введение новых требований в сфере радиационной безопасности в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ и МКРЗ, а также признание биосферы как деятельной силы геохимического трансфера радиоактивности в биосфере.

Современная парадигма радиоэкологии предлагается в следующем виде: «В настоящее время в связи с широким поступлением радиоактивных изотопов в окружающую среду, обуславливающих возникновение аварийных и существующих ситуаций облучения, значение приобретает не только прямое воздействие на биоту и накопление в ней радионуклидов, но и их вовлечение в геохимический трансфер вещества в биосфере, что создает предпосылки к созданию новых источников радиоактивного загрязнения и приводит к дополнительному облучению объектов окружающей среды и человека».

Современная парадигма радиоэкологии, которая основывается на признании различных типов ситуаций облучения, позволяет формировать и реализовывать эффективные программы радиационного мониторинга окружающей среды, обеспечивая радиационную безопасность человека и объектов окружающей среды.

Описание радиационного мониторинга окружающей среды как целостной системы в строгом математическом смысле с учетом ее типологической неоднородности. Согласно Закону Республики Беларусь «О радиационной безопасности», радиационный мониторинг – это «система длительных регулярных наблюдений, оценки и прогноза радиационной обстановки» [3]. Согласно Закону Республики Беларусь «Об охране окружающей среды», мониторинг окружающей среды, в том числе радиационный, – это «система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов» [11].

Исходя из того, что с точки зрения ОТС, понятие система имеет свои особенности, предлагается «нормативные» понятия радиационного мониторинга интерпретировать в терминах системного анализа с использованием лингвистического и теоретико-множественного подходов.

В связи с необходимостью учитывать предложенную и обоснованную выше типологическую неоднородность системы, определение радиационного мониторинга в наиболее общем виде возможно сформулировать в терминах лингвистического подхода, который подразумевает, что каждое высказывание содержит две основные абстрактные категории – денотаты и функторы.

В терминах теоретико-множественного подхода примем, что взаимные отображения денотатов-объектов (например, множества угроз и рисков, информационных потребностей) через функторы (существенные связи в системе) создают множества решений $\{R\}$ в сфере радиационной безопасности, одним из подмножеств которых является собственное подмножество правильных решений $\{R''\}$, в том числе подмножество параметров радиационного мониторинга, адекватно оценивающих радиационную обстановку на местности, например, при необходимости включая измерения удельной активности америция-241, как это показано выше.

Используя принцип дополненности, введем в рассмотрение некий класс абстракций A , которые, в общем случае, определяют понятия внешней и внутренней среды целостной системы радиационного мониторинга, при этом пусть множества абстракции T , N и P являются собственным подмножеством A .

Исходя из практического опыта, введем новые конструктивные элементы и примем, что абстракция T есть множество угроз и рисков (*Threats*) в сфере радиационной безопасности, абстракция N – множество информационных потребностей (*Needs*), а абстракция P – множество параметров радиационного мониторинга (*Parameters*).

Покажем, что система радиационного мониторинга окружающей среды является типологически неоднородной, динамической, открытой, иерархической, многоуровневой и обладает обратными связями.

Свойство типологической неоднородности уже описано выше, а динамичность системы определяется наличием в ней существенных связей/функторов, которые в общем случае с позиций системного изоморфизма можно рассматривать как силы.

На интуитивном уровне, согласно ОТС, открытой называют систему, которую нельзя удовлетворительным образом представить в виде некой аналитической функции. Понятно, что для системы радиационного мониторинга окружающей среды именно это свойство открытости является атрибутивным признаком.

В классическом смысле ОТС-система считается открытой, если [11]:

1. На систему оказывается воздействие, источником которого или поведением которого невозможно управлять.
2. На систему оказывается воздействие, которое невозможно непосредственно или без искажений (ошибок) наблюдать.

Рассмотрим случай (1) на примере системы обеспечения радиационной безопасности на Фукусимской АЭС во время катастрофы в марте 2011 г., считая систему радиационного мониторинга ее подсистемой. Из общих соображений следует, что управлять стихийными явлениями, в данном случае – землетрясением и цунами, невозможно. Анализ показал, что для персонала Фукусимской АЭС оказалось также невозможным управлять и технологическими системами жизнеобеспечения АЭС во время такого воздействия, например, оперативно восстановить электропитание систем безопасности. На этом примере видно, что система обеспечения радиационной и ядерной безопасности на Фукусимской АЭС, как и любая другая система радиационной безопасности, в том числе система радиационного мониторинга, обладает рисками, которые могут быть отнесены к категории чистых, природных, социальных, а также организационных. Перечисленные риски позволяют характеризовать или определить их как открытые системы.

Несколько сложнее обстоят дела в случае (2), где примеры не кажутся столь очевидными. Анализ и обобщение опыта и общественной практики в сфере безопасности показывает, что чрезвычайные ситуации могут быть «обычными» (быстрыми – часы и дни) и «медленными» (ползучими – от месяца до десятилетий) [12]. Однако на примере катастрофы на Чернобыльской АЭС показано, что некоторые «обычные (быстрые)» чрезвычайные ситуации могут являться закономерным результатом «медленных» (ползучих) [5]. В этом случае радиационный мониторинг также может быть определен как открытая система, поскольку изменения в ее внешней среде под антропогенными воздействиями, которые могут создать «медленные» (ползучие) чрезвычайные ситуации, которые практически невозможно «непосредственно и без искажений наблюдать».

В качестве доказательства, что система радиационного мониторинга является открытой, отметим, что множества $\{T\}$ и $\{N\}$ могут иметь неограниченное число членов, поскольку угрозы и риски радиационной безопасности имеют как глобальный характер, например, испытания ядерного оружия в окружающей среде или катастрофы на Чернобыльской, Фукусимской АЭС, так и региональный и локальный характер, например, авария на ПО «Маяк» или утеря ИИИ. Такой вывод закономерен и обоснован с точки зрения ОТС, поскольку для системы радиационного мониторинга множества $\{T\}$ и $\{N\}$ обусловлены внешней средой, которая по определению является открытой.

Анализ практики функционирования системы радиационного мониторинга окружающей среды свидетельствует, что она эффективна в случае, если на каждом уровне ставится своя отдельная задача, правильные решения которой являются затем исходным условием для решения задач более высокого уровня. Например, подсистемы наблюдений, измерений, обработки и хранения данных формируют основу для подсистем оценки, моделирования, прогнозирования и представления результатов различным информационным группам для обеспечения радиационной безопасности населения и окружающей среды на социально-приемлемом уровне (см. рис.).

Анализ и обобщение практики обеспечения радиационной безопасности в Беларуси позволяют сделать вывод, что сложившаяся на практике многоуровневая иерархическая структура системы радиационного мониторинга с обратными связями, как это описано во Введении и отражено на рис., наиболее адекватна для достижения системных (генеральных) целей.

Определение эффективности системы в общем виде. Согласно ОТС, любая система может находиться в одном из трех состояний:

- «функционирования», когда обеспечено достижение системных целей;
- «сохранения», когда система не обеспечивает достижение системных целей, сохраняя характеристики предыдущего цикла;
- «развития», когда внутренняя структура системы приводится в соответствие изменившемуся состоянию внешней и внутренней среды для достижения системных целей, иными словами, возвращается в состояние функционирования в новых условиях.

Эффективная система должна находиться в состоянии функционирования и быть готовой к любым изменениям во внешней и внутренней среде и соответствующим образом удовлетворять информационные потребности критической инфраструктуры государства, СМИ и населения.

Следовательно, такое требование можно рассматривать как определение эффективности системы радиационного мониторинга окружающей среды в терминах лингвистического подхода. В терминах теоретико-множественного анализа система радиационного мониторинга является эффективной, если в результате взаимного отображения множеств $\{T\}$, $\{N\}$ и $\{P\}$ возникает непустое подмножество правильных решений $\{R\}$. Иными словами, система находится в состоянии функционирования и обеспечивает радиационную безопасность человека и объектов окружающей среды при оптимальном использовании доступных ресурсов.

Заключение

В исследовании научно обоснована, описана и представлена современная парадигма радиоэкологии, которая основывается на признании, что человек и окружающая среда, как часть биосферы, являются объектами радиационной защиты, при этом биосфера является деятельной силой, влияющей на радиационную безопасность. Современная парадигма радиоэкологии, основанная на признании различных типов ситуаций облучения, позволяет формировать и реализовывать программы мониторинга, адекватные существующим угрозам и рискам, а также информационным потребностям критической инфраструктуры государства, СМИ и населения.

Впервые выявлена и описана методологическая проблема развития радиационного мониторинга как системы в строгом математическом смысле, суть которой заключается в отсутствии целостного описания типологически неоднородной системы для оценки соответствия ее состояния системным (генеральным) целям с учетом существующей и прогнозируемой динамики угроз и рисков и, соответственно, информационных потребностей общества.

Научно обосновано и показано, что система радиационного мониторинга окружающей среды как система в строгом смысле, подчиняется общесистемным законам, имеет свои основные системные (генеральные) цели и свойства, которые могут быть описаны специально разработанным логико-математическим аппаратом.

Обоснована теоретически и практически возможность применения метода общесистемных изоморфизмов, который позволяет дать целостное описание системы радиационного мониторинга с учетом ее типологической неоднородности.

Определены и описаны основные денотаты системы, обоснован выбор конструктивных элементов для их замены.

Показано, что система радиационного мониторинга окружающей среды является типологически неоднородной, динамической, открытой, иерархической, многоуровневой системой и обладает обратными связями.

Представлены строгие определения эффективности системы радиационного мониторинга окружающей среды в терминах лингвистического и теоретико-множественного подходов.

Однако полученные результаты решают лишь часть задачи создания целостного научного описания радиационного мониторинга как системы в строгом смысле. Необходимо продолжить исследования по дальнейшей разработке и совершенствованию единого методологического подхода на основе развития предложенного логико-математического метода описания системы радиационного мониторинга окружающей среды. Представляется целесообразным продолжить изучение поведения системы радиационного мониторинга окружающей среды в фазовом пространстве состояний, для чего требуется разработать логико-математическую модель исследования и предложить основы математически формализованных подходов к прогнозированию состояния системы в различных условиях, в том числе с учетом ее темпоральности.

Библиографические ссылки

1. Концепция национальной безопасности Республики Беларусь, утверждена Указом Президента Республики Беларусь от 9 ноября 2010 г. № 575.
2. Закон Республики Беларусь от 18.06.2019 N 198-З О радиационной безопасности.
3. Герменчук МГ и др. *Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси*. Израэль ЮА, Богдевич ИМ, редакторы. Минск: Белкартография; 2009. 135 с.
4. Maskevich S, Germenchuk M. Radiation monitoring of the environment: Innovative technologies and informatization. In: *International (15th Regional) Scientific Conference on Technogenic Systems and Environmental Risk, 2018 April 19–20*. Obninsk: [publisher unknown]; 2019. Volume 487, issue 1.
5. Герменчук МГ. *Управление системой радиационного мониторинга окружающей среды*. Минск: ИВЦ Минфина; 2018. 121 с.
6. Пригожин И, Стенгерс И. *Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой*. Москва: Прогресс; 1986. 432 с.
7. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 103. *Annals of ICRP*. 2008;37:344.
8. ICRP, 2014. Protection of the Environment under Different Exposure Situations. ICRP Publication 124. *Annals ICRP*. 2014;43(1).
9. Закон Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» от 17 июля 2017 г. № 51-З.
10. Глоссарий по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. IAEA – SPI/PUB/1290. Вена: [б. и.]; 2007. 303 р.
11. Месарович М, Мако Д, Такаха И. Теория иерархических многоуровневых систем [перевод с английского и редакция И. Ф. Шахнова]. Москва: Мир; 1973. 343 с.
12. Авдотьин ВП, Дзыбов ММ, Самсонов КП. Оценка ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Монография. Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ); 2012. 468 с.

References

1. *Kontseptsia natsionalnoy besopasnosti Respubliki Belarus, utvershdena Ukazom Prezidenta Respubliki Belarus ot 9 nojabra 2010 g. № 575* [The concept of national security of the Republic of Belarus, approved by Decree of the President of the Republic of Belarus of November 9, 2010 №. 575]. Russian.
2. *Zakon Respubliki Belarus ot 18.06.2019 o radiatsionnoy besopasnosti* [Law of the Republic of Belarus dated 18.06.2019 on radiation safety]. Russian.
3. Germenchuk MG, et al. *Atlas sovremennykh i prognosnykh aspektov posledstviy avarii na Chernobylskoy AES na postradayshikh territoriakh Rossii i Belarusi. Israel YuA, Bohdevich IM, redaktory* [Atlas of modern and forecast aspects of the consequences of the Chernobyl accident in the affected territories of Russia and Belarus]. Minsk: Belkartografiya; 2009. 135 p. Russian.
4. Maskevich S, Germenchuk M. Radiation monitoring of the environment: Innovative technologies and informatization. In: *International (15th Regional) Scientific Conference on Technogenic Systems and Environmental Risk, 2018 April 19–20*. Obninsk: [publisher unknown]; 2019. Volume 487, issue 1.
5. Germenchuk MG. *Upravlenie sistemoy radiatsionnogo monitoringa okruzhayushey sredy* [Management of the system of radiation monitoring of the environment]. Minsk: UVTs Minfina; 2018. 121 p. Russian.
6. Prigozhin I, Stengers I. *Poradok uz khaosa. Novyy dialog cheloveka s prirodoy* [Order out of chaos. A new dialogue between man and nature]. Moscow: Progress; 1986. 432 c. Russian.
7. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 103. *Annals of ICRP*. 2008;37:344.
8. ICRH, 2014. Protection of the Environment under Different Exposure Situations. ICRP Publications 124. *Annals ICRP*. 2014;47(1).
9. *Zakon Respubliki Belarus «Ob okhrane okruzhayushchey sredy» ot 17 iula 2017 g. 353-Z* [The Law of the Republic of Belarus «On Environmental Protection» dated July 17, 2017 №. 51-3]. Russian.
10. *Glossariy po voprosam besopasnosti. Terminologia, ispolnuemaya v oblasti yadernoy besopasnosti i radiatsionnoy zashity. IAEA – SPI/PUB/1290* [Safety Glossary “Terminology Used in the Field of Nuclear Safety and Radiation Protection” / IAEA - SPI / PUB / 1290. Vienna: [publisher unknown]; 2007. 303 p. Russian.
11. Mesarovich M, Macko P, Takhara Y. *Teory of hierarchical multilevel systems*. New York; London: Akademik press; 1970. 344 p.
12. Avdotin VP, Dzybov NM, Samsonov KP. *Otsenka ushcherba otcrezvyhajnykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera* [Damage assessment from natural and man-made emergencies, Russian Emergency Situations Ministry]. Moscow: FGBU VNII GOChS (FTs); 2012. 468 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 24.04.2020.
Received by editorial board 24.04.2020.

УДК 539.106

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОКАХ ПО МГНОВЕННОМУ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ ПРИ ЗАХВАТЕ НЕЙТРОНОВ

Б. И. КУРБАНОВ¹⁾, А. Р. ЖУРАКУЛОВ¹⁾, А. М. МУЗАФАРОВ¹⁾

¹⁾Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан,
ул. Я. Гуломова, 70, 100047, г. Ташкент, Узбекистан

Приводятся результаты исследования возможности контроля элементного состава в технологических потоках по мгновенному гамма-излучению при захвате нейтрона. Создана экспериментальная установка на основе радионуклидного ²⁵²Cf-источника нейтронов. Спектрометрическая система состоит из полупроводникового Ge-детектора и многоканального анализатора импульсов. Разработан способ определения концентрации компонентов сложных смесей.

Ключевые слова: захват нейтронов; мгновенное гамма-излучение; элементный состав; радионуклидный источник; технологический поток; концентрация; экспрессность анализа.

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF MONITORING THE ELEMENT COMPOSITION IN TECHNOLOGICAL FLOWS BY PROMPT GAMMA-RADIATION AT NEUTRONS CAPTURE

B. I. KURBANOV^a, A. R. JURAKULOV^a, A. M. MUZAFAROV^a

^aInstitute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
70 Y. Gulomov Street, Tashkent 100047, Uzbekistan,
Corresponding author: B. I. Kurbanov (bkurbanov@inp.uz)

This report presents the results of a study of the possibility of controlling the elemental composition in technological streams by instantaneous gamma radiation of neutron capture. An experimental setup based on a radionuclide (²⁵²Cf) neutron source has been assembled, the spectrometric system consists of a semiconductor Ge detector and a multi-channel pulse analyzer. A method has been developed for determining the concentration of components of complex mixtures.

Keywords: neutron capture; instant gamma radiation; elemental composition; radionuclide source; process stream; concentration; expressness of analysis.

Образец цитирования:

Курбанов БИ, Журакулов АР, Музафаров АМ. Исследование возможности контроля элементного состава в технологических потоках по мгновенному гамма-излучению при захвате нейтронов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:36–40.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-36-40>

For citation:

Kurbanov BI, Jurakulov AR, Muzafarov AM. Research of the possibility of monitoring the element composition in technological flows by prompt gamma-radiation at neutrons capture. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:36–40. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-36-40>

Авторы:

Бахтияр Ибрагимович Курбанов – кандидат технических наук; заведующий лабораторией «Экология и биотехнологии».

Алишер Рустамович Журакулов – магистр, преподаватель кафедры «Общая физика».

Амрулло Мустафоевич Музафаров – доктор технических наук; доцент кафедры «Общая физика».

Authors:

Bakhtiyar I. Kurbanov, PhD (engineering); head at the laboratory of ecology and biotechnology.

bkurbanov@inp.uz

Alisher R. Jurakulov, master, senior lecturer at the department of general physics.

ali_80_84@mail.ru

Amrullo M. Muzafarov, doctor of sciences (engineering); associate professor at the department of general physics.

kurbanov_1960@bk.ru

Введение

В настоящее время для многих отраслей промышленности, например горно-металлургической, химической, нефтеперерабатывающей и других производств, требуется использовать методы и приборы, позволяющие определять содержание технологически важных элементов за короткое время (не более 15–20 мин) с момента отбора пробы из технологической цепочки, для того чтобы обеспечить возможность оперативного контроля и управления этих процессов. При этом концентрация элементов может быть в разном диапазоне: от долей % до 50 % и более. В традиционных методах определение содержания элементов, например в химическом анализе, результаты выдаются обычно через несколько часов, что не позволяет оперативно-воздействовать на ход технологических процессов.

Среди аналитических методов по своим принципиальным возможностям для этих задач наиболее подходящим можно считать ядерно-физический метод, основанный на использовании спектрометрии мгновенного гамма-излучения радиационного захвата нейтронов [1; 2]. Данный метод обладает рядом таких принципиальных преимуществ, как многоэлементность (ядра большинства химических элементов при захвате нейтронов испускают характерные гамма-спектры, по которым возможно идентифицировать элемент), экспрессность (процесс радиационного захвата происходит практически мгновенно, за время 10^{-13} сек), глубинность (проникающая способность как нейтронов, так и гамма-излучения достаточно высока), дистанционность и безконтактность (возможно анализировать без контакта с исследуемым объектом), неразрушаемость (для этого метода не обязательна пробоподготовка), экологическая чистота элементного анализа (остаточная активность исследованных образцов достаточно низкая) [3; 4]. Для использования этого метода возможны разработки транспортабельных установок на основе радионуклидного источника нейтронов. Наиболее оптимальным для этой цели является ампульный источник радионуклида – калифорния-252 (^{252}Cf) или современные портативные генераторы нейтронов.

Экспериментальная часть. Экспериментальные устройства для проведения аналитического исследования спектрометрии мгновенного гамма-излучения при захвате нейтронов должны отвечать ряду противоречивым требованиям. Чтобы получить максимальную плотность потока тепловых нейтронов на исследуемом образце, необходимо образец разместить вблизи источника нейтронов. Однако при этом трудно измерять низкоэнергетическую область гамма-спектра, так как в результате прохождения слоя замедлителя и фильтра в конструкции установки теряется интенсивность гамма-излучения. Если исследуемый образец расположить вблизи детектора (на выведенном пучке нейтронов), то уменьшится плотность потока тепловых нейтронов. Вид спектра гамма-излучения и значение фона сильно зависят от применяемого при создании установки конструкционного материала. Поэтому выбор геометрии измерения и конструкционных материалов при разработке устройства является сложной задачей. Также сложно моделировать и теоретически подсчитать условия для получения оптимальной плотности потока тепловых нейтронов и аналитических сигналов – гамма-излучения захвата нейтронов, а также толщину замедлителей нейтронов.

Проанализировав литературные данные, следует отметить, что еще недостаточно исследованы аналитические возможности метода, нет единого подхода к геометрии измерения и конструкции устройств, нет детально разработанных методик определения содержания элементов в конкретных объектах. Весьма скудным является исследование физических особенностей спектров, которые могли бы использоваться в аналитических целях.

Геометрия измерения и оптимальные параметры установки (плотности потока тепловых нейтронов, эффективные размеры и материалы системы замедлителей и отражателей нейтронов с энергетическим спектром от теплового (кТ) до 15 МэВ), размеры исследуемого образца и биологической защиты и другие параметры найдены авторами исключительно путем экспериментальных измерений.

Для проведения экспериментальных исследований собрана экспериментальная установка на основе радионуклидного ^{252}Cf -источника нейтронов с выходом 4×10^7 нейтр./сек.

Для медленных нейтронов ($E_n < 0,5$ эВ) сечение радиационного захвата нейтрона изменяется по закону $1/\sqrt{E_n}$. Тогда число захватов в единицу времени в 1 см^3 может быть записано как

$$\Omega = N n v_0 \sigma_0, \quad (1)$$

где N – число ядер в объеме 1 см^3 , nV_0 – поток нейтронов, σ_0 – сечение захвата нейтронов при тепловой энергии ($E_n = 0,025$ эВ).

На рис.1 приводится принципиальная схема экспериментальной установки – поточного анализатора на основе радионуклидного ^{252}Cf -источника нейтронов. В отличие от известных установок, предназначенных для контроля элементного состава по спектрометрии мгновенного гамма-излучения, в данной конструкции на место исследуемого образца установлен массопровод, проходящий сквозь экспериментальную установку. Размеры и материал массопровода выбираются исходя из решаемых

задач, например, необходимо осуществлять контроль элементного состава технологических растворов, сыпучих материалов, зерна или угля и т. д. Детектор гамма-излучения выбирается также в зависимости от решаемых задач, например для несложных объектов с высоким содержанием искомых элементов (когда отсутствуют мешающие элементы) можно использовать сцинтилляционный NaI(Tl)-детектор, а в случаях когда исследуемый объект является сложным по составу и имеется возможность мешающих влияний каких-либо элементов матрицы, желательно использовать полупроводниковые детекторы из чистого Ge с высоким энергетическим разрешением.

Для обеспечения биологической защиты персонала в конструкции экспериментальной установки изготовлен комбинированный слой защиты от нейтронного и гамма-излучения из полиэтилена с бором, а также свинца, что обеспечивает радиационную безопасность при работе.

Разработанный поточный анализатор собран на основе работы [5] и может быть применен для решения многих задач, связанных с «on-line» анализом продукции химической, горно-металлургической промышленности, сельского хозяйства (оценка качества зерна по содержанию белка) и других отраслей науки и производства.

Способ определения концентрации смесей в сложных образцах без измерения массы или плотности и объема

Рассмотрим способы анализа концентрации компонентов методом спектрометрии (гамма-излучения объекта), или его плотность и объем. Анализаторы, основанные на этих способах, содержат дополнительные устройства для измерения толщины объекта (если это на транспортной ленте), считая плотность или его массу постоянной. К тому же эти методы не позволяют определять концентрации легких элементов (H, N, S, и др.) и состоящих из них компонентов.

Интенсивность аналитического сигнала при захвате тепловых нейтронов ядрами элементов в исследуемом образце выражается отношением

$$N_{\gamma} = f n_M \sigma_M I_{\gamma} V, \quad (2)$$

где f – плотность потока нейтронов, n_M – число ядер элемента M в единице объема, σ_M – сечение захвата нейтронов для ядер элемента M , V – объем пробы, I_{γ} – выход гамма квантов с энергией E , испускаемых ядрами элемента M при захвата нейтрона.

Исключение таких недостатков, как расширение диапазона анализируемых компонентов, снижение трудоемкости и повышения оперативности методом спектрометрии гамма-излучения нейтронного захвата, в настоящей работе выполнено следующим способом.

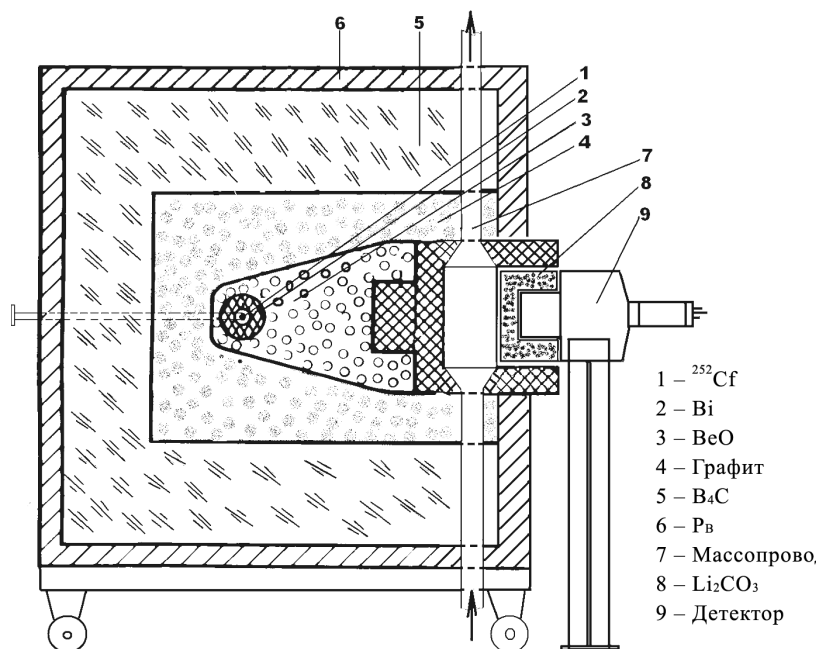


Рис. 1. Принципиальная схема поточного анализатора:

1 – ^{252}Cf -источник нейтронов, 2 – предварительный замедлитель быстрых нейтронов, 3 – замедлитель нейтронов, 4 – отражатель нейтронов, 5, 6 – биологическая защита персонала, 7 – массопровод, 8 – фильтр от нейтронов, 9 – детектор гамма-излучения

Fig. 1. Schematic diagram of a flow analyzer.

1 – ^{252}Cf -neutron source, 2 – preliminary fast neutron moderator, 3 – neutron moderator, 4 – neutron reflector, 5, 6 – biological personnel protection, 7 – mass pipeline, 8 – filter from neutrons, 9 – gamma radiation detector

$$C_k = \left(\frac{M_k}{\Gamma_k \sigma_k I_{\gamma k}} n_k \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{M_i \varepsilon_{ki}}{\Gamma_i \sigma_i I_{\gamma i}} n_i \right), \quad (3)$$

где n_i и n_k – число импульсов в единицу времени (скорость счета) гамма-излучения i -го и k -го компонентов; n – число компонентов; M_i и M_k – молекулярный вес i -го и k -го компонентов; Γ_i и Γ_k – число атомов i -го и k -го элементов (аналитических элементов) в молекуле i -го и k -го компонентов, σ_i , $I_{\gamma i}$ и σ_k , $I_{\gamma k}$ – сечение захвата нейтронов и выход гамма-квантов i -го и k -го компонентов, ε_{ki} – относительная эффективность регистрации излучений i -го и k -го компонентов.

Данный способ реализован при определении компонентов смесей, состоящих из сернокислого аммония – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, азотнокислого аммония – NH_4NO_3 и воды – H_2O . Образцы смесей облучали замедленными нейтронами калифорниевого источника, гамма спектр образующихся радионуклидов измеряли с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра с кристаллом NaI (Тl) с размерами 100×150 мм.

Количество воды определяли по содержанию водорода, сернокислого аммония – по сере и азотнокислого аммония – по азоту.

На основании химических формул компонентов были составлены формулы для вычисления концентрации компонентов:

$$C_s = \frac{N_s}{0,602N_H + 0,121N_s + 0,41N_N}, \quad (4)$$

$$C_N = \frac{1,076N_s - 0,875N_s}{0,868N_H + 0,176N_s + 0,592N_N}, \quad (5)$$

где C_s и C_N – концентрации сернокислого аммония и азотнокислого аммония соответственно; N_H , N_s и N_N – число импульсов, соответствующих гамма-излучению водорода, серы и азота.

Полученные результаты по времени проведения анализа (время анализа 10 мин) и чувствительности удовлетворяют требованиям производства. Таким образом, с помощью данного способа можно контролировать концентрации компонентов смесей дистанционно, без непосредственного контакта с исследуемым объектом.

Были измерены технологические потоки: исходные руды, флотоконцентраты на разных этапах флотации и хвосты флотации, показаны возможности экспрессного определения содержания S, Cu, Ti, являющиеся технологически важными параметрами в процессах переработки золотосодержащих, медьсодержащих и титансодержащих руд, по кооторым можно судить о процессе и воздействовать на него.

На рис. 2 приводится график зависимости площади пика меди и титана от их концентрации в образцах за время измерения 20 мин, что дает возможность определения содержания этих элементов.

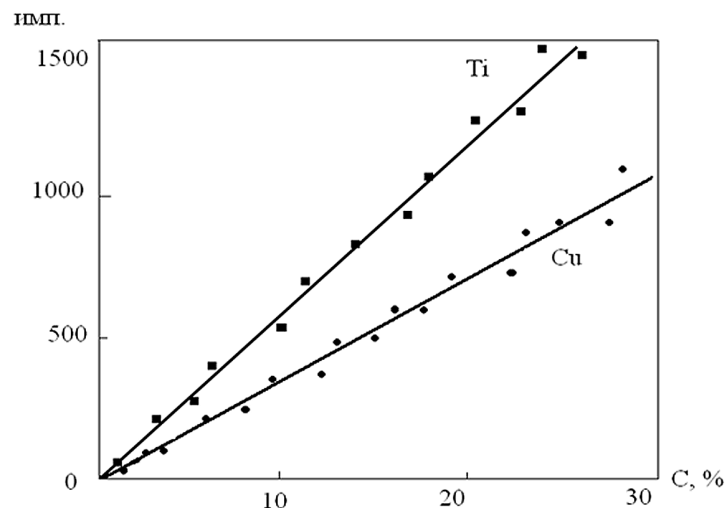


Рис. 2. Зависимость интенсивности аналитической гамма-линии Cu и Ti от содержания соответствующих элементов в исследуемых технологических продуктах

Fig. 2. A graph of the intensity of the analytical gamma line Cu and Ti on the content of the corresponding elements in the studied technological products

Выводы

В работе изложены результаты исследования по проведению контроля элементного состава в технологических потоках по мгновенному гамма-излучению. Представлены экспериментальная установка на основе радионуклидного ^{252}Cf -источника нейтронов и спектрометрическая система, состоящая из полупроводникового Ge-детектора и многоканального анализатора импульсов. Описан способ определения концентрации компонентов сложных смесей. Проведенные исследования показали, что по спектрометрии мгновенного гамма-излучения, возникающего при захвате теплового нейтрона, можно определять содержание элементов непосредственно на технологическом потоке сложного состава без отбора пробы.

Библиографические ссылки

1. Гума ВИ, Демидов АМ, Иванов ВА, Миллер ВВ. *Нейтронно-радиационный анализ*. Москва: Энергоатомиздат; 1984. 64 с.
2. Paul RL, Lindstrom RM. Prompt gamma-ray activation analysis: Fundamentals and applications. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. AKADEMIKIADO*. 2000;243(1):181–189.
3. Seppo Ustalo, Tuula Lukander. On-line neutron capture gamma analysis with a Ge(Li) detector. *Nuclear Instruments and Methods*. 1981;188(2):439–443.
4. Курбанов БИ, Кист АА, Курбанова НБ. Исследование возможности нейтронно-радиационной методики определения содержания азота в зерне и зерновых продуктах. *Узбекский физический журнал*. 2017;19(5):51–55.
5. Арипов ГА, Курбанов БИ. Патент РУз № IDR-04491 от 2001 г. «Устройство для определения элементного состава вещества».

References

1. Guma VI, Demidov AM, Ivanov VA, Miller VV. Neutron-radiation analysis. Moscow: Energoatomizdat; 1984. 64 p. Russian.
2. Paul RL, Lindstrom RM. Prompt gamma-ray activation analysis: Fundamentals and applications. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. AKADEMIKIADO*. 2000; 243(1):181–189.
3. Seppo Ustalo, Tuula Lukander. On-line neutron capture gamma analysis with a Ge (Li) detector. *Nuclear Instruments and Methods*. 1981;188(2):439–443.
4. Kurbanov BI, Kist AA, Kurbanova NB. Investigation of the possibility of a neutron-radiation technique for determining the nitrogen content in grain and grain products. *Uzbek physical journal*. 2017;19(5):51–55. Russian.
5. Aripov GA, Kurbanov BI. RUz patent No. IDR-04491 from 2001. A device for determining the elemental composition of a substance. Russian.

Статья поступила в редколлегию 26.04.2020.
Received by editorial board 26.04.2020.

УДК 616.37-006.6-07-08:577.23(476)

ОЦЕНКА КЛЕТОЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ ПАЦИЕНТОВ, СТРАДАЮЩИХ РАКОМ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ, ПОЛУЧАВШИХ АДЬЮВАНТНУЮ ЛУЧЕВУЮ И ХИМИОЛУЧЕВУЮ ТЕРАПИЮ

Е. М. ШПАДАРУК¹⁾, Р. М. СМОЛЯКОВА¹⁾

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

Анализируются данные изменения показателей клеточной реактивности гомеостаза, а также индексов интоксикации организма пациентов, страдающих раком поджелудочной железы в ходе комбинированного химиолучевого и радиационного лечения.

В результате исследований было установлено, что у пациентов с раком поджелудочной железы в процессе проведения комплексной химиолучевой терапии происходит значимое изменение содержания лейкоцитов и лимфоцитов, а также интегральных показателей клеточного гомеостаза (индекса соотношения лимфоцитов и моноцитов). У пациентов, получавших только радиотерапию, выявлено в процессе лечения значимое изменение относительного количества лимфоцитов, индекса соотношения нейтрофилов и лимфоцитов и индекса соотношения лимфоцитов и моноцитов.

Ключевые слова: рак поджелудочной железы; гомеостаз; лучевая терапия; радиационное воздействие; тромбоциты; лейкоциты; лимфоциты; нейтрофилы; моноциты; лейкоцитарный индекс интоксикации по Я. Я. Кальф-Калифу; индекс сдвига лейкоцитов; индекс соотношения нейтрофилов и лимфоцитов; индекс соотношения лимфоцитов и моноцитов.

EVALUATION OF CELL PERFORMANCE PERIPHERAL BLOOD OF PATIENTS WITH CANCER OF THE PANCREAS, RECEIVED ADJUVANT RADIOTHERAPY AND CHEMORADIOTHERAPY

K. M. SHPADARUK^a, R. M. SMOLYAKOVA^a

^aInternational State Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daïhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: K. M. Spadaruk (katshp@tut.by)

The article presents an analysis of the data on changes in the indicators of cellular reactivity of homeostasis, as well as parameters of the intoxication indices of the body of patients suffering from pancreatic cancer during combined chemoradiation and radiation treatment.

Образец цитирования:

Шпадарук ЕМ, Смолякова РМ. Оценка клеточных показателей периферической крови пациентов, страдающих раком поджелудочной железы, получавших адьювантную лучевую и химиолучевую терапию. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:41–50.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-41-50>

For citation:

Shpadaruk KM, Smolyakova RM. Evaluation of cell performance peripheral blood of patients with cancer of the pancreas, received adjuvant radiotherapy and chemoradiotherapy. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:41–50. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-41-50>

Авторы:

Екатерина Михайловна Шпадарук – кандидат биологических наук; доцент кафедры общей биологии и генетики.
Раиса Михайловна Смолякова – доктор биологических наук; профессор кафедры общей биологии и генетики.

Authors:

Katsiaryna M. Shpadaruk, PhD (biology); associate professor at the department of general biology and genetics.
katshp@tut.by
Raisa M. Smolyakova, doctor of sciences (biology), professor; professor at the department of general biology and genetics.
smol60@mail.ru

As a result of studies, it was found that in patients with pancreatic cancer during the course of complex chemoradiotherapy, there is a significant change in the content of leukocytes and lymphocytes, as well as the integral indicators of cell homeostasis (index of the ratio of lymphocytes and monocytes). In patients receiving only radiotherapy, a significant change in the relative number of lymphocytes, the index of the ratio of neutrophils and lymphocytes and the index of the ratio of lymphocytes and monocytes was revealed during treatment.

Keywords: pancreatic cancer; homeostasis; radiation therapy; radiation exposure; platelets; leukocytes; lymphocytes; neutrophils; monocytes; leukocyte intoxication index according to Y. Y. Kalf-Kalif; leukocyte shift index; neutrophil to lymphocyte ratio index; lymphocyte to monocyte ratio index.

Введение

В связи с ухудшением экологической ситуации растет число случаев злокачественных новообразований, что делает еще более актуальной задачу лечения и диагностики опухолей человека. При этом в последние десять лет отмечается повышение частоты заболеваемости раком поджелудочной железы (РПЖ).

По данным GLOBOCAN, в 2018 в мире было зарегистрировано 2,5 % новых случаев заболеваемости раком поджелудочной железы среди всех злокачественных новообразований. Смертность от него наблюдалась в 4,5 % случаев от всех смертей, вызванных онкологическими заболеваниями. По этим данным рак поджелудочной железы занимает 11 место по распространенности и 4 место по 5-летней выживаемости в мире. Это может быть обусловлено ухудшением экологической ситуации в развитых странах [1].

Рак поджелудочной железы характеризуется менее благоприятным прогнозом, а также низкой 5-летней выживаемостью. У рака поджелудочной железы нет специфических симптомов. Поэтому чаще всего данное заболевание диагностируют на более поздних стадиях или, когда уже имеются широкие метастазы [2].

В настоящее время единственным радикальным лечением рака поджелудочной железы является хирургический метод. Однако выполнение радикальной операции оказывается возможным только у 15–20 % пациентов; 5-летняя выживаемость после выполнения радикальной операции не превышает 19 %, а общая выживаемость при раке головки поджелудочной железы не превышает 6 % [3; 4]. По данным ряда авторов, применение лучевой терапии обеспечивает местнорегионарный контроль роста опухоли и увеличивает продолжительность жизни пациентов. Современная химиотерапия позволяет увеличить показатели выживаемости, а в сочетании с лучевым воздействием эффективно замедляет прогрессирование опухоли у пациентов, обеспечивая профилактику отдаленных метастазов [5].

Комбинированные и комплексные методы лечения онкологических пациентов предусматривают проведение неoadъювантной химио- и/или лучевой терапии, расширенных и комбинированных хирургических вмешательств, адъювантных видов воздействия. При выборе патогенетически обоснованной программы лечения необходимо учитывать не только функциональное состояние пациента, метаболические сдвиги, наличие паранеопластического синдрома, что непосредственно сказывается на определении тактики лечения и прогноза, но и особенности его генетического статуса, который в существенной степени определяет многие особенности организма, включая активность системы детоксикации. В настоящее время доказано системное воздействие злокачественной опухоли на организм-опухоленоситель, которое сопровождается клинически манифестирующим или пролонгированным развитием синдрома опухолевой интоксикации. По механизмам развития и клиническим признакам опухолевая интоксикация является примером воздействия местного процесса на все жизненно важные системы и органы обеспечения и регуляции обмена веществ.

Адаптационно-компенсаторные перестройки в организме пациентов, страдающих раком поджелудочной железы, в процессе химиотерапевтического и радиационного воздействия характеризуются увеличением клеточного пула неспецифической защиты и понижением иммунологической реактивности с активацией процессов гиперчувствительности немедленного типа.

Реализация эффекта комбинированного воздействия при радиочувствительности организма в посттерапевтическом периоде сопровождается повышением значений лейкоцитарного индекса интоксикации (ЛИИ по Кальф-Калифу), инициацией процессов неспецифической защиты и реакций гиперчувствительности немедленного типа, что характеризуется понижением уровня гематологического индекса соотношения лимфоцитов и эозинофилов. Биохимические сдвиги в организме пациентов с РПЖ, сопровождающиеся развитием синдрома эндогенной интоксикации, обуславливают преобладание в гемограмме популяции клеток неспецифической защиты над клеточным составом специфической защиты организма и нарушение микрофагально-макрофагальной системы [6; 7].

У пациентов, страдающих раком поджелудочной железы, состояние хронического дистресса и повышение уровня эндогенной интоксикации вызывают развитие вторичного иммунодефицита, проявлением которого являются снижение таких гематологических показателей, как лимфоцитарно-гранулоцитарный индекс и индекс соотношения лимфоцитов и моноцитов (ИСЛМ) [8].

Определение лейкоцитарного индекса интоксикации, характеризующего реакцию органов гемопоэза и иммуногенеза на инфекционно-токсическую агрессию и степень активизации процессов тканевого распада, является одним из эффективных методов оценки эндогенной интоксикации различного генеза [9].

Цель исследования: изучить изменения показателей клеточной реактивности гомеостаза и уровень радиационно-индуцированной интоксикации у пациентов с раком поджелудочной железы в ходе проведенного комбинированного химиолучевого и лучевого лечения и их пригодность для оценки эффективности проводимой терапии.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования послужили показатели клеточной реактивности гомеостаза 66 пациентов, страдающих раком поджелудочной железы, получивших специальное лечение в РНПЦ ОМР им. Н. Н. Александрова в 2009–2017 гг.

У 66 пациентов, страдающих раком поджелудочной железы, проводилось комбинированное лечение, которое включало хирургическое вмешательство и послеоперационное лучевое воздействие.

В настоящее исследование включено 48 пациентов, которым проводилась комбинированная химиолучевая терапия на опухоль в суммарной очаговой дозе 20–90 Гр на фоне перорального приема цитостатика фторпиримидинового ряда, 18 пациентам выполнена только радиотерапия.

Как следует из табл. 1, 48,48 % пациентам, страдающим раком поджелудочной железы, выполнена адъювантная лучевая терапия в суммарной очаговой дозе 28–31 Гр, у 24,24 % пациентов суммарная очаговая доза составляла 32 Гр. Зона воздействия лучевой терапии: основной очаг или основной очаг + зоны регионарного метастазирования.

Таблица 1

Распределение пациентов с РПЖ в зависимости от суммарной очаговой дозы облучения

Table 1

Distribution of patients with PC depending on the total focal dose

Суммарная очаговая доза	До 28 Гр	28–31 Гр	32 Гр	33–50 Гр	>50 Гр
количество пациентов, n (%)	4 (6,06 %)	32 (48,48 %)	16 (24,24 %)	9 (13,64 %)	5 (7,58 %)

Гематологические показатели периферической крови (общее содержание тромбоцитов, лейкоцитов, относительное количество лимфоцитов, нейтрофилов и моноцитов) определяли на анализаторе Немасомп 10 «SEAC».

Подсчет лейкоцитарной формулы выполняли на автоматическом анализаторе Pentra 120 «ABX» (Франция).

По данным лейкограммы рассчитывали интегральные показатели клеточной реактивности:

- лейкоцитарный индекс интоксикации (ЛИИ) по Я. Я. Кальф-Калифу;
- индекс сдвига лейкоцитов (ИСЛ);
- индекс соотношения нейтрофилов и лимфоцитов (ИСНЛ);
- индекс соотношения лимфоцитов и моноцитов (ИСЛМ) [9; 10].

Результаты исследования и их обсуждение

Опираясь на существующие методы цитологической дозиметрии [11–13], нами проведен анализ динамики отдельных клеточных популяций периферической крови с учетом вида проведенного лечения у 66 пациентов с диагнозом рак поджелудочной железы, которые получали послеоперационное радиационное воздействие.

Проведение дистанционной гамма-терапии при РПЖ позволило добиться увеличения средней продолжительности жизни пациентов до 10,6 мес. Попытки проведения химиотерапии в самостоятельном режиме при РПЖ, по данным ряда исследователей, незначительно повышали эффективность лечения с увеличением средней продолжительности жизни пациентов [14]. В большинстве исследований химиопрепараты применяются в качестве радиосенсибилизаторов. Одновременное проведение химиотерапии и лучевого лечения при РПЖ представляет большие трудности из-за суммации их побочного эффекта. Отмечено, что последовательное применение лучевой и химиотерапии при комбинированном лечении было более эффективным и повышало продолжительность жизни пациентов [14].

В свою очередь, использование канцерицидных доз лучевой терапии и интенсивных схем полихимиотерапии ограничено побочными токсическими эффектами данных воздействий на организм, что ухудшает переносимость применяемой терапии, снижает качество жизни пациентов, может вести к отказу пациентов от необходимого лечения [14].

В связи с этим, необходимо рассмотреть индивидуальную радиочувствительность популяций клеток крови пациентов с РПЖ, получавших полихимиолучевую терапию (группа 1) и пациентов с лучевой адъювантной терапией (группа 2).

При анализе показателей периферической крови установлено, что до начала лечения (в исходном состоянии) среднее содержание тромбоцитов у пациентов с РПЖ находилось в пределах $310,14 \pm 126,59 \times 10^9/\text{л}$, что соответствует показателям нормы, с последующим снижением данного параметра после выполнения полихимиолучевого лечения до $205,00 \pm 94,01 \times 10^9/\text{л}$ на 1-е сутки, то есть в 1,51 раза с незначительным повышением до $214,71 \pm 100,16 \times 10^9/\text{л}$ на 7-е сутки после окончания терапии. В группе пациентов после лучевого воздействия уровень тромбоцитов понизился незначительно (до начала лечения – $293,58 \pm 85,13 \times 10^9/\text{л}$, на 1-е сутки после завершения лечения – $255,83 \pm 61,50 \times 10^9/\text{л}$) в 1,15 раза. Между двумя исследуемыми группами статистически значимых различий в процессе лечения по изученному показателю не было выявлено.

Лейкоциты являются одной из наиболее изученных клеточных популяций, широко используемых для целей индивидуальной биодозиметрии [11; 12]. При статистическом анализе уровня лейкоцитов в крови (рис. 1, 2) в процессе комплексного химиолучевого лечения у пациентов с РПЖ установлены статистически значимые сдвиги ($p_{\text{Фридман}} < 0,05$). Отмечено значительное снижение данного показателя во время проведения терапии (с $7,30 \pm 3,80 \times 10^9/\text{л}$ – до начала лечения, до $4,64 \pm 1,51 \times 10^9/\text{л}$ – на 0-е сутки) в 1,59 раза, с незначительным повышением на 1-е и 7-е сутки. В группе пациентов, получавших только лучевое воздействие, статистически значимых изменений данного показателя в процессе лечения не было выявлено.

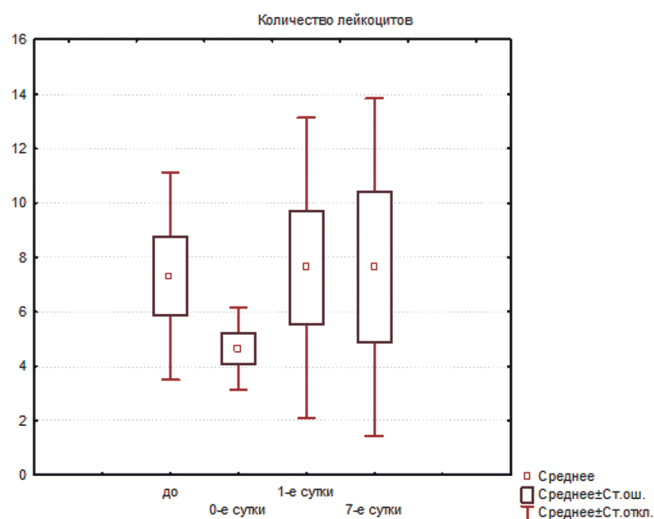


Рис. 1. Количество лейкоцитов у пациентов в процессе химиолучевой терапии ($p < 0,05$)

Fig. 1. The number of leukocytes in patients in the process of chemoradiotherapy ($p < 0.05$)

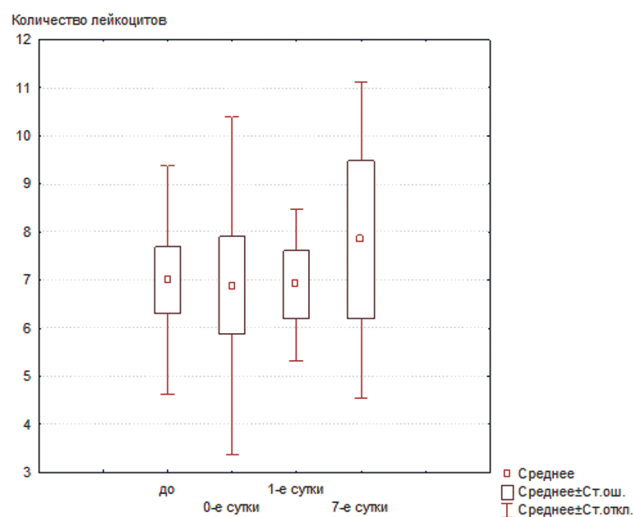


Рис. 2. Количество лейкоцитов у пациентов в процессе лучевой терапии ($p > 0,05$)

Fig. 2. The number of leukocytes in patients in the process of radiation therapy ($p > 0.05$)

Между двумя исследуемыми группами статистически значимых различий в процессе лечения по изученному показателю не было выявлено. Полученные данные, по нашему мнению, могут указывать на синергизм комплексного воздействия радиотерапии и цитостатических препаратов.

Лимфоциты представляют собой высокоспециализированную группу лейкоцитов, определяющую специфически сложно координированный иммунный ответ. Вследствие этого, данная клеточная популяция высоко чувствительна к радиационным воздействиям.

В результате анализа данных можно отметить, что относительное количество лимфоцитов у пациентов с РПЖ до начала лечения находилось в пределах нормы. Во время проведения адъювантной химиолучевой терапии выявлено снижение лимфоцитов в крови пациентов (с $29,26 \pm 13,39\%$ – до начала лечения, на 0-е сутки – $15,59 \pm 5,17\%$, на 1-е сутки после завершения терапии – $6,70 \pm 2,38\%$) – в 4,37 раза, с незначительным увеличением на 7-е сутки до $9,16 \pm 0,97\%$, что свидетельствует о высокой радиочувствительности данной популяции клеток крови ($p_{\text{Фридман}} = 0,041$). После окончания лучевой терапии относительное

количество лимфоцитов снизилось до $5,86 \pm 0,52$ %, что также свидетельствует о высокой радиочувствительности клеток. При выполнении только лучевого воздействия наблюдалось статистически значимое ($p_{\text{Фридман}} = 0,026$) снижение содержания лимфоцитов в крови пациентов с РПЖ на 1-е сутки после его окончания в 5,15 раза (с $29,25 \pm 10,44$ % до $5,69 \pm 1,63$ %).

Как следует из рис. 3 и 4, в процессе радиотерапии происходит опустошение популяции лимфоцитов у пациентов, страдающих раком поджелудочной железы ($p_{\text{Фридман}} < 0,05$).

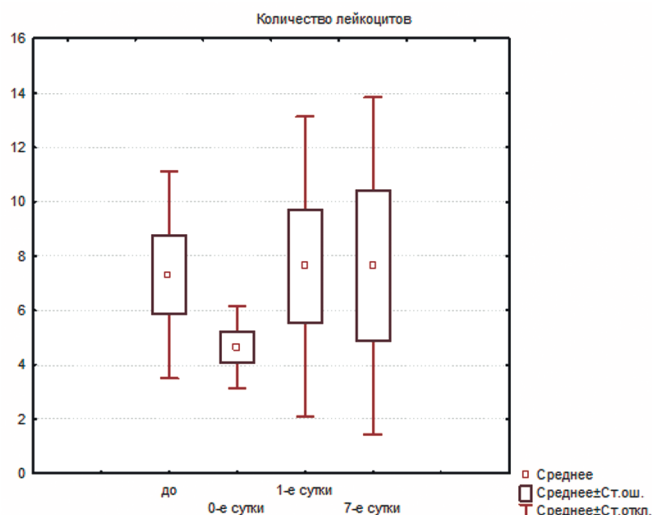


Рис. 3. Относительное количество лимфоцитов у пациентов с химиолучевой терапией ($p < 0,05$)

Fig. 3. Relative lymphocyte count in patients with chemoradiotherapy ($p < 0.05$)

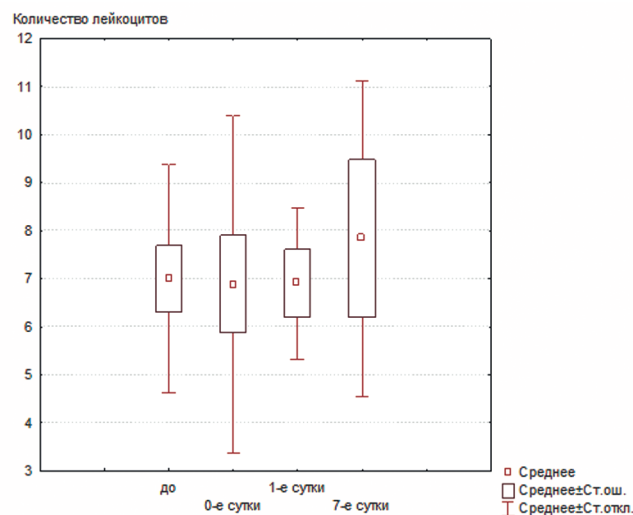


Рис. 4. Относительное количество лимфоцитов у пациентов с лучевой терапией ($p < 0,05$)

Fig. 4. Relative lymphocyte count in patients with radiation therapy ($p < 0.05$)

Высокий разброс значений показателя свидетельствует о различиях в индивидуальной радиочувствительности пациентов.

При отдельном анализе статистических данных содержания лимфоцитов в крови пациентов на 7-е сутки после завершения лечения (рис. 5), получавших полихимиолучевую (группа 1) – $9,16 \pm 0,97$ % и лучевую терапию (группа 2) – $6,03 \pm 2,23$ %, выявлены статистически значимые различия исследуемого показателя ($p_{\text{Манн-Уитни}} = 0,033$).

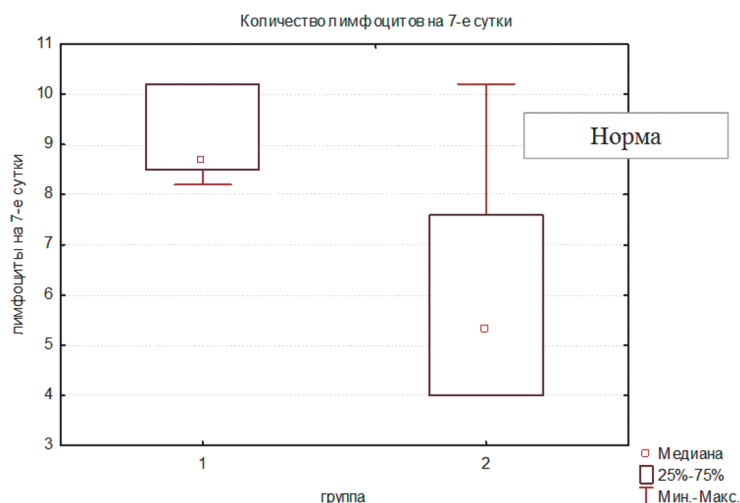


Рис. 5. Количество лимфоцитов у пациентов с РПЖ на 7-е сутки после комбинированного лечения

Fig. 5. The number of lymphocytes in patients with PC on the 7th day after combined treatment

При изучении динамики относительного числа нейтрофилов у пациентов с РПЖ выявлено незначительное их изменение. В 1-й группе пациентов, получивших послеоперационное химиолучевое воздействие, детектировано увеличение количества нейтрофилов как во время терапии ($71,87 \pm 4,78 \%$), так и после ее окончания на 1-е сутки ($79,71 \pm 4,78 \%$). На 7-е сутки после окончания лечения данный показатель начал снижаться и составил $78,36 \pm 6,31 \%$. В группе пациентов с монолучевой терапией относительное количество нейтрофилов возросло также незначительно: как во время терапии ($66,32 \pm 16,37 \%$), так и после ее окончания на 1-е сутки ($84,16 \pm 2,48 \%$), на 7-е сутки после окончания лечения данный показатель начал снижаться и составил $72,48 \pm 12,59 \%$ по отношению к исходным данным ($60,00 \pm 11,15 \%$). При сравнительном анализе данных после окончания лечения не выявлено статистически значимых различий в группах пациентов.

Относительное количество моноцитов у пациентов с раком поджелудочной железы в динамике послеоперационной терапии находилось в пределах нормы. Содержание моноцитов в крови у пациентов с комплексной химиолучевой терапией и с монолучевым воздействием не имело достоверных различий ($p_{\text{(Манн-Уитни)}} > 0,05$). В процессе проведения терапии не наблюдалось статистически значимых изменений данного показателя.

Использование математических интегральных показателей, часть которых изменяется уже в преднозологическом периоде или на самых ранних стадиях заболевания, позволяет, не прибегая к специальным методам исследования, оценить в динамике состояние различных звеньев иммунной системы.

На основе вышеприведенных данных показателей клеточной функциональной активности периферической крови представляется необходимым детально рассмотреть их динамику по интегральным индексам гомеостаза в группах пациентов с РПЖ, получивших полихимиолучевую терапию (группа 1) и лучевое лечение (группа 2).

Для определения норм интегральных показателей клеточной реактивности: лейкоцитарного индекса интоксикации (ЛИИ) по Я. Я. Кальф-Калифу, индекса сдвига лейкоцитов (ИСЛ), индекса соотношения нейтрофилов и лимфоцитов (ИСНЛ), индекса соотношения лимфоцитов и моноцитов (ИСЛМ), были изучены данные лейкограммы 30 клинически здоровых лиц. Данная группа соответствовала по полу и возрасту пациентам с РПЖ (табл. 2).

Таблица 2

Значения интегральных гематологических индексов у клинически здоровых лиц

Table 2

Values of integral hematological indices in clinically healthy individuals

Показатель, норма	ЛИИ	ИСЛ	ИСНЛ	ИСЛМ
отн. ед.	$1,01 \pm 0,06$	$2,30 \pm 0,09$	$2,67 \pm 0,09$	$5,78 \pm 0,73$

При изучении показателей лейкоцитарного индекса интоксикации по Кальф-Калифу у пациентов с РПЖ на 1-е сутки после окончания полихимиолучевой терапии выявлено превышение ($с 0,80 \pm 0,95$ до $1,93 \pm 1,48$ отн. ед.) в 2,41 раза значения параметра в контроле, что указывает на активизацию противовоспалительных процессов ($p_{\text{(Фридман)}} > 0,05$) и снижение данного показателя на 7-е сутки до $0,68 \pm 0,06$ отн. ед. Во второй группе пациентов на 1-е сутки после завершения адъювантного лечения данный показатель повышен ($с 0,81 \pm 0,81$ до $1,94 \pm 0,47$ отн. ед.) в 2,40 раза, с последующим повышением исследуемого показателя до $3,10 \pm 5,77$ отн. ед. ($p_{\text{(Фридман)}} > 0,05$). Между двумя исследуемыми группами статистически значимых различий в процессе лечения по изученному показателю не было выявлено.

При индивидуализированном анализе данных индекса сдвига лейкоцитов (ИСЛ) у пациентов, страдающих раком поджелудочной железы, установлено, что до начала терапии в обеих группах данный показатель находился в пределах нормы. В первой группе пациентов, получивших химиорадиотерапию, на 1-е сутки выявлен повышенный уровень параметра ИСЛ ($с 2,30 \pm 2,29$ до $5,81 \pm 1,36$ отн. ед.) в 2,53 раза. На 7-е сутки после завершения комбинированного воздействия в данной группе отмечена тенденция к снижению значений показателя ИСЛ с $до 3,33 \pm 1,43$ отн. ед. ($p_{\text{(Фридман)}} > 0,05$). У пациентов с РПЖ с адъювантной лучевой терапией индекс сдвига лейкоцитов на 1-е сутки после окончания лечения превышал значения показателя (до лечения – $2,01 \pm 0,96$, после лечения – $7,03 \pm 1,42$ отн. ед.) в 3,50 раза с последующим понижением исследуемого показателя на 7-е сутки до $5,17 \pm 3,33$ отн. ед. ($p_{\text{(Фридман)}} > 0,05$). Между группами пациентов, получивших комбинированную терапию и радиотерапию, после завершения лечения не установлено статистически значимых различий ($p_{\text{(Манн-Уитни)}} > 0,05$).

Повышение содержания в кровеносном русле клеточного пула нейтрофилов и уменьшение популяции лимфоцитов сопряжены с увеличением интегрального параметра индекса соотношения нейтрофилов и лимфоцитов (ИСНЛ) (рис. 6) в группе пациентов с адъювантной лучевой терапией. Результаты выполненных исследований показали, что проведение комплексной химиолучевой терапии связано с повышением уровня показателя ИСНЛ (исходное значение – $3,08 \pm 3,52$ отн. ед., на 1-е сутки после лечения – $13,42 \pm 6,94$ отн. ед.) в 4,36 раза с тенденцией к понижению на 7-е сутки после окончания лечения (до $6,20 \pm 3,15$ отн. ед.) ($p_{\text{Фридман}} > 0,05$). В результате статистического анализа данных пациентов 2-ой группы установлено значительное повышение параметра ИСНЛ (с $2,28 \pm 1,11$ до $15,93 \pm 5,79$ отн. ед. на 1-е сутки после лучевой терапии) в 7,0 раз с постепенным понижением на 7-е сутки до $13,45 \pm 4,35$ отн. ед. ($p_{\text{Фридман}} = 0,026$). Это свидетельствует о более выраженном терапевтическом эффекте радиационного лечения (рис. 6, 7).

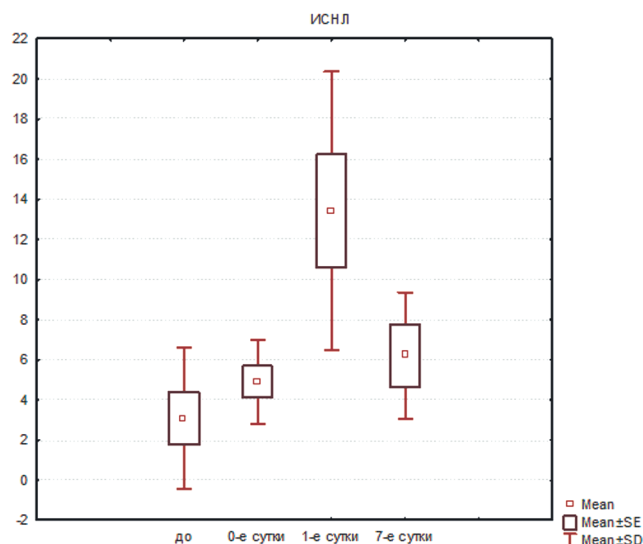


Рис. 6. Динамика изменения показателя ИСНЛ в процессе химиолучевой терапии ($p > 0,05$)

Fig. 6. The dynamics of changes in the rate of IRNL in the process of chemoradiotherapy ($p > 0.05$)

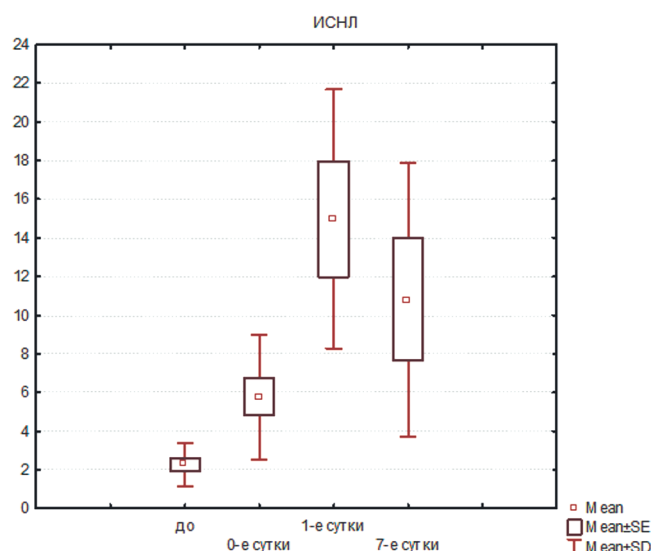


Рис. 7. Динамика изменения показателя ИСНЛ в процессе лучевой терапии ($p < 0,05$)

Fig. 7. The dynamics of changes in the rate of IRNL in the process radiation therapy ($p < 0.05$)

Сравнительный анализ индивидуальных значений ИСНЛ (рис. 8) показал, что на 7-е сутки после окончания лечения выявлено статистически значимое различие в уровне изучаемого показателя между 1-ой и 2-ой группами пациентов с РПЖ ($p_{\text{Манн-Уитни}} < 0,05$).

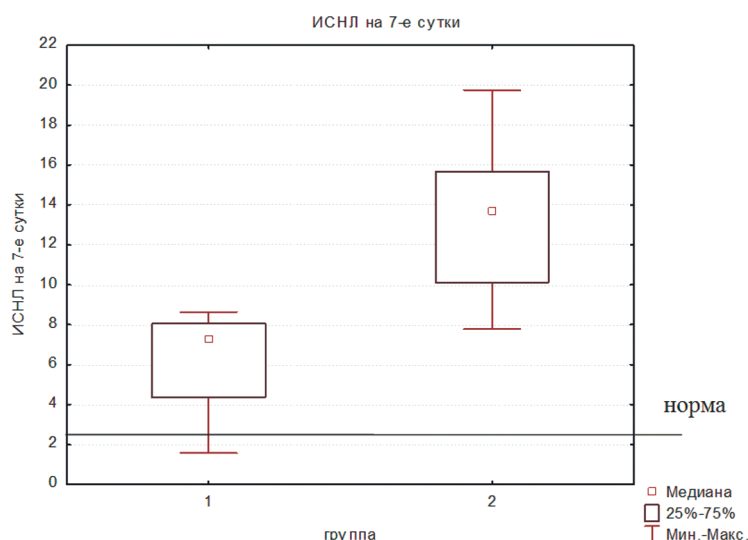


Рис. 8. Уровень ИСНЛ у пациентов с РПЖ на 7-е сутки после окончания лечения

Fig. 8. The level of IRNL in patients with PCon the 7th day after the end of treatment

Результат проведенных исследований выявил, что у пациентов, страдающих раком поджелудочной железы, проведение специального лечения сопряжено с угнетением функции аффекторных клеток иммунитета и неспецифическим понижением индекса соотношения лимфоцитов и моноцитов (ИСЛМ). Изучение динамики индекса соотношения лимфоцитов к моноцитам выявило (рис. 9, 10), что данный показатель значимо изменялся в процессе лечения, что характеризует его высокую радиочувствительность и отражает эффективность проведенной терапии ($p_{\text{Фридман}} < 0,05$).

В ходе проведенного статистического анализа было установлено, что в 1-ой группе пациентов ИСЛМ значимо ($p_{\text{Фридман}} = 0,019$) снижался в процессе комплексного лечения (до начала лечения – $4,06 \pm 1,73$ отн. ед., на 1-е сутки после окончания химиолучевой терапии – $0,90 \pm 0,43$ отн. ед.) в 4,51 раза с постепенным повышением на 7-е сутки до $1,73 \pm 1,56$ отн. ед. Во 2-ой группе пациентов выявлено статистически значимое ($p_{\text{Фридман}} = 0,044$) понижение исследуемого показателя в 4,38 раза (с $5,39 \pm 3,51$ отн. ед. до $1,23 \pm 0,43$ отн. ед.).

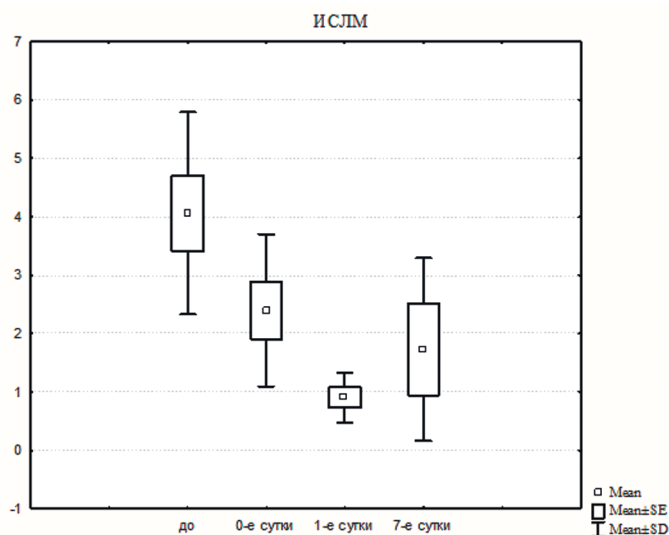


Рис. 9. Динамика уровня параметра ИСЛМ в процессе химиолучевой терапии

Fig. 9. Dynamics of the level of IRLM parameter during chemoradiotherapy

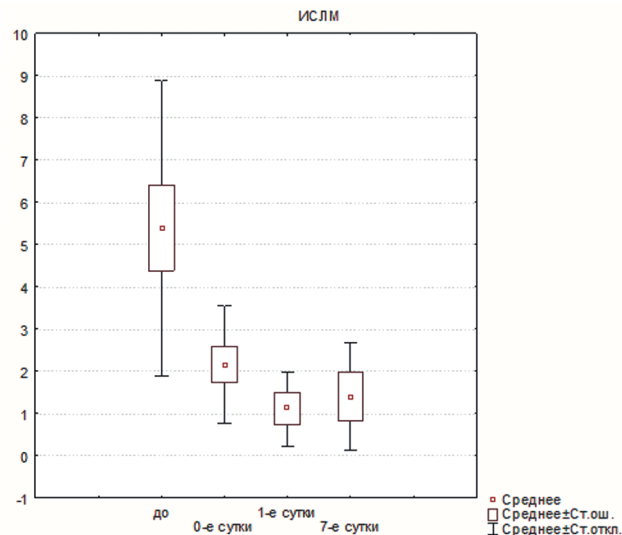


Рис. 10. Динамика уровня параметра ИСЛМ в процессе лучевой терапии

Fig. 10. Dynamics of the level of IRLM parameter in the process of radiation therapy

Между двумя исследуемыми группами статистически значимых различий в процессе лечения по изученному показателю не было выявлено.

При статистическом анализе уровня лейкоцитов в крови в процессе комплексного химиолучевого лечения у пациентов с РПЖ установлено значимые изменения ($p_{\text{Фридман}} < 0,05$). В процессе радиотерапии происходит снижение относительного количества лимфоцитов у пациентов, страдающих раком поджелудочной железы ($p_{\text{Фридман}} < 0,05$). При отдельном анализе статистических данных содержания лимфоцитов в крови пациентов, получавших полихимиолучевую (группа 1) и лучевую терапию (группа 2), на 7-е сутки после завершения лечения выявлены статистически значимые различия исследуемого показателя ($p_{\text{Манн-Уитни}} < 0,05$).

Количественно-качественная оценка изменения гемограммы ($p_{\text{Фридман}} < 0,05$) у пациентов, получавших адъювантную лучевую терапию, выявила увеличение (в 7,0 раза) параметров индекса соотношения нейтрофилов и лимфоцитов, снижение индекса соотношения лимфоцитов и моноцитов (4,38 раза). В группе пациентов, которым выполнена комплексная химиолучевая терапия, установлено снижение в 4,5 раза индекса соотношения лимфоцитов и моноцитов ($p_{\text{Фридман}} < 0,05$). При отдельном анализе статистических данных ИСНЛ между исследуемыми группами пациентов на 7-е сутки после завершения лечения выявлены статистически значимые различия исследуемого показателя ($p_{\text{Манн-Уитни}} < 0,05$).

Таким образом, по нашим данным, популяция лейкоцитов более чувствительна к комплексной химиолучевой терапии, а интегральный параметр эндогенной интоксикации ИСНЛ отражает выраженный терапевтический эффект радиотерапии

Заключение

Таким образом, проведенная радиационная терапия оказывает модифицирующее воздействие на клеточный гомеостаз пациентов, страдающих раком поджелудочной железы.

В результате исследования установлено, что при анализе данных клеточных показателей крови пациентов, страдающих раком поджелудочной железы, наиболее радиочувствительным звеном являются лимфоциты. Нарастание абсолютного количества лейкоцитов с увеличением доли юных форм является неспецифическим признаком компенсаторно-адаптационной реакции организма в раннем посттерапевтическом периоде после комплексного химиолучевого воздействия. При благоприятном течении выявленные изменения в лейкограмме регрессируют, а снижение общего числа лейкоцитов с увеличением относительного содержания нейтрофильных форм свидетельствует об увеличенном расходе лейкоцитов в очагах повреждения и неблагоприятном прогнозе на индивидуальном уровне.

Согласно вышеизложенному, представляется обоснованным заключить, что изученные показатели реактивности гомеостаза, величина которых коррелирует с составом определенных клеточных популяций, отражают индивидуальную реакцию организма на радиационное воздействие. По нашим данным, такие гомеостатические показатели организма, как ИСНЛ и ИСЛМ, являются наиболее информативными и могут иметь поэтому высокую диагностическую значимость в оценке эффективности проводимой терапии у пациентов, страдающих раком поджелудочной железы.

Библиографические ссылки

1. Rawla P, Sunkara T, Gaduputi V. Epidemiology of Pancreatic Cancer: Global Trends Etiology and Risk Factors. *World Journal Oncology*. 2019;1(1):10–27. DOI:10.14740/wjon1166
2. Zhen DB, Rabe KG, Gallinger S et.al. BRCA1, BRCA2, PALB2, and CDKN2A Mutations in Familial Pancreatic Cancer (FPC): A PACGENE Study. *Genetic medicine*. 2015;17(7):569–577. DOI: 10.1038
3. Verbeke CS. Resection margins in pancreatic cancer. *The surgical clinics of North America*. 2013;93:647–662.
4. Marsh RW, George T. Rationale and appropriate use of chemotherapy and radiotherapy for pancreatic ductal adenocarcinoma. *Current Gastroenterology Reports*. 2006;8:111–120.
5. Binmoeller KF. EUS-guided drainage of pancreatic fluid collections using fully covered self-expandable metal stents. *Gastroenterology and hepatology*. 2013;9:442–444.
6. Ревтович МЮ, Смолякова РМ, Шмак АИ. Показатели клеточной реактивности после проведения интраоперационной гипертермохимиотерапии у пациентов с резектабельным раком желудка. *Экологический вестник*. 2013;4(26):25–33.
7. Власов АП, Крылов ВГ, Григорьева ТИ и др. Коррекция синдрома эндогенной интоксикации при остром панкреатите. *Хирургия*. 2010;5:60–64.
8. Принькова ТЮ, Прохорова ВИ, Хотько ЕА и др. Лабораторные показатели эндогенной интоксикации при раке тела матки и значение их определения для оценки стадии и степени дифференцировки опухоли. Лабораторная диагностика. *Восточная Европа*. 2012;4:79–87.
9. Смолякова РМ, Машевский АА, Прохорова ВИ и др. Оценка эндогенной интоксикации и прогнозирование гнойно-воспалительных осложнений у онкологических больных по лабораторным показателям крови: инструкция по применению № 20–0205 МЗ РБ. Минск: НИИ ОМР им. Н.Н. Александрова; 2005. 11 с.
10. Сакович АР. Характеристика интоксикации при остром гнойном синусите с позиции комплексной оценки. *Медицинский журнал*. 2014;4:109–112.
11. Пяткин ЕК, Баранов АЕ. Биологическая дозиметрия с помощью анализа аберрантных хромосом и количества клеток в периферической крови. Итоги науки и техники. Винити. АН СССР. Серия радиационная биология. Москва: [б.и.]; 1980. Том 3. 145 с.
12. Мельнов СБ. Биологическая дозиметрия: теоретические и практические аспекты. Минск: Белорусский комитет «Дзеці Чарнобыля»; 2002. 192 с.
13. Lassmann M, Chiesa C, et al. EANM Dosimetry Committee guidance document: good practice of clinical dosimetry reporting. *European Journal Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2011;38:192–200. DOI: 10.1007/s00259-010-1549-3.
14. Лобинский АА. Комбинированное лечение местнораспространенного рака поджелудочной железы [диссертация]. Минск: НИИ онкологии и мед. радиологии им. Н. Н. Александрова; 1999. 16 с.

References

1. Rawla P, Sunkara T, Gaduputi V. Epidemiology of Pancreatic Cancer: Global Trends Etiology and Risk Factors. *World Journal Oncology*. 2019;1(1):10–27. DOI:10.14740/wjon1166
2. Zhen DB, Rabe KG, Gallinger S et.al. BRCA1, BRCA2, PALB2, and CDKN2A Mutations in Familial Pancreatic Cancer (FPC): A PACGENE Study. *Genetic medicine*. 2015;17(7):569–577. DOI: 10.1038
3. Verbeke CS. Resection margins in pancreatic cancer. *The surgical clinics of North America*. 2013;93:647–662.
4. Marsh RW, George T. Rationale and appropriate use of chemotherapy and radiotherapy for pancreatic ductal adenocarcinoma. *Current Gastroenterology Reports*. 2006;8:111–120.
5. Binmoeller KF. EUS-guided drainage of pancreatic fluid collections using fully covered self-expandable metal stents. *Gastroenterology and hepatology*. 2013;9:442–444.
6. Revtovich MJ, Smolyakova RM, Shmak AI. Indicators of cellular reactivity after intraoperative hyperthermochemotherapy in patients with resectable gastric cancer. *Ecological Bulletin*. 2013;4(26):25–33.

7. Vlasov AP, Krylov VG, Grigoryeva TI and others. Correction of endogenous intoxication syndrome in acute pancreatitis. *Surgery*. 2010;5:60–64.
8. Prinkova TU, Prokhorova VI, Khotko EA et al. Laboratory indicators of endogenous intoxication in cancer of the uterus and the significance of their determination to assess the stage and degree of tumor differentiation. Laboratory diagnostics. *Eastern Europe*. 2012;4:79–87.
9. Smolyakova RM, Mashevsky AA, Prokhorov VI, et al. Evaluation of endogenous intoxication and prognosis of purulent-inflammatory complications in cancer patients by laboratory blood parameters: instruction for use No. 20-0205 MH RB. Minsk: Research Institute of OMR named after N.N. Alexandrova; 2005. 11 p.
10. Sakovich AR. Characterization of intoxication in acute purulent sinusitis from the perspective of a comprehensive assessment. *Medical Journal*. 2014;4:109–112.
11. Pyatkin EC, Baranov AE. Biological dosimetry using analysis of aberrant chromosomes and the number of cells in peripheral blood. Results of science and technology. Viniti. AN SSSP. Ser. rad biol. Moscow, 1980;3; 145 p.
12. Melnov SB. Biological dosimetry: theoretical and practical aspects. Minsk: Belarusian Committee of «Dzetsi of Chernobyl»; 2002. 192 p.
13. Lassmann M, Chiesa C, Flux G, et al. EANM Dosimetry Committee guidance document: good practice of clinical dosimetry reporting. *European Journal Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2011;38:192–200. DOI: 10.1007/s00259-010-1549-3.
14. Lobinsky AA. Combined treatment of locally advanced pancreatic cancer [dssertation]. Minsk: Research Institute of Oncology and honey. Radiology named after N.N. Alexandrova; 1999. 16 p.

Статья поступила в редколлегию 11.05.2020.
Received by editorial board 11.05.2020.

УДК 53.072.8

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕКОНСТРУКЦИИ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПЭТ/КТ ДИАГНОСТИКЕ

Е. В. ЕМЕЛЬЯНЕНКО¹⁾, И. Г. ТАРУТИН¹⁾

¹⁾Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова,
аг. Лесной, 223040, Минский район, Беларусь

Позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией, является инновационным и активно развивающимся методом радионуклидной диагностики. Томографы оснащены мощным программно-аппаратным комплексом для использования эффективности которого необходимо выполнение полноценного исследования. Возможности программного обеспечения позволяют влиять пользователю на качество диагностического изображения. Кроме того, получение изображений с использованием времяпролетной технологии также может вносить изменение во вклад шумовой компоненты и контраста, что подтверждает необходимость исследований, направленных на гармонизацию и оптимизацию методик исследования. Выполнена оценка влияния длительности исследования на качество изображения. Рассмотрено влияние количества итераций и подмножеств реконструкционного алгоритма, а также функции рассеяния на качество изображения. Получена оценочная модель, в которой учтено влияние количества итераций и подмножеств на шум.

Ключевые слова: итерация; подмножество; фантом; изображение; позитронно-эмиссионный томограф; компьютерный томограф; время пролета.

Образец цитирования:

Емельяненко ЕВ, Тарутин ИГ. Влияние параметров реконструкции на качество изображений в ПЭТ/КТ диагностике. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:51–58.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-51-58>

For citation:

Emelyanenko EV, Tarutin IG. Influence of reconstruction parameters on the quality of the diagnostic image. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:51–58. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-51-58>

Авторы:

Евгений Владимирович Емельяненко – магистр технических наук, аспирант; инженер лаборатории позитронно-эмиссионной томографии.

Тарутин Игорь Германович – доктор технических наук, профессор; главный научный сотрудник отдела лучевой терапии.

Author:

Yaheni V. Emelyanenko, master of technical sciences, postgraduate student; engineer of the positron emission tomography laboratory.
zheka-ava@mail.ru

Igor G. Tarutin, doctor of sciences (engineering), professor; chief researcher at the department of radiation therapy.
itarutin@tut.by

INFLUENCE OF RECONSTRUCTION PARAMETERS ON THE QUALITY OF THE DIAGNOSTIC IMAGE

E. V. EMELYANENKO^a, I. G. TARUTIN^a

^aN. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus

Liasny agro-town, Minsk District 223040, Belarus

Corresponding author: E. Emelyanenko (zheka-ava@mail.ru)

Positron emission tomography combined with computed tomography is an innovative and rapidly developing method of radionuclide diagnostics. Tomographs are equipped with a powerful hardware-software complex. For the effective use of equipment, a full-fledged study of the capabilities of the software and the operating modes of the device is necessary. Software features allow the user to influence the quality of the diagnostic image. Using time-of-flight technology, additional correction algorithms can also affect the contribution of the noise component and contrast. These aspects confirm the need for research aimed at harmonizing and optimizing research methods. In this paper, we estimated the impact of the duration of the study on image quality, taking into account the technical capabilities of the equipment. The influence of the number of iterations and subsets of the reconstruction algorithm, as well as the scattering function on the image quality are considered.

Key words: image quality; protocol; phantom; image; positron emission tomograph; computer tomograph; time-of-flight.

Введение

Позитронно-эмиссионная томография совмещенная с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ), является перспективным и развивающимся средством радионуклидной диагностики. Данный метод позволяет выявлять не только метаболические, но и морфологические изменения органов и систем организма человека, осуществляет диагностику в области неврологии (височная эпилепсия), кардиологии (оценка жизнеспособности миокарда), онкологии [1].

В Республике Беларусь установлено четыре комбинированных ПЭТ-КТ-сканера производства General Elektrik (Discovery 710 и два Discovery IQ) и один томограф производства Siemens. ПЭТ/КТ является развивающейся методикой в стране и требует достаточно углубленного изучения программно-аппаратного комплекса для полноценного использования всех возможностей оборудования. Итоговой задачей исследования является формирование качественного, высокоинформативного изображения, свободного от артефактов.

Основными этапами получения диагностического изображения является регистрация излучения детектирующей системой ПЭТ, источником которого является радиофармацевтический препарат, введенный пациенту и накапливающийся в потенциальном патологическом очаге, реконструкция изображения и последующее совмещение с КТ изображением, полученным предварительно. Совмещенное изображение позволяет получить целостную картину метаболической активности и анатомической информации, что обеспечивает достаточно точную локализацию очага накопления РФП.

Точность и корректность информации получаемой на ПЭТ-КТ-изображениях, в значительной степени зависит от технических характеристик томографа, возможностей программного обеспечения, однако нуждается в своевременном и периодическом контроле. Нынешние стандарты радионуклидной диагностики имеют достаточно высокие требования к качеству получаемого изображения, а также радиационной нагрузке на пациента. Грамотно сформированные протоколы исследования, в которых учитываются возможности детектирующей системы, программного обеспечения, особенности патологии являются основой получения информативного и корректного изображения [2]. Качество изображения можно оценить значениями величин контраста и шума.

Цель исследования: сравнение методов реконструкции изображения с учетом длительности его изучения; оценка влияния параметров итерационного алгоритма (количества итераций и подмножеств на качество изображения).

Исследование направлено на улучшение качества визуализации и диагностической процедуры. Следует отметить, что результаты данной работы используются в практической деятельности республиканского ПЭТ-центра.

Получены модели, позволяющие оценивать совместное влияние числа итераций и подмножеств на качество диагностического изображения; выполнена оценка влияния PSF-функции на качество изображения с учетом длительности исследования. Данное исследование впервые проведено на территории Республики Беларусь; методика, реализованная в данной работе, может быть адаптирована для выполнения подобных исследований с целью гармонизации протоколов сканирования пациентов.

Особенности получения и реконструкции изображений в ПЭТ/КТ

Качество итогового, реконструированного изображения определяется рядом параметров и характеристик: детектирующая система (с учетом кристаллов и системы последующей обработки сигнала), длительность исследования, корректность калибровки, полное соблюдение условий исследования пациентов, тип реконструкционного алгоритма и используемые параметры реконструкции, длительность исследования. Даже в случае соблюдения режимов технического обслуживания и калибровок, а также обеспечения идеальных условий обследования, возникнет необходимость в выполнении дополнительной реконструкции, направленной, например, на подавление шума или увеличение контраста изображения [3; 4].

Длительность исследования является одним из определяющих факторов, которые могут влиять как на качество диагностического изображения, так и на пропускную способность оборудования. Сокращение времени сканирования одного участка тела на 1, позволяет сократить длительность исследования от 6 до 15 мин и увеличить проходимость томографа.

Программное обеспечение дает возможность пользователю варьировать широким диапазоном параметров реконструкционного алгоритма. Также существует ряд фильтров, использование которых позволяет изменять качество изображения. В современной позитронно-эмиссионной томографии активно используются итерационные алгоритмы, которые пришли на смену алгоритмам, построенным на обратных проекциях (FBP). На оборудовании, рассматриваемом в данной работе, используется итерационный алгоритм OSEM (или VPHD). Пользователь может менять количество используемых итераций и подмножеств (количество свободных проекций) с целью изменения качества изображения [5; 6]. Учитывая, что в литературных источниках, как правило, рассматривается влияние количества итераций на шум и контраст при стабильном числе подмножеств, целесообразно рассмотреть более сложной модели, которая позволит учесть каждый из факторов.

Детектирующая система (количество колец детектора, тип кристаллов) оказывает значительное влияние на пространственное разрешение, точность локализации события аннигиляции и качество финального изображения. На томографах, оснащенных детектирующей системой с кристаллами LYSO, реализована времяпролетная технология TOF.

Программно-аппаратный комплекс DISCOVERY 710 позволяет собирать данные с учетом времени пролета (TOF) и выполнять последующие реконструкции на их основе. Времяпролетная технология (TOF) является современным методом получения изображения и повышения качества за счет уточнения локализации события. Наличие TOF позволяет получать изображения с повышенным пространственным разрешением и чувствительностью. Совместно с TOF возможно включение реконструкций с использованием итерационных алгоритмов. Немаловажно отметить, что возможны различные комбинации параметров, а именно количества подмножеств, итераций, размерность матрицы, что соответственно вносит немалый вклад в формирование качественных и количественных показателей [7].

Отдельный интерес представляет реконструкция PSF, использование которой (по заявлению производителей оборудования и зарубежных источников) позволяет получать изображения с улучшенным изотропным пространственным разрешением, уменьшенным «разливом» и, в конечном счете, повышенной концентрацией активности (Бк/мл) или стандартизированным значением поглощения (SUV) в небольших очагах, которые, таким образом легче обнаружить и охарактеризовать. В рассмотренных зарубежных исследованиях не описано влияние данной функции на шумоподавление и контраст на разных временных промежутках исследования [8].

Важным преимуществом позитронно-эмиссионной томографии является возможность получения количественной информации: количество РФП в рассматриваемом объеме патологического очага. На основе количественной информации выполняется оценка развития патологического процесса.

Все рассматриваемые параметры программного обеспечения могут быть применены на усмотрение пользователя, что достаточно часто основывается на субъективном первичном восприятии изображения.

Детальный анализ возможностей оборудования позволит наиболее точно оценивать разницу при анализе динамики патологического процесса между исследованиями, полученными из разных лечебных учреждений и на различном оборудовании.

Материалы и методы исследования

Процедура сканирования выполнена на позитронно-эмиссионном томографе, совмещенном с компьютерным томографом DISCOVERY 710. Система DISCOVERY 710 построена на базе кристаллов LYSO, которые позволяют реализовать метод TOF. Предварительно были выполнены процедуры контроля качества для обеспечения гарантии надежности эксперимента. Результаты тестов и калибровок

(ежедневный контроль качества, обновление коэффициента усиления) соответствуют требованиям технической документации производителя. Сканирование проводилось с использованием фантома Jackzack (рис. 1). Холодные сферы были заменены на 5 горячих сфер диаметрами 34,1 см, 26,5 см, 21,5 см, 14,8 см, 9,8 см. Соотношение концентраций РФП сфер и фона 1:16.



Рис. 1. Фантом Jackzack

Fig. 1. Jackzack Phantom

Для симулирования накопления РФП был использован ^{18}F -ФДГ. Измерение и дозирование РФП было выполнено с использованием системы автоматического дозирования (автоматический инъектор KARL 100) и установленного калибратора активности ISOMED.

В ходе эксперимента были получены серии ПЭТ/КТ-изображений. Выполнено контурирование сфер на серии КТ-изображений. С помощью специальной функции PROPAGATE контуры были перенесены на ПЭТ-изображения с целью минимизации ошибок, связанных с нанесением контура «вручную». Выполнены измерения следующих параметров:

- 1) значения максимумов объемных активностей;
- 2) значения средних объемных активностей РФП;
- 3) значения фона;
- 4) стандартное отклонение.

По полученным данным высчитывались контраст и шум. В данной работе контраст и шум высчитывались по соответствующим формулам (1) и (2):

$$\text{Contrast} = \frac{\text{signal} - \text{bacg}}{\text{bacg}}, \quad (1)$$

$$\text{Noise} = \frac{\delta \text{bcg}}{\text{bacg}}, \quad (2)$$

где signal – среднее значение объемной активности в интересующей области внутри очага поражения (в данном случае в сферах); bacg – среднее значение объемной активности в области, локализованной в довольно однородной области за пределами очага поражения; δbcg – стандартное отклонение значений фона.

Выполнена оценка изменения шума и контраста на сериях реконструированных изображений. Значения signal, bacg усреднены. Значения шума и контраста представлены в относительных единицах.

Для оценки оптимального метода реконструкции с учетом длительности исследования, выполнены сканирования фантома длительностью от 1 до 5 мин с шагом 1 мин. Все исследования выполнялись со следующими статическими параметрами: матрица 256x256, количество итераций 2, количество подмножеств 12. Изменяемые параметры: TOF (времяпролетная технология включена), TOF+PSF (включена времяпролетная технология и PSF функция), VPHD (времяпролетная технология отключена, производится стандартный набор данных и последующая реконструкция), VPHD+PSF.

Для оценки влияния итерационного алгоритма на качество изображения использованы следующие параметры: интервал итераций от 2 до 7; подмножества 6, 12, 24, 32. Длительность исследования 5 мин, реконструкционный алгоритм VPHD (функция PSF включена).

Как правило, подобные эксперименты выполняются с фантомом IEC, где измерение фоновых значений выполняется по диаметру всего фантома (12 измерений, площадь области интереса соответствует площади каждой из сфер). В данной работе измерение фона выполнялось в центре фантома, что обусловлено техническими особенностями данного оборудования.

Результаты исследования и обсуждение

Сравнение методов реконструкции изображения с учетом длительности исследования. Целью данного исследования является оценка разницы полуколичественных и качественных параметров изображения при использовании метода сбора данных TOF с учетом функции PSF (TOF+PSF), без учета функции PSF (TOF), алгоритма реконструкции VPHD с учетом функции PSF и VPHD без учета PSF.

Результаты анализа шума нанесены на график (рис. 2) с учетом метода реконструкции/сбора и времени сбора данных.

Очевидно, что минимизация временного промежутка исследования влияет на увеличение шума. Одно-минутные исследования – это достаточно редкая практика. Исследование проводится в случае распространенного процесса и большого количества очагов. Интервал 4–5 мин является достаточно эффективным, однако уменьшает пропускную способность оборудования. Временные промежутки 3 и 4 мин характеризуются незначительным стандартным отклонением по сравнению с участком 1–2 мин. Отмечается значительное влияние PSF-функции на подавление шума, что подчеркивает целесообразность ее использования не только с целью коррекции пространственного разрешения, но и подавление шума при сокращении длительности исследования. Шум уменьшается в соответствии со следующим неравенством: $TOF > VPHD > TOF+PSF > VPHD+PSF$. В случае TOF функция PSF сокращает уровень шума на 20 % на временном промежутке исследования 2 мин. В отсутствии времяпролетного метода и использования PSF с VPHD, шум понижен на 40 %.

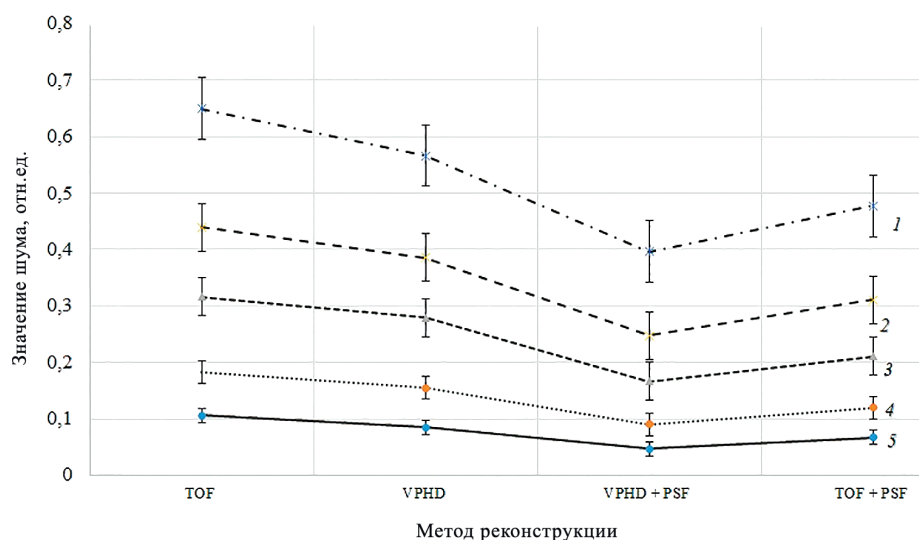


Рис. 2. Влияние метода на шум с учетом длительности исследования:

1 – длительность 1 мин, 2 – длительность 2 мин,
3 – длительность 3 мин, 4 – длительность 4 мин, 5 – длительность 5 мин

Fig. 2. Effect of the method on noise taking into account the duration of the study:

1 – duration 1 minute, 2 – duration 2 minutes, 3 – duration 3 minutes, 4 – duration 4 minutes, 5 – duration 5 minutes

Вычисленные и усредненные значения контраста нанесены на график (рис. 3). Ломанные линии характеризуют временные участки соответствующей длительности, а узлам ломаной соответствует метод реконструкции/сбора данных на рассматриваемом временном промежутке (и уровень контраста).

Контраст уменьшается в соответствии со следующим неравенством: $TOF+PSF > VPHD+PSF > VPHD$. Использование функции PSF оказывает влияние на величину контраста. Также отмечается повышенное значение контраста на каждом из временных промежутков при использовании TOF (рис. 3). Полученные результаты исследования используются специалистами для оценки шума и контраста, при описании специалистами диагностических изображений. Аналитические данные учитываются также при оценке динамики развития патологических очагов и последующего планирования лечения, а также диагностических процедур.

Влияние количества итераций и подмножеств на качество изображения. В данном исследовании влияние количества итераций на качество изображений оценено на реконструкциях, выполненных с алгоритмом VPHD и включением PSF-функции. Рассчитаны средние значения шума (по 5-ти сферам). Полученные значения нанесены на график (рис. 4.) Зависимость шума от количества итераций описывается линейной зависимостью с высоким коэффициентом аппроксимации. Шум возрастает прямо пропорционально числу используемых итераций.

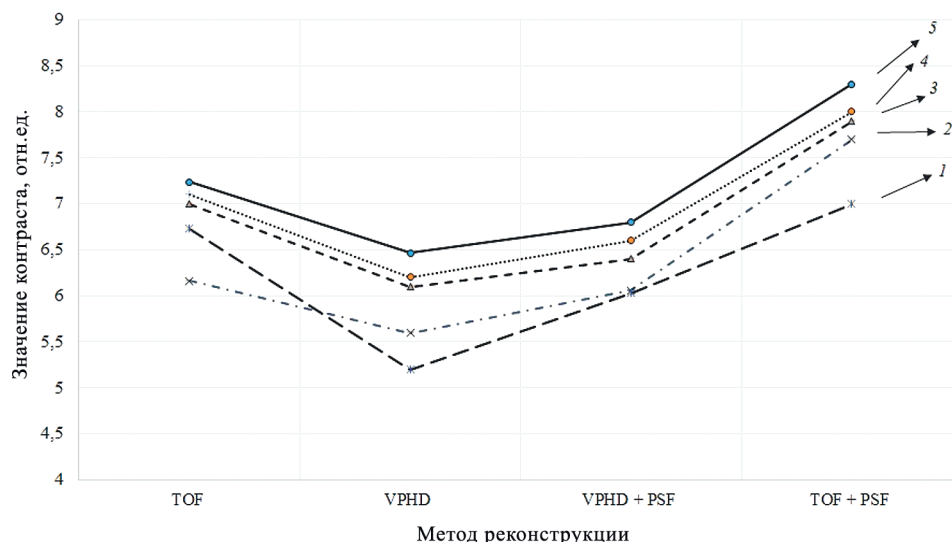


Рис. 3. Влияние метода на контраст с учетом длительности исследования:

1 – длительность 1 мин, 2 – длительность 2 мин,
3 – длительность 3 мин, 4 – длительность 4 мин, 5 – длительность 5 мин

Fig. 3. Effect of the method on contrast taking into account the duration of the study:

1 – duration 1 minute, 2 – duration 2 minutes, 3 – duration 3 minutes, 4 – duration 4 minutes, 5 – duration 5 minutes

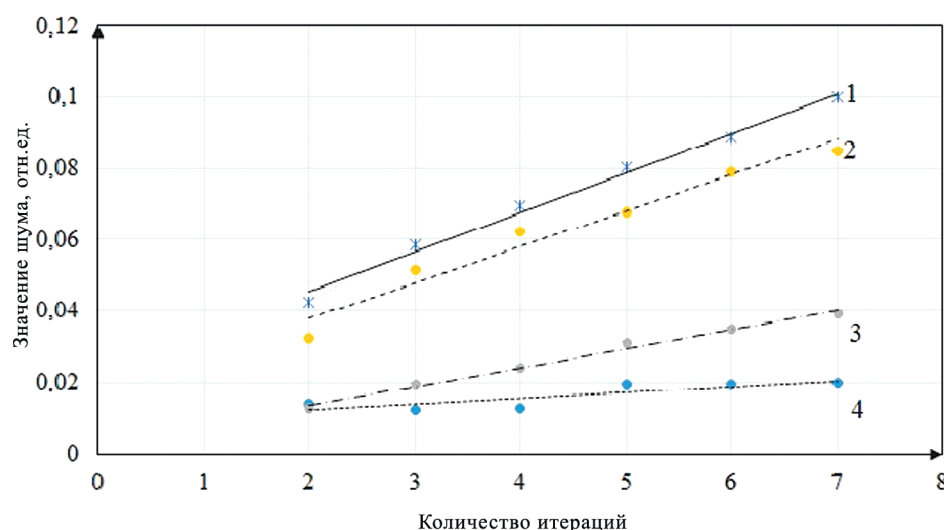


Рис. 4. Влияние количества итераций на шум с учетом подмножеств:

1 – 32 подмножества, 2 – 24 подмножества, 3 – 12 подмножеств, 4 – 6 подмножеств

Fig. 4. Effect of the number of iterations on noise considering subsets:

1 – 32 subsets, 2 – 24 subsets, 3 – 12 subsets, 4 – 6 subsets

Получены следующие функции с соответствующими коэффициентами аппроксимации:

1) $Noise = 0,0111 \times x + 0,0233$, $R^2 = 0,99$ (32 подмножества);

2) $Noise = 0,0101 \times x + 0,0177$, $R^2 = 0,96$ (24 подмножества);

3) $Noise = 0,0053 \times x + 0,0029$, $R^2 = 0,98$ (12 подмножеств);

4) $Noise = 0,0017 \times x + 0,0089$, $R^2 = 0,69$ (6 подмножеств).

Рассматриваемые выше функции характеризуют зависимость шума от количества итераций на каждом из подмножеств рассматриваемого диапазона отдельно (полный диапазон представлен подмножествами от 1 до 48). Указанные значения подмножеств наиболее часто используются в практической деятельности. Зависимость шума от количества подмножеств также является линейной, однако изменения количества

подмножеств в случае, когда значение итераций остается неизменным, приводит к изменению шума с большим шагом.

Количество подмножеств и итераций коррелирует со значением шума. Выполнен многофакторный регрессионный анализ. На основе полученных данных (табл. 1) получена модель, использование которой позволит оценить и сравнить совместное влияние количества итераций и подмножеств на уровень шума. Коэффициент детерминации полученной модели $R^2 = 0,59$.

Таблица 1

Результаты регрессионного анализа

Table 1

The results of the regression analysis

	Значение коэффициентов	Стандартная ошибка	Статистическая значимость
Свободный член	-0,015	0,005	$p < 0,05$
Коэффициент (1) <i>it</i>	0,0069	0,0011	$p < 0,05$
Коэффициент (2) <i>subs</i>	0,0016	0,0002	$p < 0,05$

Модель имеет следующий вид:

$$\text{Noise} = -0,015 + 0,0069 \times it + 0,0016 \times subs, \quad (3)$$

где *it* – количество итераций, *subs* – количество подмножеств.

Рассматриваемый диапазон подмножеств в данной работе начинается с 6, что объясняется следующими факторами:

- исследуемые значения подмножеств применяются в практической деятельности при формировании диагностических протоколов пациентов;
- результатом использования подмножеств в интервале 1–3 может быть отрицательный контраст, что свидетельствует о потере диагностической информации.

Рассчитано значение контраста на каждой из итераций. Точки на графике (рис. 5) соответствуют средним значениям (по 5-ти сферам). Полученные зависимости значений контраста от количества итераций описываются логарифмическими функциями.

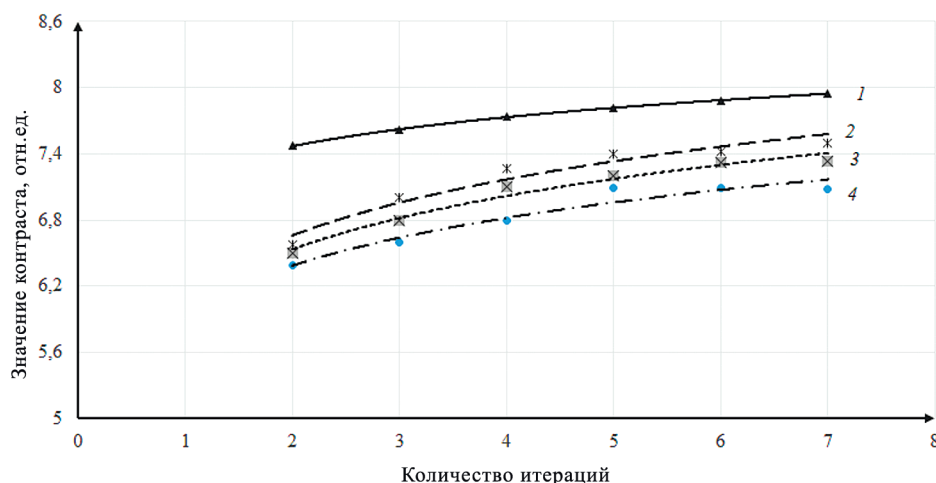


Рис. 5. Влияние количества итераций на шум с учетом подмножеств:
1 – 32 подмножества, 2 – 24 подмножества, 3 – 12 подмножеств, 4 – 6 подмножеств

Fig. 5. Effect of the number of iterations on contrast considering subsets:
1 – 32 subsets, 2 – 24 subsets, 3 – 12 subsets, 4 – 6 subsets

Получены следующие уравнения с соответствующими коэффициентами аппроксимации:

1) $\text{Contrast} = 0,3801 \times \ln(it) + 7,2054$, $R^2 = 0,99$ (32 подмножества);

2) $\text{Contrast} = 0,7336 \times \ln(it) + 6,1511$, $R^2 = 0,95$ (24 подмножества);

3) Contrast = $0,6964 \times \ln(it) + 6,0524$, $R^2 = 0,97$ (12 подмножеств);

4) Contrast = $0,6249 \times \ln(it) + 5,9525$, $R^2 = 0,94$ (6 подмножеств).

Графики функций являются монотонно возрастающими, что определяет постепенный рост контраста. Варьирование итерациями позволяет более плавно влиять на контраст. Числом подмножеств удобно «сглаживать» изображения и влиять на уровень шума (путем понижения). Следует учитывать, что при увеличении количества итераций и подмножеств наблюдается уменьшение объема очага накопления. Данный факт может негативно отразиться на очагах малого размера в условиях повышенной зашумленности.

Для получения более достоверных моделей необходимо рассмотрение изображений, полученных в результате обследований реальных пациентов, а также анализ более широкого диапазона подмножеств и итераций. Необходимо принимать во внимание, что фантомы – это идеализированные модели, однако в данных расчетах не могут быть учтены все аспекты реальной диагностической процедуры.

Полученные результаты также необходимо учитывать при анализе динамической картины и в случае повторного исследования на оборудовании с другой детектирующей системой. Для этого требуется проведение подобной процедуры расчетов на каждом из томографов, что позволит верифицировать протоколы исследования пациентов.

Заключение

Проведено сравнение методов получения изображения реконструированных с использованием времяпролетной методики и функции PSF. Шум уменьшается в соответствии со следующим неравенством: TOF > VPHD > TOF+PSF > VPHD+PSF. Для томографов на базе кристаллов LYSO оптимальным является использование времяпролетного метода совместно с PSF-функцией, что позволяет получать изображение с максимальным пространственным разрешением, а также минимизировать вклад шума и увеличить контраст. Отмечается целесообразность использования PSF-функции при сокращении длительности исследования.

Для сканеров, не поддерживающих времяпролетную технологию, целесообразно использование итерационного алгоритма реконструкции VPHD с PSF-функцией. Совместное использование времяпролетной технологии и PSF позволяет уменьшить шум и увеличить контраст в оптимальном соотношении для всех рассматриваемых методов реконструкции и сбора данных.

Функция зависимости шума от количества итераций и подмножеств, а также функции зависимости контраста от количества итераций (с учетом подмножеств) позволяют оценивать вклад шума и динамику изменения контраста при подборе параметров итерационного алгоритма.

Полученные результаты активно используются в практической деятельности республиканского ПЭТ-центра при формировании диагностических протоколов для оптимизации качества диагностического изображения.

Библиографические ссылки / References

1. Vennart NJ, et al. Optimization of PET/CT image quality using the GE “Sharp IR” point-spread function reconstruction algorithm. *Nuclear Medicine Communications*. 2017;38(6):471–479.
2. Conti M, Bendriem B. The new opportunities for high time resolution clinical TOF PET. *Clin Transl Imaging*. 2019;7:139–147. <https://doi.org/10.1007/s40336-019-00316-5>
3. Wang W, Hu Z, Gualtieri EE, Parma MJ, Walsh ES, Sebok D, et. al. Systematic and Distributed Time-of-Flight List Mode PET Reconstruction. *Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2006.
4. Vandenberghe S, Mikhaylova E, D’Hoe E, Mollet P, Karp JS. Recent developments in time-of-flight PET. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. Physics*. 2016;3(1):3. doi:10.1186/s40658-016-0138-3.
5. Queiroz MA, Delso G, Wollenweber S, Deller T, Zeimpekis K, Huellner M, et al. Dose Optimization in TOF-PET/MR Compared to TOF- PET/CT. *PLoS ONE*. 2015;10(7):e0128842. doi:10.1371/ journal.pone.0128842
6. Alessio A, Kinahan P, Lewellen T. Improved quantitation for PET/CT image reconstruction with system modelling and anatomical priors. *SPIE Medical Imaging*. San Diego: [publisher unknown]; 2005.
7. Phelps ME. Positron emission tomography provides molecular imaging of biological processes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2000;97(16):9226–9233.
8. Hotta M, Minamimoto R, Yano H, et al. Diagnostic performance of ^{18}F -FDG PET/CT using point spread function reconstruction on initial staging of rectal cancer: a comparison study with conventional PET/CT and pelvic MRI. *Cancer Imaging*. 2018;18:4. URL: <https://doi.org/10.1186/s40644-018-0137-9>.

Статья поступила в редакцию 09.03.2020.
Received by editorial board 09.03.2020.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Е. В. ЕМЕЛЬЯНЕНКО¹⁾, И. Г. ТАРУТИН¹⁾

¹⁾Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова, аг. Лесной, 223040, Минский район, Беларусь

Условиями эффективной эксплуатации высокотехнологичного диагностического оборудования в ядерной медицине является комплексный подход к обслуживанию и контролю качеству томографов, соответственно, и контролю получаемого изображения. Несмотря на богатый мировой опыт в области позитронно-эмиссионной томографии необходимо формирование национальных стандартов, учитывая достаточное быстрое развитие данной отрасли в отношении аппаратно-программного комплекса. Рассмотрены текущее состояние системы контроля качества позитронно-эмиссионных томографов в Республике Беларусь, предложена адаптивная методика контроля качества с учетом материально-технической базы.

Ключевые слова: контроль качества; протокол; гарантия качества; фантом; изображение; позитронно-эмиссионный томограф; компьютерный томограф.

QUALITY CONTROL SYSTEM ANALYSIS OF POSITRON-EMISSION TOMOGRAPHY IN THE REPUBLIC OF BELARUS

E. V. EMELIANENKO^a, I. G. TARUTIN^a

^aN. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus
Liasny agro-town, Minsk District 223040, Belarus
Corresponding author: E. Emelyanenko (zheka-ava@mail.ru)

The conditions for the effective operation of high-tech diagnostic equipment in nuclear medicine is an integrated approach to servicing and monitoring the quality of tomographs, and, accordingly, monitoring the image obtained. Despite the rich world experience in the field of positron emission tomography, the formation of national standards is necessary, in particular, given the fairly rapid development of this industry in relation to the hardware-software complex. The current state of the quality control system of positron emission tomographs in the Republic of Belarus is considered, an adaptive method of quality control is proposed taking into account the material and technical base.

Key words: quality control; protocol; quality assurance; phantom; image; positron emission tomograph; computer tomograph.

Образец цитирования:

Емельяненко ЕВ, Тарутин ИГ. Анализ системы контроля качества позитронно-эмиссионной томографии в Республике Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:59–66.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-59-66>

For citation:

Emelyanenko EV, Tarutin IG. Quality control system analysis of positron-emission tomography in the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:59–66. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-59-66>

Авторы:

Евгений Владимирович Емельяненко – магистр технических наук, аспирант; инженер лаборатории позитронно-эмиссионной томографии.

Тарутин Игорь Германович – доктор технических наук, профессор; главный научный сотрудник отдела лучевой терапии.

Author:

Yaheni V. Emelyanenko, master of technical sciences, postgraduate student; engineer of the positron emission tomography laboratory.
zheka-ava@mail.ru

Igor G. Tarutin, doctor of sciences (engineering), professor; chief researcher at the department of radiation therapy.
itarutin@tut.by

Введение

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), совмещенная с компьютерной томографией (КТ), является гибридным методом диагностики, использующимся в онкологии (90 % исследований), кардиологии и неврологии. В основе данного метода лежит сложный технологический процесс с использованием радиофармацевтических препаратов (РФП). Основными этапами диагностической процедуры являются индивидуальное дозирование РФП с последующим введением пациенту, детектирование γ -квантов, испущенных в результате аннигиляции, получение и описание специалистом диагностического изображения. Диагностическая информация представлена тремя модальностями изображений: ПЭТ, КТ, ПЭТ/КТ. Совмещение двух модальностей позволяет с повышенной точностью определить расположение потенциального патологического очага и получить информацию о биохимическом процессе. Точность диагностической информации зависит от контроля качества диагностического, периферического оборудования и изображения соответственно [1].

Помимо особенностей детектирующей системы (тип кристаллов, фотоэлектронного умножителя) на качественные и количественные характеристики значительное влияние имеют используемые фильтры, метод сбора данных (в данном случае речь идет о методе времени пролета), реконструкционные алгоритмы. Под количественными характеристиками подразумеваются SUV (стандартизированный показатель накопления), объем патологического очага. Оценка качества изображения с учетом данных параметров занимает отдельную нишу в области контроля качества и является актуальной задачей не только в новых ПЭТ-центрах, но и в мировой практике. Основываясь только на результатах фантомных исследований, подобные исследования не могут быть полноценно выполнены производителем. Оценка качества требует комплексного подхода к изучению изображений, полученных при исследованиях пациентов, поскольку фантомы не могут полностью отражать все особенности человеческого организма и происходящие в нем процессы [2; 3].

Цель исследования: обозначить основные проблемы и тенденции формирования стандартов контроля качества позитронно-эмиссионных томографов, совмещенных с компьютерными томографами.

В условиях отсутствия в Республике Беларусь стандартов контроля качества позитронно-эмиссионных томографов, совмещенных с компьютерными томографами, данная статья представляет интерес для специалистов в области ядерной медицины. На основе результатов данной работы составлена предварительная программа контроля качества ПЭТ/КТ для внутреннего пользования.

Состояние современной системы контроля качества ПЭТ/КТ

Под контролем качества (КК) ПЭТ/КТ понимаются количественные и качественные измерения (тесты) параметров работы оборудования с целью определения их соответствия существующим нормативам и техническим условиям на аппарат. Данная процедура не является проверкой. Основываясь на результатах контроля технических характеристик оборудования, принимаются решения о сервисном обслуживании, ремонте и калибровке [2].

Правильность работы детектирующей системы ПЭТ и компьютерного рентгеновского томографа (КРТ) в клинических условиях (не имея возможности прямого подключения к блокам детектирования для оценки сигнала) можно оценить двумя способами:

- 1) контроль технических характеристик с помощью фантомов и программного обеспечения;
- 2) контроль качества диагностического изображения фантомов и/или результатов исследования реальных пациентов (с использованием установленного производителем и стороннего программного обеспечения).

Контроль качества изображений является достаточно сложным процессом и требует определенного опыта и объема знаний у медицинского физика.

Разработаны различные стандарты и рекомендации, регламентирующие систему контроля качества диагностического оборудования в ядерной медицине.

В Республике Беларусь документация (республиканского уровня), регламентирующая стандарты контроля качества для ПЭТ/КТ, отсутствует. Стандарты контроля качества представлены следующим документом: протокол контроля качества работы аппаратов и приборов ядерной медицины (утверждена МЗ РБ 23.10.2006) [4]. Однако он не может быть использован для КК ПЭТ-сканеров по причине различного технического устройства ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ-томографов и гамма-камер, имеющих различные принципы регистрации излучения и реконструкции изображений. Отдельную нишу занимает КК (контроль качества) периферического оборудования, а именно систем автоматического дозирования и калибраторов активности. Указанный выше документ может лишь частично покрывать требования современной системы контроля качества периферических устройств. Производители предлагают рутинный КК калибратора

активности (инсталлированного в систему автоматического дозирования), однако это не полностью позволяет контролировать точность измерения индивидуальной дозы РФП для пациентов.

На территории СНГ контроль качества основывается на международных стандартах, а именно ГОСТах РФ (не признаны законодательством Республики Беларусь) и документацию, прилагаемую производителем, однако этого недостаточно для полноценного обеспечения процедур высокого качества. В Республике Беларусь документация, регламентирующая процедуры контроля качества ПЭТ/КТ, утвержденная Министерством здравоохранения, отсутствует.

На территории РФ КК КТ-сканеров основывается на ГОСТ РМЭК 61223-2-6-2001 (переводом стандарта IEC 61223-2-6 редакции 1994 г.). В настоящий момент действует редакция от 2006 г. названного стандарта. Приемочные испытания регламентируются стандартом ГОСТ Р МЭК 61223-3-5-2008 (перевод стандарта IEC 61223-3-5) [5]. ГОСТы, регламентирующие КК ПЭТ/КТ на территории Российской Федерации, отсутствуют.

КК рентгеновских компьютерных томографов в Республике Беларусь осуществляется в соответствии с протоколом контроля качества работы рентгеновских компьютерных томографов №192-1205 (утвержден МЗ РБ 26.06.2006 г.) [6]. Значимые отличия в методике проведения тестов отсутствуют, однако в Республике Беларусь не регламентированы приемочные испытания. Приемочные испытания, как правило, включают все виды тестов, однако данные процедуры должны быть официально утверждены и сопровождаться соответствующим протоколами.

Существует ряд рекомендаций МАГАТЭ, регламентирующих как приемочные, так и рутинные испытания. В 2012 г. МАГАТЭ выпустило программу гарантии качества для КТ-сканеров [7].

Рутинные испытания ПЭТ-сканеров в России на протяжении долгого времени регламентировались стандартом ГОСТ РМЭК 61675-1-2006 [8], (переводом стандарта IEC 61675-1 в редакции 1998 г.) и последующими его редакциями (2008 и 2013 гг.).

Учитывая необходимость получения информации с высокой точностью, а также допущение того, что пациент может проходить исследование на оборудовании, отличающемся детектирующими системами и техническими возможностями, необходимы проведение и разработка тестов, направленных на гармонизацию диагностической процедуры. Тесты подобного рода отсутствуют в рассматриваемых выше стандартах.

Также существуют рекомендации МАГАТЭ для проведения рутинных и приемочных испытаний ПЭТ-сканеров. Подобной рекомендацией является публикация «Quality assurance for PET and PET/CT» от 2009 года [9]. Однако в данной публикации отсутствует детальная информация по контролю качества томографов, поддерживающих технологию TOF. За рубежом активно используются методики на основе американского стандарта NEMA NU2 (от 2001, 2007, 2018 гг.) [10].

Выполнение тестов стандарта NEMA в Республике Беларусь осложнено отсутствием необходимого оборудования: фантом IEC, фантом для симулирования рассеяния, фантом для проверки чувствительности. Выполнение данных тестов возможно только при наличии опыта и соответствующей квалификации инженера-физика.

При контроле качества следует учитывать наличие томографов с различным типом детектирующих систем в одном отделении, что позволит синхронизировать и сопоставить параметры диагностических протоколов. В частности, данный вопрос актуален в случае построения функции зависимости коэффициента восстановления от размеров патологического очага.

Аналогичная проблема, связанная с отсутствием адаптированной программы контроля качества, изложена в статье [11], однако в данном случае отсутствуют предложения по контролю совмещения изображений.

Таким образом, существующие стандарты контроля качества ПЭТ/КТ являются достаточно разрозненными и требуют наличия большого количества дополнительного оборудования, а для эффективного их использования необходимо структурирование и утверждение единой государственной программы контроля качества.

В современном представлении контроль качества должен быть международной стандартизированной системой, которая должна быть представлена следующей сопроводительной документацией и оборудованием:

- документы, с перечислением всех необходимых тестов, вспомогательного оборудования и проверочных процедур;
- вспомогательное оборудование (фантомы для КТ, ПЭТ, специализированные дозиметры);
- подробные методики для проведения процедур контроля качества и программы, облегчающие интерпретацию результатов.

Подобный «пакет» документации и оборудования может иметь достаточно высокую стоимость, однако в этом случае нельзя говорить, что контроль качества не нуждается в оптимизации. Контроль качества должен быть жестким, строго регламентированным, но, с другой стороны, это развивающаяся адаптивная процедура, которая направлена на улучшение качества диагностики.

Типовые тесты контроля качества ПЭТ/КТ и периферического оборудования

Большинство существующих тестов и стандартов для ПЭТ, рекомендуемых производителями, направлены на проверку базовых параметров. Кроме того, важно отметить, что базовые параметры являются индикаторами правильности работы детектирующей системы.

Производители оборудования предоставляют базовый набор тестов, необходимых и достаточных для содержания оборудования в рабочем состоянии. Как правило это ежедневный контроль качества, который выполняется с фантомом ^{68}Ge и ежеквартальный контроль качества для коррекции колодезного счетчика.

К типовым калибровкам принадлежит обновление коэффициента усиления и обновление временных характеристик. Все указанные процедуры направлены в основном на поддержание рабочего состояния и контроля детектирующей системы сканера.

Контроль качества, в узком понимании – это анализ текущей ситуации. При рассмотрении двух томографов (с детектирующей системой на основе разных кристаллов) одного производителя, результаты контроля качества каждого из них соответствуют нормам предоставляемых производителем. Однако качественные параметры (шум, контраст) и полуколичественные характеристики (SUV- стандартизированный показатель накопления препарата) будут отличаться. В рассматриваемой ситуации требуется получение коэффициента восстановления (RC) на каждом из сканеров и построение калибровочных кривых. Подобные тесты направлены на гармонизацию исследований и позволяют наиболее корректно оценивать динамику у пациентов при исследовании на разном оборудовании. Проведение кросс-тестов позволит более корректно анализировать результаты исследований, проведенных на разных аппаратах.

Одним из важных тестов является проверка совмещения изображений (модальностей) ПЭТ и КТ. В качестве поверочного оборудования используется специализированный VQC-фантом с точечными источниками ^{68}Ge общей активностью 3,5 МБк. Учитывая относительно низкую активность и период полураспада источников ^{68}Ge , требуются ежегодная замена фантомов, что сопровождается значительными материальными затратами и пролонгированными промежутками без контроля качества. В рамках решения данной проблемы проведены эксперименты (на базе РНПЦ ОМР им. Н. Н. Александрова) по оценке несоответствия совпадения объемов модальностей с использованием системы планирования для терапевтического облучения. Данное исследование выполнялось на фантоме Jaszczak, в котором были смоделированы потенциальные патологические очаги накопления РФП известного объема.

В результате получена логарифмическая зависимость процентного соотношения несоответствия объемов модальностей от размеров сфер фантома (или потенциального патологического очага). Использование подобной методики является экономически выгодным (РФП производится непосредственно циклотронно-радиохимической лабораторией), вариабельным в отношении дальнейшей оптимизации, а полученные результаты оценки несоответствия объемов модальностей учитываются при проведении процедур планирования лучевой терапии с использованием ПЭТ/КТ. Учитывая отсутствие необходимых фантомов (а значит и отсутствие возможности использовать встроенное программное обеспечение) для анализа качества изображения был использован фантом Jaszczak.

Контроль качества КТ части представляет в основном набор стандартных процедур, которые включены в существующие в республике протоколы КК и являются необходимыми и достаточными для полноценного контроля качества КТ.

В соответствии с указанным в предыдущем разделе, необходимо формирование тестов, направленных на углубленный КК периферических систем. Системы автоматического дозирования представляют собой интеграцию системы насосов, одноразовых трубок, перистальтических насосов и калибратора активности. В качестве основного теста выполняется контроль качества калибратора активности с источником ^{137}Cs , однако практика показала, что необходим ряд тестов, направленных непосредственно на оценку погрешности системы дозирования. Исходя из результатов предварительных расчетов и опыта работы с данным оборудованием, можно сделать следующие выводы: максимальное количество препарата после разбавления не должно превышать 25 мл, что позволит избежать переполнения материнской вials одноразового комплекта в случае повторного разбавления; для корректной работы оптимальным значением удельной активности является диапазон 650–700 МБк/мл. В данном случае речь идет об удельной активности на момент первой инъекции.

Типовая адаптированная программа контроля качества позитронно-эмиссионного томографа, совмещенного с компьютерным томографом

Контроль качества должен быть не только эффективным, но и экономически выгодным с точки зрения используемого оборудования. Современный рынок предлагает широкий спектр фантомов, позволяющих проводить как полноценный контроль качества, так и работы исследовательского характера. Предложенная программа контроля качества адаптирована с учетом уже имеющегося оборудования в типовых отделениях

ядерной медицины в республике. Использование фантома Jaszczak (с дополнительной оптимизацией) позволяет проводить полноценный контроль качества и различных исследований, направленных на изучение влияния особенностей реконструкционных алгоритмов.

I. Ежедневный контроль качества ПЭТ/КТ.

1.1. Выполняется с колодезным фантомом ^{68}Ge или стержневым встроенным источником. Включает анализ схемы детекторов и синограмм; синхронизацию временных параметров периферического оборудования; прогрев трубки компьютерного томографа.

II. Еженедельный контроль качества ПЭТ/КТ.

2.1. Обновление коэффициента усиления и последующий контроль качества с анализом схемы детекторов и синограмм.

2.2. Проверка числа воды и контрастной разрешающей способности.

III. Ежемесячный контроль качества ПЭТ/КТ.

3.1. Коррекция колодезного счетчика. Выполняется с наполняемым фантомом с использованием РФП.

3.2. Контроль качества совмещения изображения. Данный тест может выполняться со стандартным фантомом VQC. В качестве альтернативы возможно использовать адаптированный фантом Jaszczak, наполняемый РФП. Для анализа можно использовать как встроенные программные инструменты, так и стандартный персональный компьютер и программу imageJ. Наиболее оптимальным вариантом является проверка совмещаемых объемов модальностей изображения с помощью системы планирования облучения.

IV. Верификационные тесты. Выполняются со стандартизированным фантомом IEC или адаптированным Jaszczak.

4.1. Контроль качества протоколов: оценка влияния параметров реконструкции на качество изображения. Перед планированием протоколов предварительную проверку целесообразно выполнить с использованием стандартизированных или адаптированных фантомов. Оптимизацию протоколов можно проводить с дифференцированными параметрами.

4.2. Оценка коэффициента восстановления (RC). Для данного теста возможна адаптация фантома Jaszczak с заменой холодных сфер на горячие (наполняемые сферы). Оценку данного параметра целесообразно проводить при наличии оборудования с различными системами детектирования или отличными производителями.

V. Контроль качества периферического оборудования:

5.1. Контроль качества систем автоматического дозирования и калибраторов активности.

5.2. Контроль качества системы распределения дозы.

5.2.1. Ежедневная проверка встроенного калибратора активности.

VI. Контроль протоколов и программного обеспечения.

6.1. Оценка влияния особенностей реконструкционного алгоритма на полуколичественные показатели и качество изображения.

6.2. Оценка совместного влияния функций итерационного алгоритма на полуколичественные показатели и качество изображения.

6.3. Оценка влияния метода сбора данных на полуколичественные показатели и качество изображения.

Необходимость национальной системы контроля качества ПЭТ/КТ

Национальная система контроля качества должна строиться исключительно на возможностях существующей материально-технической базы и представлять собой комплексный документ, который будет включать требования к проводимым процедурам, методику их проведения и формы отчетности. Целесообразно ведение электронной базы данных, которая позволит анализировать состояние оборудования и параметры на протяжении заданного промежутка времени.

Четкая регламентированная национальная система контроля качества позволит:

- систематизировать контроль качества ПЭТ/КТ;
- руководствоваться национальной системой протоколов при проведении клинических испытаний;
- использовать индивидуальный подход для диагностики пациентов;
- верифицировать параметры диагностических протоколов для проведения исследования пациентов на оборудовании различных моделей и производителей;
- стандартизировать процедуру контроля качества для периферического оборудования;
- оптимизировать дозовую нагрузку на пациентов с сохранением оптимального качества, реконструируемого изображения.

Контроль качества диагностических протоколов

Диагностический протокол в ПЭТ/КТ представляет собой структурированный набор условий, в соответствии с которыми будут выполняться сбор информации с детектирующей системы (длительность исследования, следовательно, и сбора данных ПЭТ, метод сбора данных), реконструкционный алгоритм изображения, сглаживающие фильтры, размерность матрицы, количество итераций.

Построение диагностического изображения выполняется на основе антропометрических данных пациента, количества введенного радиофармацевтического препарата и указанных выше параметров, которые могут вносить значительный вклад в дальнейшее восприятие специалистом полученного изображения, а также количественных и полуколичественных данных, рассчитывающихся в автоматическом режиме, что подчеркивает актуальность контроля качества протоколов.

Важным аспектом при проведении диагностики является качественно сформированный протокол обследования (как диагностический, так и протоколы, направленные на планирование для лучевой терапии). Помимо отсутствия национальных стандартов создания протоколов, в частности направленных на специфические патологии, отсутствует и контроль качества (анализ качества) самих протоколов. Анализ качества диагностических протоколов должен представлять собой полноценное исследование, в рамках которого выполняется оценка влияния параметров протоколов на качественные и количественные характеристики изображений с использованием фантомов и исследований пациентов, а также исследования, в которых проведена оценка влияния количества итераций и подмножеств на качественные и количественные характеристики изображений, а также предварительные оценки влияния аксиальных фильтров.

В ряде литературных источников, в частности публикациях иностранных специалистов, представлена лишь частичная информация о влиянии единичных параметров на качество получаемого изображения. В частности, на территории СНГ работы подобного рода отсутствуют. Преимуществом проведенных исследований в республиканском ПЭТ-центре является комплексный подход, позволяющий оценивать совместное влияние группы факторов (длительность исследования, дополнительные функции реконструкционного алгоритма) на качество изображений.

Несмотря на то что все параметры сканера могут соответствовать международным или национальным стандартам (которые, необходимо отметить, отсутствуют в Республике Беларусь), целесообразно контролировать протоколы в индивидуальном порядке.

Оценка влияния совокупности характеристик, влияющих на качество изображения, позволит усовершенствовать качество диагностических процедур (в ядерной медицине) и избежать дополнительных ошибок и погрешностей в процессе исследования. В частности, экспериментальная проверка влияния метода реконструкции на качество изображения позволила выявить оптимальные параметры протоколов сканирования.

Формирование указанной процедуры необходимо учитывать при создании национальной гарантии качества в ПЭТ/КТ-диагностике, что является рациональным аспектом, учитывая, что данная диагностическая процедура является развивающейся в Республике Беларусь. Учитывая, что диагностическое оборудование постоянно совершенствуется, а в одном и том же лечебном учреждении могут использоваться томографы разных поколений, с различной детектирующей системой и разных производителей, необходимо проводить сравнительный анализ протоколов (как элемент контроля качества). Он должен проводиться на основе статистической обработки большого объема данных, руководствуясь результатами исследований пациентов, или с использованием специальных фантомов, что значительно позволит сократить длительность анализа и сбора данных.

Образовательный аспект

Одним из проблемных аспектов в системе контроля качества радиационной диагностической медицины является уровень подготовки современных специалистов. В данном случае во внимание следует принимать качество подготовки в целом. Несомненно, что медицинская физика опирается на фундаментальные законы физики, которые не меняются с течением времени. Однако важно отметить, что данная дисциплина развивается достаточно стремительными темпами совместно с информационными технологиями. Информация, которая подается нынешним специалистам, должна быть актуальной.

Диагностическая радиационная медицина (в данной случае ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ, КТ) имеет достаточно высокие стандарты качества в отношении получаемого изображения, чему соответствует программно-аппаратный комплекс современного оборудования. Полноценное освоение оборудования может быть выполнено только при проведении исследовательской работы со стороны инженера/физика. В свою очередь комплекс исследовательской деятельности со стороны медицинского физика/инженера может быть эффективным при наличии следующих актуальных знаний: математическая статистика и программные

пакеты Statistica, MatCad, знание периферического оборудования для контроля качества (фантомы), методы обработки данных, полученных при изучении медицинского диагностического изображения, программные пакеты для работы с изображениями формата DICOM. Процесс становления современного специалиста (с учетом условий образовательного аспекта) занимает не менее 4–5 лет после окончания учебного заведения.

Процесс обучения может быть оптимизирован при введении дополнительных дисциплин и внесении изменений в имеющиеся. На этапе обучения в высшем учебном заведении будущий специалист должен быть ознакомлен с оборудованием, с которым в перспективе ему придется работать, что значительно увеличит продуктивность деятельности на рабочем месте.

Контроль качества оборудования строится на основе комплексных знаний ядерной физики, ядерной электроники, регистрации ионизирующего излучения и набора специализированных дисциплин.

Заключение

В настоящее время в Республике Беларусь отсутствуют стандарты диагностических протоколов исследования ПЭТ/КТ. Несмотря на рекомендации, указанные в иностранных изданиях, необходимо создание национальных протоколов, которые будут соответствовать определенному оборудованию и типу патологии.

Существующие стандарты контроля качества представляют достаточно объемную базу тестов и видов контроля, позволяющих определить корректность работы оборудования, однако требуют специализированной квалификации специалиста и не всегда могут быть выполнены с учетом условий имеющейся технической базы.

Пользователю представлен большой функционал для регулирования качества получаемого диагностического изображения. Необходимо учитывать все возможности и особенности программно-аппаратного комплекса при составлении диагностических протоколов, что в свою очередь, позволит наиболее эффективно проводить оценку диагностического изображения (актуально как для врача, так и для медицинского физика) и оптимизировать качество изображения.

Пользователь может влиять на качество изображения следующими способами:

- проводить своевременный контроль качества, который предусматривает не только рутинные проверки оборудования с использованием стандартного набора фантомов, а расширенный набор тестов и использование фантомов международного стандарта;
- выполнять формирование и оптимизацию диагностических протоколов, направленных на получение корректной информации, протоколы должны составляться с учетом аппаратных возможностей оборудования, в частности детектирующей системы;
- проверять диагностические протоколы на фантомах с имитацией патологий.

В республиканском центре позитронно-эмиссионной томографии выполнена апробация предложенной программы контроля качества с учетом особенностей оснащения отделения. Она направлена не только на углубленный контроль качества позитронно-эмиссионных томографов, но и на гармонизацию исследований пациентов на различных сканерах с учетом их программных и аппаратных особенностей.

Библиографические ссылки

1. Phelps ME. Positron emission tomography provides molecular imaging of biological processes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2000;97(16):9226–9233.
2. Townsend DW. Physical principles and technology of clinical PET imaging. *Annals Academy of Medicine Singapore*. 2004;33:133–145.
3. Zanzonico P. Routine quality control of clinical nuclear medicine instrumentation: A brief review. *Journal Nuclear Medicine*. 2008;49(7):1114–1131.
4. Тарутин ИГ, Шитиков БД, Боева НВ. Протокол контроля качества работы приборов ядерной медицины (инструкция по применению). Утверждена МЗ РБ 23.10.2006 г., регистрационный № 192- 1205. Минск: НИИ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова; 2006.
5. Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 61223-2-6-2001. Оценка и контроль эксплуатационных параметров рентгеновской аппаратуры в отделениях (кабинетах) рентгенодиагностики. Часть 2–6. Испытания на постоянство параметров. Аппараты для рентгеновской компьютерной томографии. – Москва: Госстандарт России, 2001.
6. Тарутин ИГ, Хоруужик СА, Чиж ГВ. Протокол контроля качества работы рентгеновских компьютерных томографов (инструкция по применению). Утверждена МЗ РБ 26.06.2006 г., регистрационный № 192- 1205. Минск: НИИ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова; 2006.
7. International Atomic Energy Agency. Human Health Series No. 19. Quality Assurance Programme for Computed Tomography: Diagnostic and Therapy Applications. Vienna: IAEA, 2012.
8. Национальный стандарт Российской Федерации: ГОСТ Р МЭК 61675-1-2006. Устройства визуализации радионуклидные. Характеристики и условия испытаний. Часть 1. Позитронные эмиссионные томографы.

9. International Atomic Energy Agency. Quality assurance for PET and PET/CT systems. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2009.
10. National Electrical Manufacturers Association. NEMA Standards Publications NU 2-2007: Performance Measurements of Positron Emission Tomographs. Washington, DC: National Electrical Manufacturers Association; 2007.
11. Иноземцев КО, Меньков МА, Долгушин МБ, и др. Разработка программы гарантии качества для комбинированного ПЭТ/КТ-сканера. *Медицинская физика*. 2013;3:65–77.

References

1. Phelps ME. Positron emission tomography provides molecular imaging of biological processes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2000;97(16):9226–9233.
2. Townsend DW. Physical principles and technology of clinical PET imaging. *Annals Academy of Medicine Singapore*. 2004;33:133–145.
3. Zanzonico P. Routine quality control of clinical nuclear medicine instrumentation: A brief review. *Journal Nuclear Medicine*. 2008;49(7):1114–1131.
4. Tarutin I, Shitikov B, Boeva N. Protocol quality control of nuclear medicine equipment (Instructions for Use). Approved by the Ministry of Health of the Republic of Belarus on 23.10.2006, registration number 192-1205. Minsk: Alexandrov National Cancer Center; 2006. Russian.
5. State standard of Russian Federation IEC 61223-2-6-2001. Assessment and control of operational parameters of x-ray equipment in x-ray diagnostics departments (offices). Part 2–6. Tests for constancy of parameters. Devices for x-ray computed tomography. Moscow: State standard of Russia; 2001. Russian.
6. Tarutin IG, Horuzhik SA, Chizh GV. Protocol for quality control of x-ray computer tomographs (instructions for use). Approved by the Ministry of health of the Republic of Belarus on 26.06.2006, registration number 192-1205. Minsk: Alexandrov National Cancer Center; 2006. Russian.
7. International Atomic Energy Agency. Human Health Series No. 19. Quality Assurance Programme for Computed Tomography: Diagnostic and Therapy Applications. Vienna: IAEA; 2012.
8. National standard of the Russian Federation: IEC 61675-1-2006. Radionuclide imaging devices. Characteristics and test conditions. Part 1. Positron emission tomographs. Russian.
9. International Atomic Energy Agency. Quality assurance for PET and PET/CT systems. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2009.; IAEA human health series.
10. National Electrical Manufacturers Association. NEMA Standards Publications NU 2-2007: Performance Measurements of Positron Emission Tomographs. Washington, DC: National Electrical Manufacturers Association; 2007.
11. Inozemtsev KO, Minkov MA, Dolgushin MB, et al. Development of a quality assurance program for a combined PET / CT scanner. *Medical physics*. 2013;3:65–77. Russian.

Статья поступила в редколлегию 09.03.2020.
Received by editorial board 09.03.2020.

УДК: 616:[504.064.36:616.34–007.43](476)

ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВРОЖДЕННОЙ СПИННОМОЗГОВОЙ ГРЫЖИ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ У НАСЕЛЕНИЯ БЕЛАРУСИ

Н. В. КОКОРИНА¹⁾, Ю. В. МАЛИНОВСКАЯ¹⁾, А. А. ЕРШОВА-ПАВЛОВА²⁾

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

²⁾Республиканский научно-практический центр «Мать и дитя»,
ул. Орловская, 66, 220053, г. Минск, Беларусь

Проанализирована частота встречаемости спинномозговых грыж за 2012–2016 гг. Установлено, что максимальная популяционная частота врожденных спинномозговых грыж в Республике Беларусь была зарегистрирована в 2012 г. и составила 1,01 ‰; в г. Минске и Минской обл. (2016 г.) – 1,07 ‰. Эффективность пренатальной диагностики в среднем по Республике Беларусь – 82,1 ‰, в г. Минске – 87,9 ‰, в Минской обл. – 83,1 ‰.

Ключевые слова: врожденные пороки развития; врожденная спинномозговая грыжа; популяционная частота; тератогенное воздействие; пренатальная диагностика.

EPIDEMIOLOGICAL MONITORING OF CONGENITAL SPINAL HERNIA UNDER CONDITIONS OF ANTHROPOGENIC LOAD IN THE POPULATION OF BELARUS

N. V. KOKORINA^a, Yu. V. MALINOVSKAYA^a, A. A. ERSHOVA-PAVLOVA^a

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

^bRepublican Scientific Practical Center «Mother and Child», 66 Arloŭskaja Street, Minsk 220053, Belarus
Corresponding author: N. V. Kokorina (ncocorina@yandex.ru)

The article presents the incidence of spinal hernias for the period from 2012 to 2016. It was established that the maximum population frequency of congenital spinal fungi in the Republic of Belarus was recorded in 2012 and have 1.01 ‰; in the Minsk and the Minsk region (2016) – 1.07 ‰. The effectiveness of prenatal diagnostics on average in the Republic of Belarus is 82.1 ‰, in the Minsk – 87.9 ‰, in the Minsk region – 83.1 ‰.

Key words: congenital malformations; congenital spinal hernia; population frequency; teratogenic effects; prenatal diagnosis.

Образец цитирования:

Кокорина НВ, Малиновская ЮВ, Ершова-Павлова АА. Эпидемиологический мониторинг врожденной спинномозговой грыжи в условиях антропогенной нагрузки у населения Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:67–77.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-67-77>

For citation:

Kokorina NV, Malinovskaya YuV, Ershova-Pavlova AA. Epidemiological monitoring of congenital spinal hernia under conditions of anthropogenic load in the population of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:67–77. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-67-77>

Авторы:

Надежда Васильевна Кокорина – кандидат медицинских наук, доцент; доцент кафедры общей экологии, биологии и экологической генетики.

Юлия Викторовна Малиновская – кандидат биологических наук, доцент кафедры общей экологии, биологии и экологической генетики.

Алла Аркадьевна Ершова-Павлова – кандидат медицинских наук; ведущий научный сотрудник лаборатории медицинской генетики и мониторинга.

Authors:

Nadezhda V. Kokorina, PhD (medicine), docent; associate professor at the department of general biology and genetics.

ncocorina@yandex.ru

Yulia V. Malinovskaya, PhD (biology); associate professor at the department of general biology and genetics.

Alla A. Ershova-Pavlova, PhD (medicine); leading researcher at the laboratory of medical genetics and monitoring.

Введение

Одной из важнейших медико-биологических и социальных задач в современном обществе является проблема сохранения детского здоровья. Врожденные пороки развития (ВПР) занимают в мире одно из ведущих мест среди причин мертворождаемости, младенческой и ранней детской заболеваемости и смертности, детской инвалидности, особенно в крупных индустриально-развитых регионах [1; 2]. Среди факторов риска, которые обуславливают возникновение врожденных пороков развития, важное место занимают экологические, которые в подавляющем большинстве имеют антропогенное происхождение. В результате комплексного влияния антропогенных факторов окружающей среды происходят различные патологические изменения в органах и системах, морфологические, функциональные и генетические нарушения в организме беременной женщины, что приводит к созданию неблагоприятного экстрагени- тального фона в виде различных экологически зависимых патологий у плода и новорожденного [3].

В крупных городах наиболее значимыми тератогенными факторами являются загрязнители воздуха, среди которых основную часть занимают диоксиды азота и серы, окись углерода, аммиак, формальдегид [3; 4]. При хроническом поступлении в организм беременной женщины они накапливаются в биологических средах, но вследствие того, что плацентарный барьер обладает достаточно высокой проницаемостью для этих веществ, создаются условия для депонирования их непосредственно в тканях плода и нарушения развития в пренатальном периоде [3; 5].

Таким образом, частота врожденных пороков развития среди новорожденных является одним из маркеров экологического неблагополучия на территориях с высокой антропогенной и техногенной нагрузкой [6].

ВПР центральной нервной системы (ЦНС) представляют собой большую по численности и гетерогенную по этиологии и клиническому спектру группу тяжелых, часто некурабельных состояний. По мнению ряда авторов, большая часть пороков развития центральной нервной системы обусловлена совместным действием генетических и средовых факторов [7; 8]. Среди всех аномалий развития, обнаруживаемых у детей, ВПР ЦНС составляют до 30 % [9]. В различных популяциях частота встречаемости пороков колеблется, что во многом зависит от популяционной выборки, их учета и эффективности пренатальной диагностики.

Тяжелую группу ВПР ЦНС составляют врожденные спинномозговые грыжи – аномалии позвоночника и спинного мозга, проявляющиеся дефектом развития и замыкания дужек позвонков, обусловленные нарушением закрытия концов нервной трубки или их повторным открытием. В норме закрытие концов нервной трубки происходит на 21–28 день внутриутробного развития. Врожденные спинномозговые грыжи практически всегда нуждаются в хирургической коррекции [10].

В антенатальном периоде развития большую значимость имеют условия микросреды, в которой развивается организм. Состояние здоровья матери, качество ее жизни и среды обитания, течение беременности и родов являются решающими факторами, формирующими здоровье ребенка. Для слежения за частотой и динамикой аномалий развития у человека во многих странах мира, включая Республику Беларусь, созданы специализированные регистры. Возможности таких регистров позволяют: формировать банк данных о случаях ВПР; установить появление новых мутагенов и/или тератогенов в среде обитания человека; определить объем необходимой медицинской помощи; оценить эффективность предпринимаемых мер профилактики; обеспечить информационную поддержку принятия управленческих решений специалистами в области здравоохранения и др.

В Республике Беларусь создана и с 1979 г. в масштабах страны функционирует система мониторинга – Белорусский регистр ВПР (БР ВПР) [11]. База данных системы мониторинга БР ВПР дает возможность оценивать не только количество, спектр, структуру и популяционную частоту (ПЧ), но и эффективность пренатального выявления ВПР, осуществлять научные исследования в области их этиологии и патогенеза.

Цель исследования – анализ количества, ПЧ и возможностей пренатальной диагностики всех форм ВПР, ВПР ЦНС, врожденные спинномозговые грыжи в Республике Беларусь и в регионе с высокой антропогенной нагрузкой (г. Минск и Минская обл.) за 2012–2016 гг.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в Республиканском научно-практическом центре «Мать и дитя» с использованием базы данных системы мониторинга БР ВПР. Учет случаев ВПР ЦНС врожденных спинномозговых грыж, как и всех форм ВПР, осуществляется в соответствии с приказом Министерства здравоохранения Республики Беларусь «О совершенствовании учета врожденных аномалий (пороков развития) у ребенка (плода)» (№ 1172 от 01.11.2008 г.). Согласно приказу, регистрации подлежат все случаи аномалий развития, выявленные у детей до года, у детей, умерших до года, у мертворожденных и у плодов, абортированных по генетическим показаниям. Объектом исследования явились извещения, поступающие из родовспомогательных и патологоанатомических учреждений, используемые для ведения базы данных системы

мониторинга БР ВПР, о случаях ВПР ЦНС и врожденных спинномозговых грыж у новорожденных и плодов в Республике Беларусь, Минской обл. и г. Минске за 2012–2016 гг.

Популяционная частота ВПР рассчитывалась на 1000 рождений как отношение числа живорожденных и мертворожденных и индуцированных абортусов с аномалиями развития к общему числу живорожденных и мертворожденных в Республике Беларусь (12):

$$\text{Общая частота ВПР} = \frac{\text{Число случаев ВПР (LB + FD + IA)}}{\text{Число рождений (LB + FD)}} 1000,$$

где LB – живорожденные; FD – мертворожденные; IA – прерванные беременности по поводу пренатально выявленных ВПР у плода.

Эффективность пренатальной диагностики (ЭПД) оценивалась как отношение пренатально диагностированных ВПР к общему количеству выявленных аномалий (пре- и постнатально).

$$\text{ЭПД} = \frac{\text{Число случаев ВПР (IA)}}{\text{Число случаев ВПР (LB + FD + IA)}} 1000.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ популяционных частот ВПР ЦНС. При анализе количества зарегистрированных случаев врожденных пороков развития в Республике Беларусь было установлено, что за период 2012–2016 гг. число случаев ВПР ЦНС составило 1737 – 0,29 % от числа всех новорожденных. Учету подлежали все случаи пороков, выявленные у живорожденных, мертворожденных и плодов, абортированных по генетическим показаниям. В структуре всех зарегистрированных врожденных пороков развития в Республике Беларусь за исследуемый период пороки ЦНС составили 9,63 % от всех случаев ВПР. Количество зарегистрированных ВПР ЦНС было максимальным в 2012 г. и составило 382 случая (табл. 1).

Таблица 1

**Количество ВПР ЦНС в Республике Беларусь по данным
Белорусского регистра врожденных пороков развития за 2012–2016 гг.**

Table 1

**The number of congenital malformations of the central nervous system
in the Republic of Belarus according to the Belarusian Register of Congenital Malformations for 2012–2016**

Количество рождений в республике/Год		2012	2013	2014	2015	2016	Всего	Среднее
Общее кол-во ВПР ЦНС	Живорожденные	106	124	109	98	70	507	101,4
	Мертворожденные	10	4	4	3	6	27	5,4
	Абортированные по генетическим показаниям	266	243	245	210	239	1212	242,4
	Всего	382	371	358	311	315	1737	347,4

Минимальное количество ВПР ЦНС в Республике Беларусь пришлось на 2015 г. и составило 311 случаев. Средний показатель регистрации ВПР ЦНС в Республике Беларусь за 2012–2016 гг. составил 347,4 случаев.

Анализ популяционных частот ВПР ЦНС за исследуемый период в Республике Беларусь позволил выявить, что максимальная популяционная частота за исследуемый период была зарегистрирована в 2012 г. и составила 3,28 ‰ и (рис. 1).

Минимальная популяционная частота ВПР ЦНС в Республике Беларусь была зарегистрирована в 2015 г. и составила 2,60 ‰. Средний показатель популяционных частот ВПР ЦНС за исследуемый период составил 2,93 ‰.

При анализе количества случаев врожденных пороков развития центральной нервной системы по г. Минску и Минской обл. было установлено, что за 2012–2016 гг. всего было зарегистрировано 633 случая, что составило 9,31% от всех зарегистрированных случаев ВПР; из них 384 – в г. Минске, 249 – в Минской обл. (табл. 2).

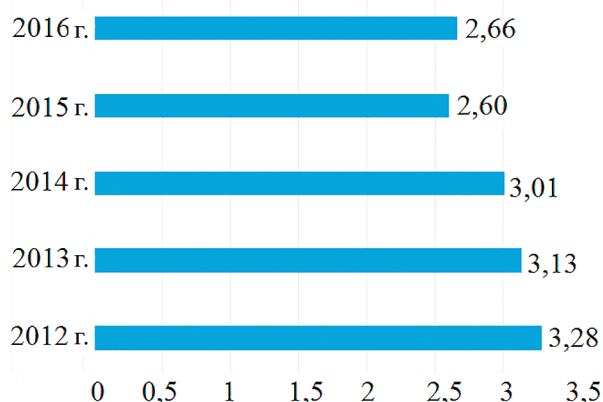


Рис. 1. Популяционная частота ВПР центральной нервной системы в Республике Беларусь за 2012–2016 гг.

Fig. 1. The population frequency of congenital malformations of the central nervous system in the Republic of Belarus for 2012–2016

Таблица 2

**Количество случаев ВПР ЦНС в г. Минске и Минской обл.
по данным Белорусского регистра врожденных пороков развития за 2012–2016 гг.**

Table 2

**The number of cases of congenital malformations of the central nervous system in the city
of Minsk and the Minsk region according to the Belarusian registry of congenital malformations for 2012–2016**

г. Минск								
Количество рождений в республике/Год		2012	2013	2014	2015	2016	Всего	Среднее
Общее количество ВПР ЦНС	Живорожденные	38	35	37	27	12	149	29,8
	Мертворожденные	5	0	2	1	0	8	1,6
	Абортированные по генетическим показаниям	54	64	40	36	33	227	45,4
	Всего	97	99	79	64	45	384	76,8
Минская обл.								
Общее количество ВПР ЦНС	Живорожденные	23	23	16	13	14	89	17,8
	Мертворожденные	1	3	0	0	3	7	1,4
	Абортированные по генетическим показаниям	26	35	35	25	32	153	30,6
	Всего	50	61	51	38	49	249	49,8

Установлено, что максимальное число случаев регистрации ВПР ЦНС по г. Минску и Минской обл. было отмечено в 2013 г. и составило – 160, из них 97 случаев было зарегистрировано в г. Минске. Минимальное число случаев регистрации ВПР ЦНС по г. Минску и Минской обл. за исследуемый период было отмечено в 2016 г. и составило 94 случая.

В среднем ежегодно в г. Минске и Минской обл. за 2012–2016 гг. зарегистрировано 126,6 случаев ВПР ЦНС; из них в г. Минске – 76,8 случаев, в Минской обл. – 49,8 случаев.

При анализе популяционных частот ВПР ЦНС по г. Минску и Минской обл. за 2012–2016 гг. было установлено, что максимальная популяционная частота на этой территории была зарегистрирована в 2013 г. и составила 3,79 ‰ (рис. 2).

Минимальная популяционная частота ВПР ЦНС по г. Минску и Минской обл. была зарегистрирована в 2015 г. и составила 2,23 ‰. Средний показатель популяционных частот ВПР ЦНС за исследуемый период составил 2,98 ‰.

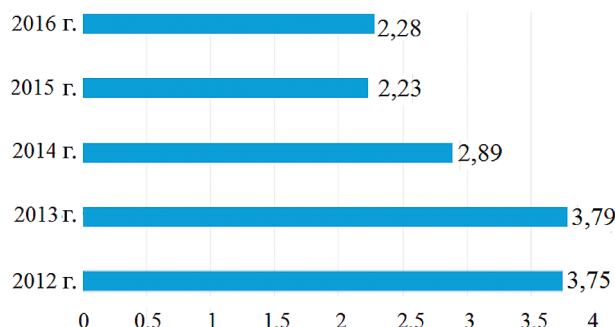


Рис. 2. Популяционная частота ВПР центральной нервной системы в г. Минске и Минской обл. за 2012–2016 гг.

Fig. 2. The population frequency of congenital malformations of the central nervous system in the city of Minsk and the Minsk region for 2012–2016

Таким образом, анализ количества случаев ВПР ЦНС и популяционных частот в Республике Беларусь за 2012–2016 гг. свидетельствует, что среди живорожденных, мертворожденных и плодов, абортированных по генетическим показаниям, ВПР ЦНС составляли ежегодно в среднем 347,4 случаев; средний показатель популяционной частоты составил 2,93 ‰. Количество случаев ВПР по г. Минску и Минской обл. составило в среднем 126,6; средний показатель популяционной частоты – 2,98 ‰. В структуре всех зарегистрированных врожденных пороков развития в Республике Беларусь за исследуемый период пороки ЦНС составили 9,63 % от всех случаев ВПР.

Анализ популяционных частот врожденных спинномозговых грыж. При анализе количества случаев врожденных спинномозговых грыж в Республике Беларусь было установлено что за 2012–2016 гг. было зарегистрировано 476 случаев. Учету подлежали все случаи пороков, выявленные у живорожденных, мертворожденных и плодов, абортированных по генетическим показаниям.

В структуре всех зарегистрированных врожденных пороков развития в Республике Беларусь за исследуемый период врожденные спинномозговые грыжи составили 2,6 % от всех случаев ВПР. В структуре всех зарегистрированных ВПР ЦНС в Республике Беларусь за исследуемый период врожденные спинномозговые грыжи составили 27,4 %. Максимальное количество врожденных спинномозговых грыж по стране составило 117 случаев и было зарегистрировано в 2012 г. (табл. 3).

Таблица 3

Количество случаев спинномозговых грыж в Республике Беларусь по данным Белорусского регистра врожденных пороков развития за 2012–2016 гг.

Table 3

The number of cases of spinal hernias in the Republic of Belarus according to the Belarusian Register of Congenital Malformations for 2012–2016

Количество рождений в республике/Год		2012	2013	2014	2015	2016	Всего	Среднее
Количество случаев спинномозговой грыжи	Живорожденные	20	18	16	6	12	72	14,4
	Мертворожденные	3	2	0	0	2	7	1,4
	Плоды, абортированные по генетическим показаниям	94	80	66	74	77	391	78,2
	Всего	117	100	82	80	91	476	95,2

Минимальное количество врожденных спинномозговых грыж составило 80 случаев и было зарегистрировано в 2015 г. Средний показатель зарегистрированных случаев врожденных спинномозговых грыж за период 2012–2016 гг. составил 95,2.

В ходе проведенного анализа данных было установлено, что в 72 случаях беременность заканчивалась рождением живых младенцев с диагнозом врожденная спинномозговая грыжа. Средний ежегодный показатель живорождаемости с врожденной спинномозговой грыжей составил 14,4 случая.

Установлено, что за анализируемый период в РБ в 391 случае пренатально был установлен диагноз врожденная спинномозговая грыжа плода. Во всех случаях было проведено искусственное прерывание

беременности по медицинским показаниям. Средний годовой показатель случаев, прерванных по генетическим показаниям беременностей с диагнозом врожденных спинномозговых грыж, за анализируемый период в Республике Беларусь составил 78,2.

При анализе популяционных частот врожденных спинномозговых грыж по стране было установлено, что максимальная популяционная частота врожденных спинномозговых грыж за заявленный период была зарегистрирована в 2012 г. и составила 1,01 ‰ (рис. 3).

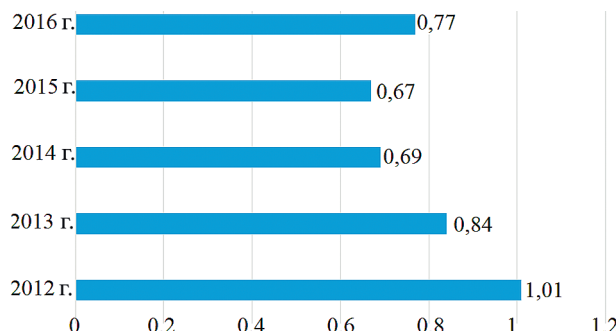


Рис. 3. Популяционная частота врожденных спинномозговых грыж у детей в Республике Беларусь за 2012–2016 гг.

Fig. 3. The population frequency of congenital spinal hernias in children in the Republic of Belarus for 2012–2016

Минимальная популяционная частота врожденных спинномозговых грыж в Республике Беларусь была зарегистрирована в 2015 – 0,67 ‰. В среднем за 2012–2016 гг. популяционная частота составила 0,80 ‰.

При анализе количества случаев врожденных спинномозговых грыж по г. Минску и Минской обл. за 2012–2016 гг. выявлено – 185, что составляет 38,86 % от всех зарегистрированных случаев с врожденными спинномозговыми грыжами по стране за период с 2012 по 2016 г.

Было отмечено, что из 185 случаев в г. Минске зарегистрировано 108; в Минской обл. – 77 (табл. 4).

Таблица 4

Количество случаев врожденных спинномозговых грыж в г. Минске и Минской области по данным Белорусского регистра врожденных пороков развития за 2012–2016 гг.

Table 4

The number of cases of congenital spinal hernias in the city of Minsk and the Minsk region according to the Belarusian Register of Congenital Malformations for 2012–2016

г. Минск								
Количество рождений в Республике Беларусь / год		2012	2013	2014	2015	2016	Всего	Среднее
Количество случаев спинномозговой грыжи	Живорожденные	1	3	3	1	3	11	2,2
	Мертворожденные	0	1	1	0	1	3	0,6
	Плоды, абортированные по генетическим показаниям	23	24	11	23	14	95	19
	Всего	24	27	15	24	18	108	21,6
Минская область								
Количество рождений в Республике Беларусь / год		2012	2013	2014	2015	2016	Всего	Среднее
Количество случаев спинномозговой грыжи	Живорожденные	4	2	1	0	3	10	2
	Мертворожденные	1	1	0	0	1	3	0,6
	Абортированные по генетическим показаниям	6	13	12	11	22	64	12,8
	Всего	11	16	13	11	26	77	15,4

Максимальный годовой показатель зарегистрированных спинномозговых грыж по г. Минску и Минской обл. был отмечен в 2016 г. и составил 44 случая. Минимальное годовое число зарегистрированных спинномозговых грыж составило 28 случаев и было зафиксировано в 2014 г.

В ходе проведенного анализа данных было установлено, что в 21 случае беременность заканчивалась рождением живых младенцев с диагнозом врожденная спинномозговая грыжа.

Средний показатель зарегистрированных случаев врожденных спинномозговых грыж в 2012–2016 гг. составил 37 случаев, показатель живорождаемости с врожденной спинномозговой грыжей за исследуемый период по г. Минску и Минской обл. составил 2,1.

Установлено, что за анализируемый период по г. Минску и Минской обл. 159 женщинам пренатально был установлен диагноз врожденная спинномозговая грыжа плода. Во всех случаях было проведено искусственное прерывание беременности по медицинским показаниям. Средний показатель прерванных по генетическим показаниям беременностей с диагнозом врожденная спинномозговая грыжа по г. Минску и Минской обл. за анализируемый период составил 15,9 случаев.

При анализе популяционных частот врожденных спинномозговых грыж по г. Минску и Минской обл. было установлено, что максимальная частота встречаемости врожденных спинномозговых грыж за заявленный период в г. Минске и Минской обл. была зарегистрирована в 2016 г. и составила 1,07 % (рис. 4).

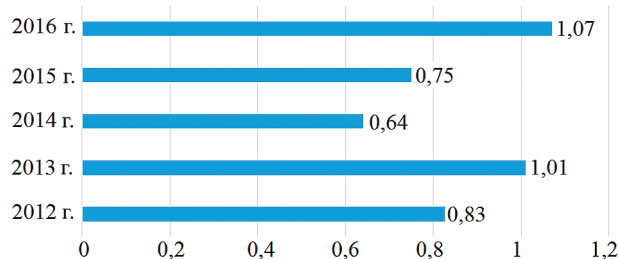


Рис. 4. Популяционная частота врожденных спинномозговых грыж в г. Минске и Минской обл. за 2012–2016 гг.

Fig. 4. The population frequency of congenital spinal hernias in the city of Minsk and the Minsk region for 2012–2016

Наименьшая популяционная частота врожденных спинномозговых грыж зарегистрирована в 2014 г. – 0,64 %. В среднем за 2012–2016 гг. популяционная частота составила 0,86 %.

Таким образом, анализ количества и популяционных частот врожденных спинномозговых грыж в Республике Беларусь за 2012–2016 гг. показал, что среди живорожденных, мертворожденных и плодов, аборттированных по генетическим показаниям, врожденные спинномозговые грыжи составляли ежегодно по всей Республике Беларусь в среднем 92,5 случаев со средней популяционной частотой 0,80 %. По г. Минску и Минской обл. в среднем регистрировалось 37 случаев врожденных спинномозговых грыж со средней популяционной частотой 0,64 %. В структуре всех зарегистрированных врожденных пороков развития в Республике Беларусь за исследуемый период врожденные спинномозговые грыжи составили 2,6 % от всех случаев ВПР.

Анализ эффективности пренатальной диагностики. Нами был проведен сбор клинических и генеалогических данных о пациентах со спинномозговыми грыжами из архива РНПЦ «Мать и дитя» (база данных Регистра МВПР) за 2012–2016 гг. Учету подлежали все случаи пороков, выявленные у живорожденных, мертворожденных и плодов, аборттированных по генетическим показаниям. За этот период всего было зарегистрировано 185 случаев врожденных спинномозговых грыж у плода в г. Минске и Минской обл.

Диагноз врожденной спинномозговой грыжи был диагностирован у 126 (68 %) беременных женщин в возрасте от 20 до 30 лет (рис. 5).

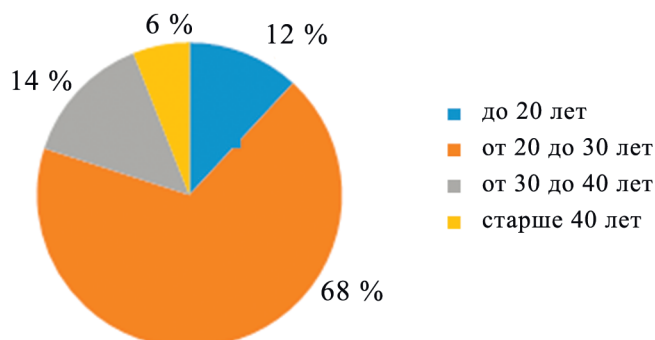


Рис. 5. Распределение случаев спинномозговых грыж по возрасту

Fig. 5. Age distribution of cases of spinal hernias

У 26 (14 %) беременных возраст составил от 30 до 40 лет; у 22 (12 %) беременных возраст до 20 лет, у 11 (6 %) – старше 40 лет.

Таким образом, врожденная спинномозговая грыжа чаще всего регистрировалась у женщин активного репродуктивного возраста (от 20 до 30 лет – 68 %).

Было установлено, что из 185 зарегистрированных в г. Минске и Минской обл. случаев в 133 диагностировалась изолированная форма порока, что составило 72%; в 52 случаях отмечался сочетанный порок в составе различных синдромов (рис. 6).



Рис. 6. Распределение сочетанности спинномозговых грыж с другими врожденными пороками развития.

Fig. 6. Distribution of the combination of spinal hernias with other congenital malformations.

Анализ полученных данных позволил установить, что в 28 % всех зарегистрированных случаев диагностировались множественные пороки (пороки, локализованные в органах двух или более систем). Наиболее частыми сопутствующими пороками были другие аномалии развития ЦНС, пороки мочевыделительной системы и опорно-двигательного аппарата.

Была проведена оценка эффективности пренатальной диагностики путем подсчета прерванных по генетическим показаниям беременностей с врожденными спинномозговыми грыжами в Республике Беларусь за 2012–2016 гг.

Установлено, что эффективность пренатальной диагностики врожденных спинномозговых грыж в Республике Беларусь составила 82,10 %.

Эффективность пренатальной диагностики врожденных спинномозговых грыж в г. Минске и Минской обл. составила 85,60 % (рис. 7).

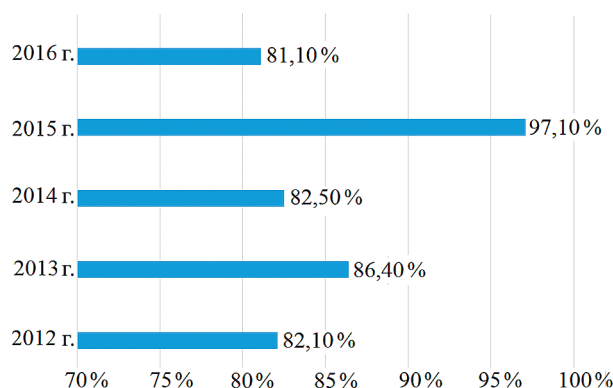


Рис. 7. Оценка эффективности пренатальной диагностики случаев беременностей с диагнозом врожденных спинномозговых грыж в г. Минске и Минской обл. за 2012–2016 гг.

Fig. 7. Evaluation of the effectiveness of prenatal diagnosis of pregnancy cases with a diagnosis of congenital spinal hernias in Minsk and Minsk region for 2012–2016

В г. Минске средний показатель эффективности пренатальной диагностики за данный период составил – 87,90 %, в Минской обл. – 83,10 %. Диапазон значений колебался от 81,10 до 97,10 %. Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности пренатальной диагностики данной патологии в г. Минске и Минской обл. за 2012–2016 гг.

В результате анализа данных извещений о выявлении врожденной спинномозговой грыжи у плода среди населения г. Минска и Минской обл. за период 2012–2016 гг. было установлено, что наиболее часто данный порок выявлялся на 19–20 неделе гестации (табл. 5).

Таблица 5

Распределение сроков выявления врожденных спинномозговых грыж в течение беременности

Table 5

Distribution of terms for the detection of congenital spinal hernias during pregnancy

Срок выявления порока		Количество случаев
Триместр беременности	Неделя гестации	
1 триместр	9	2
	10	15
	11	10
	12	12
	13	5
2 триместр	14	3
	15	1
	16	1
	17	3
	18	3
	19	40
	20	50
3 триместр	21	9
	22	6
	24	1
	25	1
	28	2
	29	1
После родоразрешения		19

Таким образом, установлено, что в большинстве случаев (82,53 %) спинномозговая грыжа выявлялась в 1–2-м триместрах беременности (рис. 8).

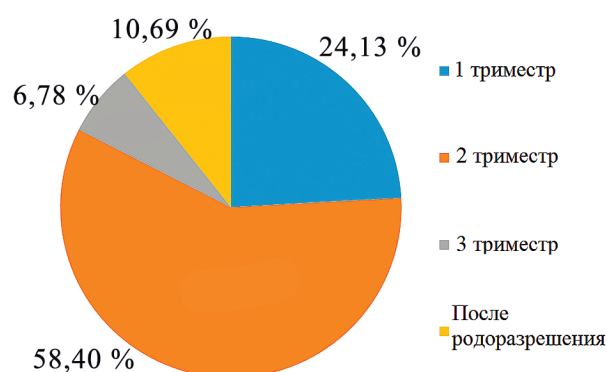


Рис. 8. Диаграмма распределения сроков выявления врожденных спинномозговых грыж

Fig. 8. Diagram of the distribution of terms for the detection of congenital spinal hernias

В ходе проведенного анализа данных по выявлению врожденной спинномозговой грыжи у плода среди населения г. Минска и Минской обл. за 2012–2016 гг. было установлено, что:

– Средняя эффективность пренатальной диагностики составила 82,10 % в Республике Беларусь, г. Минске – 87,90 %, в Минской обл. – 83,10 %.

– Прервано по генетическим показаниям 159 из 185 зарегистрированных беременностей с врожденными спинномозговыми грыжами.

– В г. Минске и Минской обл. максимальное число прерванных по генетическим показаниям беременностей с врожденными спинномозговыми грыжами было произведено в 2015 г. и составило 97,10 % от всех зарегистрированных случаев; минимальное число – 81,10 % и было зарегистрировано в 2016 г.

– Наиболее высокая выявляемость данного порока пришлась на 2-ой триместр беременности и составила 58,40 %.

– От всех зарегистрированных случаев 28 % врожденных спинномозговых грыж было отягощено сопутствующими пороками других органов и систем.

В ходе проведенного исследования было установлено, что анализ данных мониторинга врожденных пороков развития в Республике Беларусь позволил определить распространенность и популяционные частоты врожденных спинномозговых грыж за период 2012–2016 гг. и оценить эффективность пренатальной диагностики в г. Минске и Минской обл.

Выводы

Всемирная организация здравоохранения относит ВПР новорожденных к группе экоассоциированных болезней, которые служат индикаторами неблагополучия среды обитания [13]. Под воздействием факторов окружающей среды происходит нарушение развития плода в пренатальном периоде и формирование врожденных пороков.

В результате проделанной работы были проанализированы данные о частоте встречаемости врожденных спинномозговых грыж в Республике Беларусь, г. Минске и Минской обл. за 2012–2016 гг. и проведен сравнительный анализ популяционных частот:

1. Установлено, что в Республике Беларусь ежегодно регистрировалось 95,2 случая, популяционная частота составила в среднем – 0,86 ‰. В г. Минске и Минской обл. ежегодно в среднем регистрировалось 37,0 случаев; популяционная частота в среднем 0,86 ‰

2. При сравнительном анализе популяционных частот врожденных спинномозговых грыж за исследуемый период по годам установлено, что максимальная популяционная частота в Республике Беларусь была зарегистрирована в 2012 г. и составила 1,01 ‰; в г. Минске и Минской обл. (2016 г.) – 1,07 ‰. Минимальная популяционная частота в Республике Беларусь была зарегистрирована в 2015 г. и составила – 0,67 ‰; в г. Минске и Минской обл. (2014 г.) – 0,64 ‰.

3. Эффективность пренатальной диагностики врожденных спинномозговых грыж в Республике Беларусь за 2012–2016 гг. составила в среднем 82,10 %; в г. Минске и Минской обл. – 85,90 %, что свидетельствует о высокой выявляемости данного порока в пренатальном периоде и эффективности пренатальной диагностики. Наиболее высокая выявляемость данного порока пришлась на 2-ой триместр беременности и составила 58,40 %.

4. От всех зарегистрированных случаев 28 % врожденных спинномозговых грыж было отягощено сопутствующими пороками других органов и систем.

В ходе проведенного исследования было установлено, что анализ данных мониторинга врожденных пороков развития в Республике Беларусь позволил определить распространенность и популяционные частоты врожденных спинномозговых грыж за период 2012–2016 гг. и оценить эффективность пренатальной диагностики в г. Минске и Минской обл.

Библиографические ссылки

1. Тихомирова НА, Колпащикова ИФ. Роль факторов среды обитания в развитии врожденных пороков. *Вестник РУДН. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2008;3:70–74.
2. Шевырева МП. Изучение врожденных пороков развития как важный элемент системы социально-гигиенического мониторинга. *Гигиена и санитария*. 2000;3:73–75.
3. Байрагов НА, Жиликов ЕВ. Антропогенная нагрузка как фактор, усугубляющий развитие и течение основных заболеваний беременных женщин и детей. *Фундаментальные исследования*. 2014;4:624–628.
4. Mullerova D, Kopecky J. White adipose tissue: storage and effector site for environmental pollutants. *Physiology Research*. 2007;56:375–381.
5. Olsen GW, Butenhoff JL, Zobel LR. Perfluoroalkyl chemicals and human fetal development: An epidemiologic review with clinical and toxicological perspectives. *Reproductive Toxicology*. 2009;3–4(27):212–230.
6. Антонов ОВ, Ширинский ВА, Антонова ИВ. Гигиенические факторы риска формирования врожденных пороков развития. *Гигиена и санитария*. 2008;5:20–22.

7. Бабенко А, Татаурова Е. Формирование здорового образа жизни у подрастающего поколения. *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*. 2005;6:6–8.
8. Лещенко ЯА, и др. Мониторинг врожденных пороков развития у новорожденных в крупном промышленном городе. *Педиатрия*. 2001;3:77–80.
9. Антонова ИВ, и др. Роль экзогенных факторов в формировании врожденных пороков развития плода. *Вопросы гинекологии, акушерства и перинатологии*. 2010;9(6):36–38.
10. Черствой ЕД, Кравцова ГИ, Лазюк ГИ. Болезни плода, новорожденного и ребенка: Нозология, диагностика, патол. анатомия. 2-е изд., перераб. и доп. Минск : Высшая школа; 1996. 512 с.
11. Ершова-Павлова АА, и др. Система мониторинга врожденных пороков развития в Беларуси. В: Сахаровские чтения 2014 года: экологические проблемы XXI века : материалы 14-й междунар. науч. конф., 29–30 мая 2014 г., г. Минск, Республика Беларусь. Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова; 2014. с. 78.
12. Дюрдь АИ, Индушко ГИ, Мотюк ИН. Структура и частота врожденных пороков развития у новорожденных Гродненской области. В: Актуальные проблемы экологии. Материалы VII международной научно-практической конференции, Гродно, 26–28 октября 2011 г. – Гродно: ГрГМУ; 2011. с. 132–133.
13. Тверская АВ, Верзилина ИН. Изучение влияния атмосферных поллютантов на заболеваемость новорожденных врожденными аномалиями развития в белгородской области. *Научные ведомости. Серия Медицина. Фармация*. 2018;41(2):297–304.

References

1. Tikhomirova NA, Kolpaschikova IF. Role of environmental factors in development of congenital defects. *Bulletin of RUDN University, series Ecology and life safety*. 2008;3:70–74. Russian.
2. Shevyreva MP. The study of congenital malformations as an important element of the system of socio-hygienic monitoring. *Hygiene and sanitation*. 2000;3:73–75. Russian.
3. Bairavov NA, Zhilyakov EV. Anthropogenic load as a factor aggravating the development and course of the main diseases of pregnant women and children. *Basic research*. 2014;4:624–628. Russian.
4. Mullerova D, Kopecky J. White adipose tissue: storage and effector site for environmental pollutants. *Physiology Research*. 2007;56:375–381.
5. Olsen GW, Butenhoff JL, Zobel LR. Perfluoroalkyl chemicals and human fetal development: An epidemiologic review with clinical and toxicological perspectives. *Reproductive Toxicology*. 2009;3–4(27):212–230.
6. Antonov OV, Shirinsky VA, Antonova IV. Hygienic risk factors of formation of congenital malformations. *Hygiene and sanitation*. 2008;5:20–22. Russian.
7. Babenko A, Tataurova E. Formation of a healthy lifestyle in the younger generation. *Problems of social hygiene, health care and the history of medicine*. 2005;6:6–8. Russian.
8. Leshchenko YaA, et al. Monitoring of congenital malformations in newborns in a large industrial city. *Pediatrics*. 2001;3:77–80. Russian.
9. Antonova IV, et al. The role of exogenous factors in the formation of congenital malformations of the fetus. *Questions of gynecology, obstetrics and perinatology*. 2010;9(6):36–38. Russian.
10. Cherstvoi ED, Kravtsova GI, Lazyuk GI. Diseases of the fetus, newborn and child: Nosology, diagnosis, pathological anatomy. 2nd edition. Minsk : Vyshchaja Shkola; 1996. 512 p. Russian.
11. Ershova-Pavlova AA, et al. Monitoring system of congenital malformations in Belarus. In: *Sakharov Readings of 2014: Environmental Problems of the 21st Century: Materials of the 14th International scientific conference*, 2014 May 29–30, Minsk, Republic of Belarus. Minsk: ISEU; 2014. p. 78. Russian.
12. Dyurl AI, Indushko GI, Motok IN. The structure and frequency of congenital malformations in newborns of the Grodno region. In: *Actual problems of ecology: Materialy VII international scientific-practical conference*. 2011 October 26–28, Grodno. Grodno: Grodno State Medical University; 2011; p. 132–133. Russian.
13. Tverskaya AV, Verzilina IN. Study of influence of atmospheric pollyutant on incidence of newborns of congenital anomalies of development in the belgorod region. *Scientific Bulletin Series Medicine. Pharmacy*. 2018;41(2):297–304. Russian.

Статья поступила в редакцию 06.03.2020.
Received by editorial board 06.03.2020.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 632.15

ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ АНТРОПОГЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Е. Н. ХРУСТАЛЁВА¹⁾

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

Рассмотрены тенденции в изменении объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в целом, а также от стационарных и мобильных источников в Республике Беларусь в частности. Представлена динамика и структура объемов выбросов загрязняющих веществ за 2014–2018 гг. Произведена оценка ингредиентного состава выбросов. Выявлены области Республики Беларусь, занимающие лидирующие позиции по объему выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Ключевые слова: выбросы; загрязняющие вещества; атмосфера; источник выбросов.

Образец цитирования:

Хрусталёва ЕН. Оценка выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух антропогенными источниками Республики Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:78–86.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-78-86>

For citation:

Khrustalyova AN. Evaluation of emissions of polluting substances in the atmospheric air by anthropogenic sources of the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:78–86. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-78-86>

Автор:

Елена Николаевна Хрусталёва – преподаватель-стажер кафедры экологической медицины и радиобиологии.

Author:

Alena N. Khrustalyova, teacher-trainee at the department of environmental medicine and radiobiology.
elena.xrustalyova.92@mail.ru

EVALUATION OF EMISSIONS OF POLLUTING SUBSTANCES IN THE ATMOSPHERIC AIR BY ANTHROPOGENIC SOURCES OF THE REPUBLIC OF BELARUS

A. N. KHRUSTALYOVA^a

^a*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University,
23/1 Daubhabrodszkaja Street, Minsk 220070, Belarus*

This article discusses the trends in the level of emissions of pollutants into the atmospheric air in total, as well as from stationary and mobile sources in the Republic of Belarus. The dynamics and structure of pollutant emissions for the period from 2014 to 2018 are presented. The ingredient composition of the emissions was estimated. The regions of the Republic of Belarus that occupy leading positions in the volume of air emissions of pollutants have been identified.

Keywords: emissions; pollutants; atmosphere; source of emissions.

Введение

Условием обеспечения устойчивого социально-экономического и политического развития является экологическая безопасность – одна из составляющих национальной безопасности страны [1]. Факторы, ослабляющие национальную безопасность и тормозящие развитие любой страны, – ухудшение качества окружающей среды и обусловленные этим заболевания, экологические бедствия и катастрофы, снижение трудовой активности и социальная напряженность.

Загрязнение воздуха – это один из основных факторов риска для здоровья, связанных с окружающей средой. Загрязнение воздуха делает непригодным его для дыхания, технических нужд и приводит к соматическим и инфекционным заболеваниям, отравлениям, отдаленным канцерогенным и мутагенным эффектам. Химическое загрязнение атмосферного воздуха является причиной возникновения и развития около 50 % всех экологически обусловленных заболеваний. Это связано с тем, что альвеолярная ткань легких обладает огромной поверхностью и всасывающей способностью, следовательно, загрязнители легко попадают в большой круг кровообращения, минуя печень [2].

Важно, что для каждой городской территории имеется свой специфический набор загрязнений, обусловленный видом промышленности. Каждое из этих веществ имеет определенную специфику действия на организм человека. В связи с этим и спектр заболеваний крайне разнообразен:

- заболевания органов дыхания (в том числе бронхиальная астма);
- заболевания сердечно-сосудистой системы и желудочно-кишечного тракта;
- болезни крови и кроветворных органов;
- болезни кожи, нервной системы;
- эндокринные заболевания (в том числе диабет);
- новообразования, аллергии;
- врожденные аномалии развития, осложнения беременности и родов.

Диагностика того или иного заболевания не представляет серьезной проблемы для врача. Однако установление причинной связи возникновения и развития данного заболевания – задача весьма сложная, особенно в условиях крупных городов с многопрофильной промышленностью и развитым автотранспортом [3].

Загрязняющие вещества могут поступать в атмосферный воздух в результате деятельности природных и антропогенных источников, а также в результате регионального и трансграничного переноса [4; 5].

Для оценки сложившейся ситуации и прогноза обеспечения экологической безопасности общества необходимо постоянно анализировать показатели экологической нагрузки и показатели охраны окружающей среды, которые характеризуют эффективность экологической политики [6; 7].

Материалы и методы исследования

Основу публикации составили материалы Государственного кадастра атмосферного воздуха и статистического сборника «Охрана окружающей среды в Республике Беларусь» (2014–2018 гг.) [8; 9]. Статистическая обработка данных проводилась с помощью программы Microsoft Excel 2010.

В статье определена динамика объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в Республике Беларусь в целом и по областям с использованием метода наименьших квадратов. Уравнение прямой линии рассчитано по формуле:

$$Y_T = a + bx,$$

где Y_T – теоретические уровни ряда за каждый период; a – среднеарифметический показатель уровня ряда; b – коэффициент регрессии, показывающий различие между теоретическими уровнями ряда за смежные периоды; x – временные точки, натуральные числа, проставленные от середины (центра) ряда в оба конца.

Значения a и b рассчитаны по формуле:

$$a = \frac{\sum y}{n} \text{ и } b = \frac{\sum xy}{\sum x^2},$$

где $\sum y$ – сумма выбросов за изучаемый период времени, n – число лет, x – порядковый номер члена динамического ряда, y – уровень выбросов.

Для детального изучения процессов во времени использованы показатели динамического ряда. Темп прироста (убыли) объема выбросов находили по формуле:

$$T = \frac{y_n - y_{n-1}}{y_{n-1}} 100 \%,$$

где y_n – показатель данного уровня, y_{n-1} – показатель объема выбросов предыдущего уровня.

Показатель среднего темпа прироста (снижения) использован для обобщенной количественной оценки тенденции динамического ряда и рассчитан по формуле:

$$T_{cp} = \frac{b \times K}{a} 100 \%,$$

где a и b – показатели линейной зависимости, используемые при выравнивании ряда методом наименьших квадратов, $K = 1(2)$ при нечетном (четном) числе уровней ряда.

Экстенсивные показатели – показатели удельного веса, доли, части совокупности рассчитаны по формуле:

$$\text{Экстенсивный показатель} = \frac{\text{Часть совокупности (явления)} \times 100 \%}{\text{Вся совокупность (явление)}}.$$

В статье показана структура объемов выбросов по основным загрязняющим веществам, видам экономической деятельности и по видам транспорта [10].

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ изменения показателей экологической нагрузки позволяет сделать вывод о наметившейся тенденции к снижению негативного воздействия экономики страны на окружающую среду. Так, выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух Беларуси сократились с 1343,6 тыс. т в 2014 г. до 1235,3 тыс. т в 2018 г. (рис. 1).

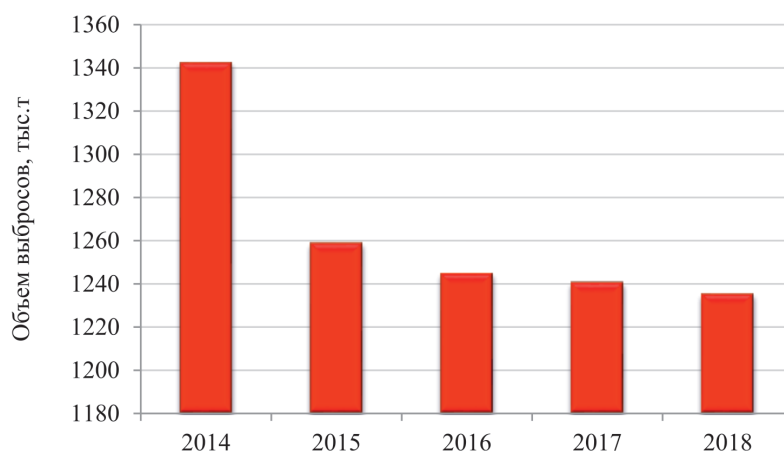


Рис. 1. Объем выбросов в атмосферу в Республике Беларусь, тыс. т

Fig. 1. The volume of air emissions in the Republic of Belarus, thousand tons

Объем выбросов от всех источников за исследуемый период снизился на 108,3 тыс. т. Наибольший темп убыли отмечался в 2015 г. и соответствовал значению 6,2 %. Отмечалась тенденция к снижению объема выбросов загрязняющих веществ в среднем на 1,8 % ежегодно.

В 2018 г. наиболее значительная доля загрязняющих веществ в атмосферу была выброшена источниками, находящимися в Минской обл. (32,5 %) (рис. 2).

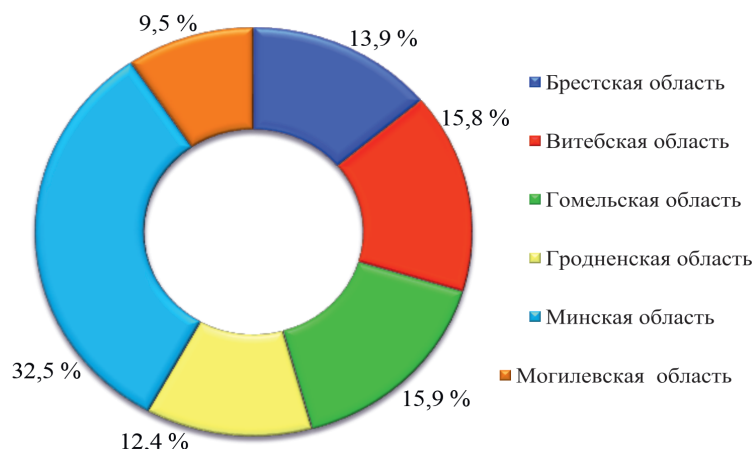


Рис. 2. Диаграмма распределения объемов выбросов по областям (2018 г., в %)

Fig. 2. The diagram of the distribution of emissions by region (2018, in %)

Объем выброшенных загрязняющих веществ источниками, находящимися в Витебской и Гомельской обл., составил 15,8 и 15,9 % соответственно.

Проанализирована тенденция в изменении объемов выбросов от всех источников по областям за 2014–2018 гг. (рис. 3).

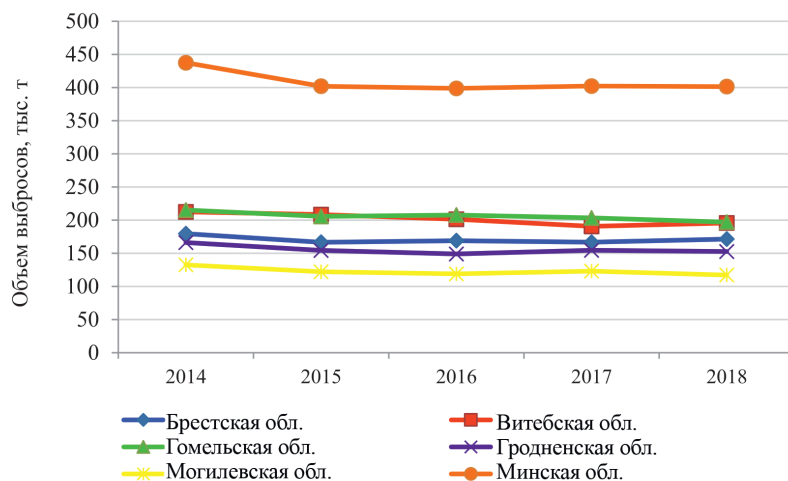


Рис. 3. Динамика объемов выбросов в атмосферу по областям, тыс. т

Fig. 3. Dynamics of air emissions by regions, thousand tons

Следует отметить, что на протяжении всего исследуемого периода Минская обл. занимала лидирующие позиции по объему выбросов в атмосферу от всех источников. Однако именно в Минской обл. за 2014–2018 гг. произошло наиболее выраженное снижение выбросов с 437,5 тыс. т в 2014 г. до 401,5 тыс. т в 2018 г. или на 8,2 %.

В 2018 г., по сравнению с 2017 г., объем выбросов загрязняющих веществ сократился в Гомельской (на 5,2 тыс. т или 4,9 %), Гродненской (на 1,5 тыс. т или 2,5 %) и Могилевской (на 3,1 тыс. т или 6,5 %) областях.

Выбросы от стационарных источников. Значительный вклад в загрязнение атмосферного воздуха в 2018 г. внесли стационарные источники Полоцкого и Мозырского р-нов, объем выбросов в которых составлял 57,8 и 33,7 тыс. т соответственно [9].

В целом по Республике Беларусь выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников сократились с 462,8 тыс. т в 2014 г. до 453,3 тыс. т в 2018 г. или на 2,1 %. Наиболее значительный темп снижения объема выбросов отмечен в 2016 г., который составлял 1,1 % (рис. 4).

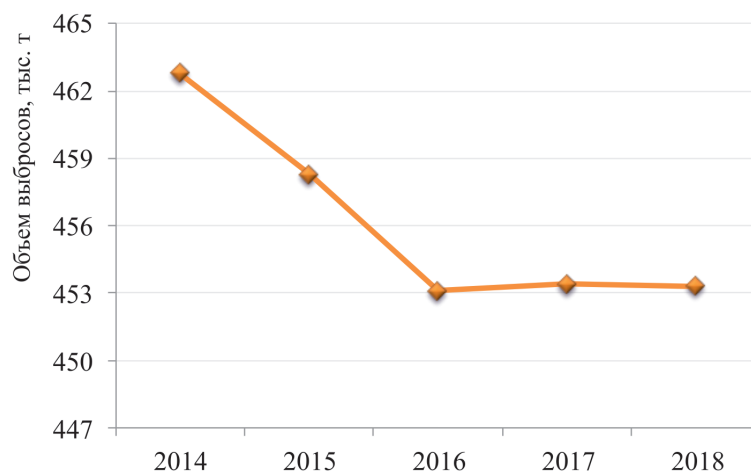


Рис. 4. Объем выбросов в атмосферу от стационарных источников в Республике Беларусь, тыс. т

Fig. 4. The volume of atmospheric emissions from stationary sources in the Republic of Belarus, thousand tons

В 2018 г. доля оксида углерода от всего объема выбросов загрязняющих веществ составляла 17 % (рис. 5).

В ингредиентном составе выбросов преобладали углеводороды (36,8 %). В очень низких концентрациях действие углеводородов приводит к функциональным расстройствам нервной системы, неврастении, вегетоневрозам, вспыльчивости и раздражительности – вплоть до сильного головокружения при резких движениях головой [11].



Рис. 5. Распределение объемов выбросов от стационарных источников в Республике Беларусь по основным загрязняющим веществам, (2018 г., тыс. т)

Fig. 5. Distribution of emissions from stationary sources in the Republic of Belarus by main pollutants, (2018, thousand tons)

За пятилетний период исследования снижение выбросов от стационарных источников наблюдалось по всем основным веществам, за исключением углеводородов, причем наиболее значительное по твердым веществам (25,2 %), диоксиду азота (15,6 %) и диоксиду серы (на 17,3 % начиная с 2015 г.) (табл. 1).

За 2014–2018 гг. объем выбросов углеводородов в атмосферный воздух увеличился на 11,9 %.

В 2018 г. по сравнению с 2017 г. произошло уменьшение выбросов твердых веществ (на 0,9 тыс. т или 3,3 %), диоксида серы (на 0,6 тыс. т или 1,3 %), диоксида азота (на 3 тыс. т или 6,1 %), оксида азота (на 0,1 тыс. т). Относительно уровня 2017 г. увеличились выбросы оксида углерода (на 1,8 тыс. т), углеводородов (на 0,8 тыс. т), неметановых летучих органических соединений (на 1 тыс. т).

Основной объем выбросов загрязняющих веществ среди отраслей экономики Республики Беларусь в 2018 г. пришелся на обрабатывающую промышленность – 173,5 тыс. т или 38,3 % от общего объема выбросов от стационарных источников (рис. 6).

Таблица 1

Объем выбросов от стационарных источников Республики Беларусь по основным загрязняющим веществам, тыс. тонн

Table 1

The volume of emissions from stationary sources of the Republic of Belarus by major pollutants, thousand tons

Показатель	2014	2015	2016	2017	2018
Всего	462,8	458,3	453,1	453,4	453,3
в том числе:					
твердые вещества	34,9	30,1	27,4	27,0	26,1
диоксид серы	50,3	56,8	53,3	47,6	47,0
оксид углерода	80,9	75,4	73,1	75,1	76,9
диоксид азота	54,3	49,3	50,8	48,8	45,8
оксид азота	6,0	5,7	5,9	5,8	5,7
углеводороды	149,1	157,7	158,8	166,1	166,9
Неметановые летучие органические соединения	55,5	54,0	54,0	53,8	54,8
прочие	31,7	29,2	29,7	29,2	30,1



Рис. 6. Распределение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников по видам экономической деятельности (2018 г., в %)

Fig. 6. Distribution of pollutant emissions into the air from stationary sources by type of economic activity (2018, in %)

В структуре выбросов доля сельского хозяйства составила – 37,2 %, снабжение электроэнергией, газом, паром, горячей водой – 13,7 %, транспортная и остальные виды деятельности по 5,6 и 5,2 % соответственно.

Выбросы от мобильных источников. Основным воздействием на окружающую среду транспортных средств, являющихся мобильными источниками выбросов, является загрязнение атмосферного воздуха токсичными компонентами отработанных газов транспортных двигателей.

Выбросы загрязняющих веществ мобильными источниками зависят от количества транспортных средств; расхода, качества и характера топлива; технологического совершенства и состояния транспортных средств; сезонных условий эксплуатации; режима движения автомобиля; состояния дорожной сети и других факторов. В атмосферный воздух также поступают продукты износа транспортных средств и испарения топлива [12].

Годовой выхлоп одного автомобиля – это в среднем 800 кг окиси углерода, 40 кг окислов азота и более 200 кг различных углеводородов. В этом наборе окись углерода наиболее коварна. Легковой автомобиль с двигателем 50 л. с. выбрасывает в атмосферу 60 л оксида углерода в минуту [13].

Расчет объемов выбросов основывается на данных по удельным показателям выбросов на единицу использованного топлива по обобщенным группам транспортных средств (бензиновые, дизельные, автомобили на сжатом газе, на сжиженном газе) и экологическим классам, а также сведениях об объемах топлива, израсходованного на работу транспорта [14].

Объем выбросов от мобильных источников за исследуемый период снизился на 98,8 тыс. т (рис. 7).

Наиболее значительный темп снижения объема выбросов загрязняющих веществ от мобильных источников был отмечен в 2015 г. и соответствовал значению 9,1 %.

Снижение объемов выбросов обусловлено постепенным выводом из эксплуатации устаревших транспортных средств, а также ростом автопарка с усовершенствованными системами и механизмами отведения выхлопных газов, использованием гибридных и электродвигателей. Тем не менее, в стране доля транспорта в совокупных выбросах в атмосферный воздух остается высокой.

В 2018 г. наибольшее количество загрязняющих веществ поступило в атмосферный воздух от мобильных источников на территории Минской обл. (22,6 %), г. Минска (17,3 %) и Брестской обл. (15,1 %), наименьшее – в Могилевской обл. (9,3 %) (рис. 8).

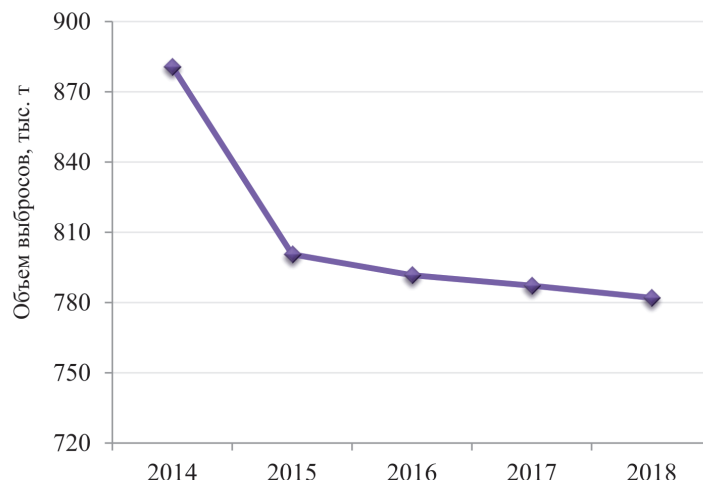


Рис. 7. Объем выбросов от мобильных источников в Республике Беларусь, тыс. т

Fig. 7. The volume of emissions from mobile sources in the Republic of Belarus, thousand tons

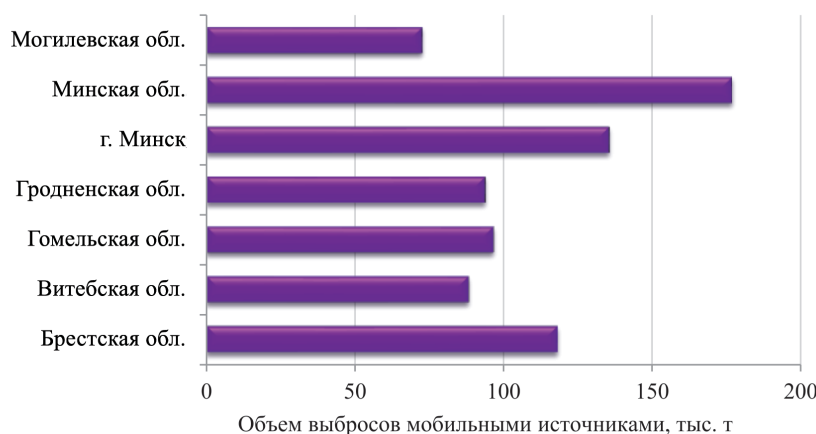


Рис. 8. Распределение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от мобильных источников по областям и г. Минску (2018 г., в тыс. т)

Fig. 8. Distribution of pollutant emissions into the air from mobile sources by regions and the city of Minsk (2018, in thousand tons)

В целом по республике в 2018 г. объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от мобильных источников снизился на 5,2 тыс. т по сравнению с 2017 г. (табл. 2).

Таблица 2

**Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух
от мобильных источников в Республике Беларусь, тыс. тонн**

Table 2

Dynamics of pollutant emissions into the air from mobile sources in the Republic of Belarus, thousand tons

Год	Всего	Углерода оксид	Азота диоксид	Серы диоксид	Углеводо- роды	Сажа	Бенз(а)- пирен, кг
2017	787,2	514,0	85,4	0,07	164,0	23,7	612,0
2018	782,0	508,5	85,6	0,1	164,2	23,6	608,5

В 2018 г. по сравнению с 2017 г. наиболее значительно из всего ингредиентного состава снизились выбросы углерода оксида (на 5,5 тыс. т или 1,1 %) и бенз(а)пирена (на 3,5 кг или 0,6 %).

По данным 2018 г., наибольший вклад в общий выброс загрязняющих веществ был внесен автомобильным транспортом (71,9 %) (рис. 9).

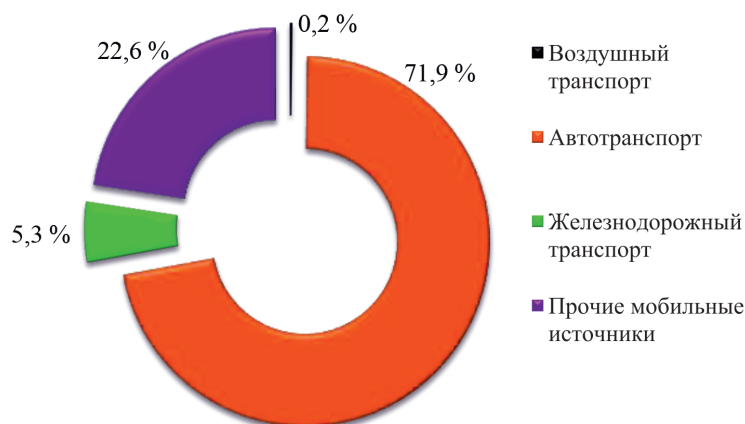


Рис. 9. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от мобильных источников по видам транспорта в Республике Беларусь (2018 г., в %)

Fig. 9. Emissions of pollutants into the air from mobile sources by mode of transport in the Republic of Belarus (2018, in %)

На долю железнодорожного и воздушного транспорта пришлось по 5,3 и 0,2 % соответственно.

Относительно уровня 2017 г. в 2018 г. выбросы от автотранспорта снизились на 1,4 тыс. т или 0,2 %. Однако выбросы загрязняющих веществ от воздушного и железнодорожного транспорта напротив увеличились на 0,3 тыс. т и 1,5 тыс. т соответственно.

Заклучение

Таким образом, установлено, что с 2014 по 2018 г. в Республике Беларусь отмечено снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на 8,1 %, при этом от стационарных и мобильных источников на 2,1 и 11,2 % соответственно.

В 2018 г. наиболее значительная доля выбросов загрязняющих веществ в атмосферу была выброшена источниками Минской обл. (32,5 %).

Стационарными источниками обрабатывающей промышленности в 2018 г. был выброшен наибольшим объемом загрязняющих веществ в атмосферу (38,3 % от общего объема выбросов от стационарных источников). Автомобильный транспорт вносит наибольший вклад в общий выброс загрязняющих веществ (71,9 %).

Несмотря на наметившуюся положительную тенденцию снижения объемов выбросов в атмосферу, необходима дальнейшая модернизация автомобильного парка, популяризация движения на велосипедах и внедрение электротранспорта. Снижение выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников возможно за счет их модернизации. Для этого потребуются инновационные проектные решения и время на их реализацию.

Поскольку антропогенное загрязнение окружающей среды оказывает выраженное воздействие на формирование популяционного здоровья населения, то принятие мер, направленных на сокращение загрязнения воздуха, станут беспримысленной стратегией в отношении охраны здоровья как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе.

Библиографические ссылки

1. Герасенко ВП. *Формирование механизма устойчивого развития региона*. Монография. Минск: Белорусский государственный экономический университет, 2005.
2. Бурак ИИ. *Экологическая медицина*. В 2 ч. Ч. 1. Витебск: ВГМУ; 2018.
3. Гичев ЮП. Загрязнение окружающей среды и экологическая обусловленность патологии человека. Аналитический обзор. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН; 2003.
4. Куликов ЯК. *Экологические проблемы Беларуси*. Курс лекций для студентов биологического факультета. Минск: Белорусский государственный университет; 2006.
5. Голицын АН. *Промышленная экология и мониторинг загрязнения природной среды*. Москва: ОНИКС; 2007.
6. Шевцова НС, Шевцов ЮЛ, Бацукова НЛ. *Стандарты качества окружающей среды*. Минск: Новое знание; 2012.
7. Киреев ВП. Экономика природопользования. Минск: Государственный институт управления и социальных технологий; 2014.
8. Глазачева ГИ, Валентейчика ВВ. *Государственный кадастр атмосферного воздуха*. Информационный бюллетень 2017 год. Минск: РУП «Бел НИЦ «Экология»; 2018.
9. Медведева ИВ. *Охрана окружающей среды в Республике Беларусь*. Статистический сборник. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь; 2019.
10. Савилов ЕД. *Эпидемиологический анализ*. Методы статистической обработки материала. Новосибирск: Наука-центр; 2011.
11. Стожаров АН. *Экологическая медицина*. Минск: Минский государственный медицинский институт; 2000.
12. Семченков СС, Капский ДВ. *Транспортная экология*. Минск: БНТУ; 2017.
13. Сыса АГ, Дубина МА. *Гигиена окружающей среды*. Минск: Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова БГУ; 2015.
14. Бурак ВМ, Глазачева ГИ, Курлович ТИ. *Состояние природной среды Беларуси*. Минск: РУП «Бел НИЦ «Экология»; 2019.

References

1. Gerasenko VP. *Formirovanie mekhanizma ustojchivogo rasvitiy regiona*. Monographiy [Formation of the mechanism of sustainable development of the region]. Minsk: Belarusian State Economic University; 2005. Russian.
2. Burak II. *Ekologicheskay medicina*. V 2 ch. Ch. 1 [Environmental Medicine]. Vitebsk: VSMU; 2018. Russian.
3. Gichev Y. *Zagrazneniy okruzhajushchey sredy i ekologicheskaja obuslovlennost patologii cheloveka*. Analiticheskiy obsor [Environment Pollution and Ecology-related Human Pathology]. Novosibirsk: SPSL SB RAS; 2003. Russian.
4. Kulikov YK. *Ekologicheskie problemy Belarusi*. Kurs lektisy dla studentov biologicheskogo fakulteta [Ecological problems of Belarus]. Minsk: Belarusian State University; 2006. Russian.
5. Golitsyn AN. *Promyshlennaja ekologiya i monitoring zagraznenija prirodnoy sredy* [Industrial ecology and monitoring of environmental pollution]. Moscow: ONICS; 2007. Russian.
6. Shevtsova NS, Shevtsov YuL, Batsukova NL. *Standarty kachestva okruzhajushchey sredy* [Environmental Quality Standards]. Minsk: New Knowledge; 2012. Russian.
7. Kireenko VP. *Ekonomika prirodopolzovaniya* [Environmental economics]. Minsk: State Institute of Management and Social Technologies; 2014. Russian.
8. Glazacheva GI, Valenteychika VV. *Gosudarstvennyy kadastr atmosfernogo vozdukha*. Informatsionnyy buleten 2017 god [State Air Cadastre]. Minsk: RUE Bel SIC Ecology; 2018. Russian.
9. Medvedeva IV. *Okhrana okruzhajushchey sredy v Respublike Belarus*. Statisticheskiy sbornik [Environmental protection in the Republic of Belarus]. Minsk: National Statistical Committee of the Republic of Belarus; 2019. Russian.
10. Savilov ED. *Epidemiologicheskij analisis*. Metody statisticheskoy obrabotki [Epidemiological analysis. Methods of statistical processing of material]. Novosibirsk: Science Center; 2011. Russian.
11. Stozharov AN. *Ekologicheskaja meditsina* [Environmental Medicine]. Minsk: Minsk State Medical Institute; 2000. Russian.
12. Semchenkov SS, Kapsky DV. *Transportnaya ekologiya* [Transport ecology]. Minsk: BNTU; 2017. Russian.
13. Sysa AG, Dubin MA. *Hihiena okruzhajushchey sredy* [Environmental hygiene]. Minsk: International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University; 2015. Russian.
14. Burak VM, Glazacheva GI, Kurlovich TI. *Sostojanie prirodnoy sredy Belarusi* [The state of the environment of Belarus]. Minsk: RUE Bel SIC Ecology; 2019. Russian.

Статья поступила в редколлегию 10.04.2020.
Received by editorial board 10.04.2020.

УДК504.54

ВЛИЯНИЕ СЕЗОННОГО ВЪЕЗДА И ПРОЕЗДА АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА В ЩУЧИНСКО–БОРОВСКОЙ КУРОРТНОЙ ЗОНЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Б. С. МАЙКАНОВ¹⁾, Л. Т. АУТЕЛЕЕВА¹⁾

¹⁾Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина,
пр. Женис, 62, 010001, г. Нур-Султан, Казахстан

Анализ сезонного въезда и проезда автотранспортных средств и измерение качественных показателей атмосферного воздуха проводили на четырех контрольно-пропускных пунктах и на поляне Абылай-хана в Щучинско-Боровской курортной зоне в течение трех периодов (холодный, переходной, теплый). Установлено, что количество автотранспорта в холодный, переходный и теплый период соотносятся, как 3204:2480:993. Показатели стандартного индекса (2,14) и наибольшей повторяемости (16,6 %) теплого периода характеризует высокий уровень загрязнения диоксидом серы. Средняя концентрация SO₂ на контрольно-пропускном пункте № 4 превышает 2 ПДК и составляет 1,070±0,03 мг/м³.

Ключевые слова: Щучинско-Боровская курортная зона (ЩБКЗ); атмосферный воздух; автотранспортное средство; диоксид серы.

THE EFFECT OF SEASONAL ACCESS AND PASSAGE OF MOTOR VEHICLE ON THE AIR QUALITY IN THE SHCHUCHINSKO–BOROVSKAYA ZONE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

B. S. MAIKANOV^a, L. T. AUTELEEVA^a

^aKazakh Agro Technical University named after S. Seifullin
62, Zhenis Avenue, Nur-Sultan 010001, Kazakhstan

The analysis of the seasonal access and passage of vehicles and measurement of atmospheric air quality were carried out at four checkpoints and Abylai-khan Meadow in the Shchuchinsko-Borovskoy resort zone within three periods (cold, transitional, warm). It was found that the number of vehicles increases in the warm period (3204: 2480: 993) than in the transitional and cold periods. The standard index (2.14) and the highest repeatability (16.6%) of the warm period are characterized by a high level of sulfur dioxide pollution. The average concentration of SO₂ at checkpoint No. 4 exceeds 2 MAC and amounts to 1.070 ± 0.03 mg / m³.

Keywords: Shchuchinsko-Borovskoy resort zone (ShchBRZ); atmospheric air; motor vehicle; sulfur dioxide.

Образец цитирования:

Майканов БС, Аутелеева ЛТ. Влияние сезонного въезда и проезда автомобильного транспорта на качество воздуха в Щучинско-Боровской курортной зоне Республики Казахстан. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;2:87–93.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-87-93>

For citation:

Maikanov BS, Auteleeva LT. The effect of seasonal access and passage of motor vehicle on the air quality in the Shchuchinsko-Borovskaya zone of the Republic of Kazakhstan. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;2:87–93. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-87-93>

Авторы:

Балгабай Садепович Майканов – доктор биологических наук; профессор кафедры ветеринарной санитарии.
Лаура Тюлегеновна Аутелеева – кандидат ветеринарных наук; старший преподаватель кафедры ветеринарной санитарии.

Authors:

Balgabay S. Maikanov, doctor of science (biological); professor at the department of veterinary sanitation.
maikanov@mail.ru
Laura T. Auteleeva, PhD (veterinary); senior lecturer at the department of veterinary sanitation.
laura_aut@list.ru

Введение

По статистике ученых, в настоящее время 91% мирового населения проживает в районах, где уровень загрязнения превышает значения, установленные в Рекомендациях ВОЗ по качеству воздуха. По оценкам ВОЗ, в 2016 г. около 58 % случаев преждевременной смерти, связанной с загрязнением атмосферного воздуха, произошли в результате ишемической болезни сердца и инсульта, 18 % – в результате хронической обструктивной болезни легких или острых инфекций нижних дыхательных путей и 6 % – в результате рака легких [1].

Снижение риска выкидышей включено в Цели устойчивого развития (ЦУР) Организации Объединенных Наций. Однако мало что известно о том, как самопроизвольный аборт в первом триместре (МАФТ) связан с загрязнением воздуха. По результатам исследований китайских ученых определена количественная связь между воздействием загрязнения воздуха и выкидышами. За период 2009 по 2017 гг. были проанализированы сведения о 255 668 беременных женщинах. Полученные данные свидетельствуют о связи между выкидышами и болезнями матери с загрязнением атмосферного воздуха (PM_{2.5}, SO₂, O₃ и CO) [2].

Международный туризм оказывает влияние на политические, экономические и культурные связи между государствами. По результатам исследований журнала «Tourism Management Perspectives» установлено, что загрязнение воздуха сокращает въездной туризм. Используя данные Google Trends, исследователи измерили опасения по поводу загрязнения для Китая. Растущее беспокойство по поводу загрязнения может нанести ущерб туристическому сектору в экономике [3].

В настоящее время отношение России и Казахстана основано на взаимном доверии и тесном сотрудничестве. Туристская индустрия остается одним из высокодоходных и быстро развивающихся отраслей международной торговли. Особенностью казахстанских курортов, прежде всего являются их лечебные свойства. Одним из перспективных направлений туризма в Казахстан для российских туристов стал курорт Боровое. Вместе с тем основными целями такого сотрудничества являются: 1) использование туристских связей для укрепления взаимопонимания и доверия между странами; 2) использование туризма для развития взаимовыгодных экономических, торговых отношений; 3) расширение связей и контактов по линии научно-технических и культурных организаций и отдельных личностей; 4) создание в указанных целях на взаимной основе наиболее благоприятных условий для туристского обмена между заинтересованными странами, организация технического сотрудничества путем обмена туристской информацией, выработки общих стандартов и технологий обслуживания туристов, упрощение туристских формальностей [4].

В Щучинско-Боровскую курортную зону приезжают люди со всей России и стран СНГ, чтобы насладиться изумительной природой и поправить здоровье. Санатории специализируются на лечении заболеваний органов дыхания, сердечно-сосудистой системы, опорно-двигательного аппарата и желудочно-кишечного тракта [5].

Щучинско-Боровская курортная зона расположена на территории Бурабайского района Акмолинской области Республики Казахстан. Общая площадь составляет 159 932 гектаров. В географическом отношении – это кольцевая структура островного типа, представляющая собой оазис, окруженный пространствами степей. Уникальное сочетание сосновых лесов с крупными озерами обеспечивает не только высокую эстетическую ценность ландшафта, но и богатый рекреационный, бальнеологический потенциал территории [6].

В соответствии с планом развития Щучинско-Боровской курортной зоны на 2017–2020 гг., планируется увеличить количество туристов курортной зоны до 2 млн чел. в год [7]. Рост автомобильного транспорта приводит к возникновению экологических проблем, связанных с охраной окружающей среды. Негативные последствия загрязнения атмосферы выхлопными газами выражаются в ухудшении здоровья человека, а также в поражении посевов, природной растительности, в усилении коррозии металлических конструкций, разрушении зданий и сооружений. Количественная оценка влияния автотранспортных средств (АТС) на окружающую среду необходима для определения значимости отдельных факторов, выявления соответствующих закономерностей и разработки эффективных механизмов управления природоохранной деятельностью в городе [8].

С увеличением интенсивности движения автотранспортных потоков максимальные приземные концентрации возрастают. С уменьшением скорости движения АТС с 60 до 5 км/час на линейных участках автомагистралей концентрации оксида углерода увеличиваются в 1,5–8 раз, концентрации оксидов азота уменьшаются в 1,1–1,6 раза [9].

Выбросы автомобильного транспорта относятся к выбросам передвижных источников и определяются выбросами загрязняющих веществ автотранспортных средств во время их транспортной работы. Источником выделения вредных веществ автотранспортного средства является установленный на нем двигатель внутреннего сгорания. Из-за отсутствия надлежащих методик в последние годы в Казахстане не производятся расчеты выбросов автотранспорта и в ежегодных сводных отчетах Агентства по статистике РК

с 2005 г. отсутствуют данные по выбросам загрязняющих веществ и парниковых газов от автотранспортных средств и передвижных источников [10]. Цель нашего исследования – изучение влияния сезонного въезда и проезда автотранспорта на показатели качества воздуха в Щучинско-Боровской курортной зоне.

Материалы и методы исследования

Подсчет сезонного въезда и проезда автомобильного транспорта по курортной зоне был произведен на четырех контрольно-пропускных постах: КПП № 1 – поселок Акылбай, КПП № 2 – поселок Бурабай; КПП № 3 – санаторий Жекебатыр, КПП № 4 – РУЦ «Балдаурен» и на поляне Абылай-хана. Стоимость въезда составляет 241 тенге с одного человека. Видеофиксация и регистрация автомобилей не производится на КПП. Исследования проводили в 2019 г. в три периода (холодный, переходной и теплый). Расчет суммарного выброса вредных веществ проводили по методике «Расчет выбросов вредных веществ в отработавших газах автомобильных двигателей» [11]. Отбор проб воздуха на контрольно-пропускных пунктах проводили в трех повторениях с интервалом 20 мин, с учетом влажности и скорости ветра окружающей среды. Отбор проб и исследования образцов атмосферного воздуха проводили согласно методике [12]. Всего было отобрано 160 проб воздуха.

Результаты исследования и их обсуждение

За холодный период всего зафиксировано 993 въехавших автомашин, из них легковые – 934, автобусы, минивены – 30 и грузовой автотранспорт – 29. В будни всего заехало 284 автомашины, из них легковые – 268, автобусы, минивены – 6; грузовой автотранспорт – 10; в праздничные дни всего 454, из них легковые – 437, автобусы, минивены – 13 и грузовой автотранспорт – 4; в выходные дни всего автомашин – 463 из них легковые – 437, автобусы, минивены – 11 и грузовой автотранспорт – 15 (табл. 1).

Таблица 1

Количество автотранспортных средств, въехавших в исследуемые периоды за сутки

Table 1

Number of vehicles that entered the study periods per day

Вид авто	Будни	Выходные	Праздники	Всего	Периоды
Легковые	268	437	229	934	холодный
	574	1003	736	2313	переходной
	611	801	1452	2864	теплый
Всего	1453	2241	2417	6111	
Автобусы	6	11	13	30	холодный
	8	45	38	91	переходной
	67	66	97	230	теплый
Всего	81	122	148	351	
Грузовые	10	15	4	29	холодный
	30	50	54	137	переходной
	50	25	35	110	теплый
Всего	90	90	96	276	
	1624	2455	2661		

За переходный период всего зафиксировано 2480 въехавших автомашин, из них легковые – 2313 автобусы, минивены – 30 и грузовой автотранспорт – 29. В будни всего заехало 612 автомашин, из них легковые – 574, автобусы, минивены – 8; грузовой автотранспорт – 30; в праздничные дни всего 828, из них легковые – 736, автобусы, минивены – 38 и грузовой автотранспорт – 54; в выходные дни всего автомашин – 1098, из них легковые – 1003, автобусы, минивены – 45 и грузовой автотранспорт – 50. Как следует из табл. 1, за теплый период всего зафиксировано 3204 въехавших автомашин, из них легковые – 2864, автобусы, минивены – 230 и грузовой автотранспорт – 110. В будние всего заехало 728 автомашин,

из них легковые – 611, автобусы, минивены – 67; грузовой автотранспорт – 50; в выходные всего 892, из них легковые – 801, автобусы, минивены – 66 и грузовой автотранспорт – 25. Подсчет автотранспортных средств был сделан для определения суммарного выброса газов (табл. 2).

Таблица 2

Суммарный выброс газов автомашин за исследуемые периоды

Table 2

Total emission of vehicle gases during the study periods

Категории АТС	CO, (т)	CH, (т)	NO, (т)	SO ₂ , (т)
холодный				
Легковой	2,85	0,18	0,0004	0,0004
Автобусы	0,01	0,0028	0,01	0,002
Грузовой	0,007	0,003	0,0002	0,005
Всего	2,867	0,517	0,0124	0,014
переходной				
Легковой	5,73	0,49	1,79	0,0013
Автобусы	0,0035	0,011	0,33	0,0045
Грузовой	0,0027	0,016	0,06	0,0013
Всего	5,73	0,616	2,18	0,0071
теплый				
Легковой	1,31	0,3	0,45	0,01
Автобусы	0,063	0,02	0,08	0,02
Грузовой	0,029	0,02	0,07	0,01
Всего	1,402	0,07	0,6	0,04

Всего за холодный период суммарный выброс газов составляет: оксид углерода (CO) – 2,867 т; углеводорода (CH) – 0,517 т; оксид азота (NO) – 0,0124; диоксид серы (SO₂) – 0,014 т.

За переходной период: оксид углерода (CO) – 0,029 т; углеводорода (CH) – 0,07 т; оксид азота (NO) – 2,18; диоксид серы (SO₂) – 0,0071 т.

За теплый период: оксид углерода (CO) – 5,73 т; углеводорода (CH) – 0,616 т; оксид азота (NO) – 0,6; диоксид серы (SO₂) – 0,04 т.

Подсчет проезда автомобильного транспорта нами был проведен в теплый период на территории поляны Абылай-хана. Всего за сутки проехало 2831 автомашин, из них легковые – 2511, автобусы, минивены – 220 и грузовой автотранспорт – 100. На поляну Абылай-хана больше всего проезжают автотранспорта в выходные, чем в будни. Основная нагрузка идет на легковой транспорт, затем на автобусы и минивены.

Суммарный выброс газов автомашин составил: оксид углерода (CO) – легковые автомобили 2 и 3 категории – 1,21 т, автобусы, минивены – 0,063 т, грузовые АТ – 0,029 т; углеводорода (CH) – легковые автомобили 2 и 3 категории – 0,3 т, автобусы и минивены – 0,02 т, грузовой автотранспорт – 0,02 т; оксид азота (NO) – легковые автомобили 2 и 3 категории – 0,45 т, автобусы и минивены – 0,08 т, грузовой автотранспорт – 0,07 т; диоксид серы (SO₂) – легковые автомобили 2 и 3 категории – 0,01 т, автобусы и минивены – 0,02 т, грузовой автотранспорт – 0,01 т (табл. 3).

Исследования атмосферного воздуха в Щучинско-Боровской курортной зоне, проведенные в холодный и переходные периоды показали, что концентрация вредных веществ находится в пределах нормы. Однако установлены следовые количества показателей на всех контрольно-пропускных пунктов и на поляне Абылай-хана.

Показатели вредных веществ в теплом периоде находятся в пределах нормы за исключением диоксида серы, концентрация данного вещества превышает ПДК в 2 раза на КПП № 4 – $1,070 \pm 0,03 \text{ мг/м}^3$. Диоксид серы высокотоксичное вещество, относящееся к третьему классу опасности.

Таблица 3

Концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе (теплый период)

Table 3

Concentration of harmful substances in atmospheric air (warm period)

№	Наименование	КПП № 1	КПП № 2	КПП № 3	КПП № 4	п. Абылайх
1	Диоксид углерода	1070±0,01	936±0,04	1040±0,01	2200±0,02	1000±0,02
2	Сероводород	0,0012±0,02	0,002±0,05	0,0013±0,01	0,0014±0,04	0,0014±0,05
3	Диоксид азота	0,0014±0,01	0,002±0,03	0,002±0,02	0,0014±0,02	0,0014±0,02
4	Диоксид серы	0,0014±0,03	0,002±0,02	0,003±0,04	1,070±0,03	0,0014±0,04
5	Свинец	0	0	0	0	0
6	Ртуть	0	0	0	0	0
7	Аммиак	0,001±0,03	0,001±0,04	0	0,001±0,02	0,001±0,02
8	Сажа	0,013±0,01	0,013±0,02	0,014±0,02	0,01±0,03	0,01±0,03
9	Пыль цементная	0,002±0,01	0,013±0,01	0,013±0,001	0,01±0,001	0,01±0,05

Как следует из табл. 3 в теплый период на контрольно-пропускном пункте № 4 повышенный уровень загрязнения.

Показатель стандартного индекса по диоксиду серы был равным 2,14 и наибольшая повторяемость составила 16,6 % (табл. 4).

Таблица 4

Показатели СИ и НПИ во всех исследуемых периодах

Table 4

SI and NP indicators in all study periods

№	Наименование	КПП № 1	КПП № 2	КПП № 3	КПП № 4	п. Абылайх
холодный						
1	СИ	0,19	0,12	0,2	0,21	0,16
2	НПИ, %	0	0	0	0	0
переходной						
1	СИ	0,16	0,12	0,12	0,12	0,12
2	НПИ, %	0	0	0	0	0
теплый						
1	СИ	–	–	–	2,14	0,12
2	НПИ, %	0	0	0	16,6	0

Рост уровня загрязнения атмосферы происходит, по всей видимости, вследствие увеличения количества автомобилей, сжигания ими топлива, а также отсутствия на автомобилях современных средств снижения выбросов. Курортные зоны и места туризма не являются исключением, это подтверждается нашими исследованиями.

Таким образом, обобщая полученные данные, можно сказать, что количество автотранспорта возрастает в теплый период (3204:2480:993), чем в переходный и холодный. Больше всего по количеству въезжает легковой транспорт, затем автобусы и минивены и на третьем месте грузовые автомашины, что составляет (6111:351:273). Количество автомобилей во все периоды возрастает в праздничные дни, чем в выходные и будни (2661:2455:1445). Суммарный выброс газов автомашин за все периоды составляет: оксид углерода (CO) – 8,77 т; углеводорода (CH) – 0,39 т; оксид азота (NO) – 2,8 т; диоксид серы (SO₂) – 0,16 т. Автомобильный транспорт наиболее агрессивен в сравнении с другими видами транспорта по отношению к окружающей среде. Он является мощным источником ее химического (поставляет в окружающую среду

громадное количество ядовитых веществ), шумового и механического загрязнения. Исследования, проведенные в разных странах, показали, что при длительном воздействии загрязненного городского воздуха у детей снижается общее развитие и нарушается функция легких, а женщины рожают детей с низким весом и с дефектами развития [11].

В теплый период в контрольно-пропускном пункте № 4 был установлен повышенный уровень загрязнения. Показатели стандартного индекса (2,14) и наибольшей повторяемости (16,6 %). Концентрация диоксида серы, превышает норму в 2 раза на КПП № 4 – $1,070 \pm 0,03$ мг/м³. Например, в исследованиях Ж. Вологжина, С. А. Новикова, Ф. М. Ясько на территории туристско-рекреационной зоны побережья оз. Байкал установлено превышение диоксида серы в 1,5 раза от всех обследований с учетом зимнего и летнего периодов. Наименьший выброс диоксида серы был выявлен 17.01.2015 (14:00–14:20) – 0,60·10–3 г/с, что в 2 раза меньше средней величины за все зимние наблюдения. Увеличение данного показателя в летний период связано с ростом потока легкового автотранспорта [13]. Человек чувствителен к SO₂, при действии малых концентраций его (порядка 0,001 % по объему) наблюдаются явления раздражения преимущественно верхних дыхательных путей. При хроническом отравлении ранними признаками являются вегетативно-сосудистая дисфункция, нейроциркуляторные расстройства сочетаются с поражением желудка и печени [14]. В атмосфере диоксид серы вызывает конденсацию водяных паров в виде тумана даже в условиях, когда давление паров меньше требуемого для конденсации. Растворяясь в имеющейся на растениях влаге, диоксид серы образует кислый раствор, губительно действующий на растения [15].

Заключение

Таким образом, необходимо:

1. Создать экологическую зону на территории Щучинско-Боровской курортной зоны (пос. Бурабай) с ограничением проезда автотранспорта.
2. Организовать автомобильную парковку в трехкилометровой зоне от пос. Бурабай, место установки шлагбаума КПП, знака, запрещающего проезд.
3. Перенести главный контрольно-пропускной пункт, который в настоящее время находится в центре поселка, за территорию предполагаемой экологической зоны (кольцевая при въезде в пос. Бурабай).
4. Организовать проход по территории поселка пешком или на велосипедах.
5. Разрешить проезд автотранспорта по спецпропускам для местного населения, транспорта для обслуживания гостиничных комплексов, работы пристани.

Предложенные мероприятия позволят решить проблему перегруженности автотранспортным потоком пос. Бурабай, отдыхающие смогут любоваться красотой водных просторов и окрестных гор, не затрачивая время на поиски места парковки.

Библиографические ссылки

1. URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
2. Zhang L, Liu W, Hou K. Air pollution-induced missed abortion risk for pregnancies. *Nature Sustainability*. 2019;2:1011–1017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0387-y>.
3. Xu X, Reed M. Perceived pollution and inbound tourism in China. *Tourism Management Perspectives*. 2017;21:109–112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tmp>.
4. Сычов КН, Шоричева АЮ. Российско-казахстанское сотрудничество в сфере туризма на примере города Омска и курорта Боровое, Россия – Казахстан: приграничное сотрудничество, музейно-туристический потенциал, проекты и маршруты к событиям мирового уровня. В: *Сборник статей Международной научно-практической конференции*. Самара: [б.и.]; 2016. Вып. 1. URL: <https://regrazvitie.ru/wp-content/uploads/2016/01/Sychov-SHoricheva.pdf>
5. URL: <http://tr-kazakhstan.kz/kakovy-osobennosti-otdyxa-v-kazaxstane/>
6. *Летопись Природы за 2017 год*.
7. Постановление Правительства РК от 4 ноября 2017 г. № 709. План развития Щучинско-Боровской курортной зоны на 2017–2020 гг.
8. Кольшикина ДВ, Айыдов ДН, Кущенко ЛЕ. Негативное воздействие автомобильного транспорта на экологию. *Инновационная наука*. 2019;2:32–36.
9. Семененко МВ. К вопросу оценки влияния автотранспортных средств на окружающую среду городов. *Містобудування та територіальне планування*. 2012;2:498–502.
10. Полуэктова ПМ. *Метод оценки загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом с использованием геоинформационных систем*. Санкт-Петербург: [б.и.]; 2009
11. Джайлаубеков ЕА. *Расчет и анализ выбросов вредных загрязняющих веществ автотранспортными средствами в атмосферный воздух в Республике Казахстан*. Алматы: [б.и.]; 2010. 160 с.
12. МВИ КЗ 07.00.01612/1-2013 «Методика выполнения измерений массовой концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе газоанализатором ГАНК-4».
13. Макарьин РИ, Пугин БИ. *Расчет выбросов вредных веществ в отработавших газах автомобильных двигателей*. Архангельск: Архангельский государственный университет; 2004.

14. Ковригин АА, Маршалкович АС. Оценка воздействия от выбросов движущегося автотранспорта для обеспечения экологической безопасности жизнедеятельности горожан. *Строительство: наука и образование*. 2016;3:5–9.
15. Байкал СЖ, Вологжина СА, Новикова ФМ. Загрязнение атмосферного воздуха выбросами автомобильного транспорта на территории туристско-рекреационной зоны побережья озера. *Известие Серия «Науки о Земле»*. 2017;22:15–29.
16. Александров ВЮ, Кузубова ЛИ, Яблокова ЕП. Экологические проблемы автомобильного транспорта. В: *Аналитический обзор ГПНТБ СО РАН*. Новосибирск: [б.и.];1995. Выпуск 34. 113 с.

References

1. URL: [https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
2. Zhang L., Liu W., Hou K. Air pollution-induced missed abortion risk for pregnancies. *Nature Sustainability*. 2019;2:1011–1017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0387-y>.
3. Xu X., Reed M. Perceived pollution and inbound tourism in China. *Tourism Management Perspectives*. 2017;21:109–112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tmp>.
4. Syrov KN, Shoricheva AY. *Rossiysko-kazakhstanskoe sotrudnichestvo v sfere turizma na primere goroda Omska i kurorta Borovoe, Rossiya-Kazakhstan: prigranichnoe sotrudnichestvo, museyno-turisticheskiy potentsial, proekty i marshruty k sobytiyam mirovogo urovnya. V: Sbornike statej nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Russian-Kazakh cooperation in the field of tourism on the example of the city of Omsk and the resort of Borovoye, Russia - Kazakhstan: cross-border cooperation, museum-tourist potential, projects and routes to worldwide events. In: Collection article International scientific-practical conference]. Samara: [publisher unknown]; 2016. Vol. 1. URL: <https://regrazvitiye.ru/wp-content/uploads/2016/01/Syrov-SHoricheva.pdf>. Russian.
5. URL: <http://tr-kazakhstan.kz/kakovy-osobennosti-otdyxa-v-kazaxstane/>
6. *Letopis prirody za 2017 god* [Chronicle of Nature for 2017]. Russian.
7. *Postanovlenie pravitelstva RK ot 4 nojabra 2017 g.: № 709. Plan razvitiya Shchuchinsko-Borovskoy kurortnoy zony na 2017–2020 gg.* [The Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan dated November 4, 2017 No. 709. The development plan of the Shchuchinsko-Borovskoy resort zone for 2017–2020]. Russian.
8. Kolyshkina DV, Aiydov DN, Kushchenko LE. *Negativnoe vozdeystvie avtomobilnogo transporta na ekologiyu* [Negative impact of motor vehicle on the environment]. *Innovative science*. 2019;2:32–36. Russian.
9. Semenenko MV. *K voprosu vlianiya avtotransportnykh sredstv na okruzhayushchuyu sredyu gorodov* [On the issue of assessing the impact of motor vehicles on the environment of urban areas Collection]. *Urban and spatial planning*. 2012;2:498. Russian.
10. Poluektova PM. *Metod otsenki zagrazneniya atmosfery vozdukh avtomobilnym transportom s ispolzovaniem geoinformatsionnykh sistem* [A method for air pollution assessment by motor vehicles using geographic information systems]. Saint Petersburg: [publisher unknown], 2009.
11. Dzhaubaekov EA. *Raschet i analiz vybrosov vrednykh zagraznyayushchih veshchestv avtotransportnymi sredstvami v atmosferynyy vozdukh v Respublike Kazakhstan* [Calculation and analysis of emissions of harmful pollutants by motor vehicles into the air in the Republic of Kazakhstan]. Almaty: [publisher unknown]; 2010. 160 p. Russian.
12. MVI KZ 07.00.01612/1-2013 *Metodika vypolneniya izmereniy massovoy koncentratsii vrednykh veshchestv v atmosferynom vozdukhke hazoanalizatorom HANK-4* [Methodology for measuring the mass concentration of harmful substances in the atmospheric air with GANK-4 gas analyzer]. Russian.
13. Makarian RI, Puhin BI. *Raschet vybrosov vrednykh veshchestv v otrabotavshikh gazakh avtomobilnykh dvigateley*. [Calculation of emissions of harmful substances in the exhaust gases of automobile engines]. Arkhangelsk: Arkhangelsk State University; 2004. Russian.
14. Kovrigin AA, Marshalkovich AS. *Otsenka vozdeystvia ot vybrosov dvizhushchergosa transporta dla obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti zhiznedeatelnosti gorozhan* [Assessment of the effect of emissions from moving vehicles to ensure environmental safety of citizens]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2016;3:5. Russian.
15. Baikal SZh, Vologzhina SA, Novikova FM. *Zagraznenie atmosferynoy vozdukh vybrodami avtomobilnogo transporta na territorii turistsko-rekreatsionnoy zony poberezhia ozera* [Air pollution by motor vehicle emissions on the territory of the tourist and recreational zone of the lake coast]. *Bulletin Series "Earth Sciences"*. 2017;22:15–29. URL: http://izvestia_geo.isu.ru/en/index.html.
16. Aleksandrov VYu, Kuzubova LI, Yablokova EP. *Ekologicheskie problemy avtomobilnogo transporta. Analiticheskiy obsor GPNTB SO PAH* [Environmental Problems of Motor Vehicles. Analytical Review of the State Public Scientific Technical Library of the SB RAS]. Novosibirsk: [publisher unknown]; 1995. 113 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 20.03.2020.
Received by editorial board 20.03.2020.

СОДЕРЖАНИЕ

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

<i>Плавінскі М. А.</i> Археалагічная спадчына Беларусі як рэсурс устойлівага турызму: стан і перспектывы выкарыстання.	4
---	---

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Ибрагимова А. Г.</i> Распространение исчезающих растений в Кахском районе (Азербайджан): влияющие экологические факторы и прогнозирование потенциального распространения.	9
<i>Смольская О. С., Жукова А. А.</i> Содержание растительных пигментов в донных отложениях озер Нарочь, Мястро и Баторино.	18

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Герменчук М. Г.</i> Современная парадигма радиоэкологии и система радиационного мониторинга окружающей среды.	26
<i>Курбанов Б. И., Журакулов А. Р., Музафаров А. М.</i> Исследование возможности контроля элементного состава в технологических потоках по мгновенному гамма-излучению при захвате нейтронов.	36
<i>Шпадарук Е. М., Смолякова Р. М.</i> Оценка клеточных показателей периферической крови пациентов, страдающих раком поджелудочной железы, получавших адъювантную лучевую и химиолучевую терапию.	41

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Емельяненко Е. В., Тарутин И. Г.</i> Влияние параметров реконструкции на качество изображений в ПЭТ/КТ диагностике.	51
<i>Емельяненко Е. В., Тарутин И. Г.</i> Анализ системы контроля качества позитронно-эмиссионной томографии в Республике Беларусь.	59
<i>Кокорина Н. В., Малиновская Ю. В., Еришова-Павлова А. А.</i> Эпидемиологический мониторинг врожденной спинномозговой грыжи в условиях антропогенной нагрузки у населения Беларуси.	67

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Хрусталёва Е. Н.</i> Оценка выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух антропогенными источниками Республики Беларусь.	78
<i>Майканов Б. С., Аутелеева Л. Т.</i> Влияние сезонного въезда и проезда автомобильного транспорта на качество воздуха в Щучинско-Боровской курортной зоне Республики Казахстан.	87

CONTENTS

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

<i>Plavinski M. A.</i> Archaeological heritage of Belarus as a resource of sustainable tourism: state and prospects of use.	4
--	---

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Ibrahimova A. G.</i> Distribution pattern of threatened plants in Qakh district (Azerbaijan): environmental factors affecting and prediction of the potential distribution	9
<i>Smolskaya V. S., Zhukava H. A.</i> The contents of plant pigments in bottom sediments of lakes Naroch, Myastro and Batorino.....	18

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Germenchuk M. G.</i> Modern paradigm of radioecology and environmental radiation monitoring system.	26
<i>Kurbanov B. I., Jurakulov A. R., Muzafarov A. M.</i> Research of the possibility of monitoring the element composition in technological flows by prompt gamma-radiation at neutrons capture.....	36
<i>Shpadaruk K. M., Smolyakova R. M.</i> Evaluation of cell performance peripheral blood of patients with cancer of the pancreas, received adjuvant radiotherapy and chemoradiotherapy	41

MEDICAL ECOLOGY

<i>Emelyanenko E. V., Tarutin I. G.</i> Influence of reconstruction parameters on the quality of the diagnostic image.....	51
<i>Emelyanenko E. V., Tarutin I. G.</i> Quality control system analysis of positron-emission tomography in the Republic of Belarus.....	59
<i>Kokorina N. V., Malinovskaya Yu. V., Ershova-Pavlova A. A.</i> Epidemiological monitoring of congenital spinal hernia under conditions of anthropogenic load in the population of Belarus	67

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Khrustalyova A. N.</i> Evaluation of emissions of polluting substances in the atmospheric air by anthropogenic sources of the Republic of Belarus.....	78
<i>Maikanov B. S., Auteleeva L. T.</i> The effect of seasonal access and passage of motor vehicle on the air quality in the Shchuchinsko-Borovskaya zone of the Republic of Kazakhstan	87

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. 2020**

Учредитель:
Белорусский государственный университет

Юридический адрес: пр. Независимости, 4,
220030, Минск.

Почтовый адрес: ул. Долгобродская, 23/1,
220070, Минск.

Тел. 398-89-34, 398-93-44.

E-mail: jecology@bsu.by

«Журнал Белорусского государственного
университета. Экология» издается с сентября 2017 г.
До августа 2017 г. выходил под названием
«Экологический вестник»
(ISSN 1994-2087).

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

Подписано в печать 25.06.2020.
Тираж 100 экз. **Заказ**.

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

© БГУ, 2020

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 2. 2020**

Founder:
Belarusian State University

Registered address: 4 Niezaliežnasci Ave.,
220030, Minsk.

Correspondence address: 23/1 Daiŭhabrodskaja Str.,
220070, Minsk.

Tel. 398-89-34, 398-93-44.

E-mail: jecology@bsu.by

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

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

Signed print 25.06.2020.
Edition 100 copies. **Order number**.

RUE «Information Computing Center of the Ministry
of Finance of the Republic of Belarus».
License for publishing No. 02330/89, 3 March, 2014.
17 Kalvaryjskaya Str., 220004, Minsk.

© BSU, 2020