

ISSN 1810-9810

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ

NATURAL RESOURCES

**№ 2
2019**

Научное издание
SCIENTIFIC EDITION

Национальная академия наук Беларуси
Министерство природных ресурсов и охраны
окружающей среды Республики Беларусь
National Academy of Sciences of Belarus
Ministry of Natural Resources and Environmental
Protection of the Republic of Belarus

**Навуковы часопіс
«ПРЫРОДНЫЯ РЭСУРСЫ»
Выдаецца з 1996 года
Выходзіць 2 разы ў год
Снежань 2019 г.**

Заснавальнікі:
Нацыянальная акадэмія навук Беларусі
Міністэрства прыродных рэсурсаў і аховы
навакольнага асяроддзя
Рэспублікі Беларусь

Галоўны рэдактар
Міхаіл Яфімавіч Нікіфараў

Рэдакцыйная калегія:
І. І. Ліштван /намеснік галоўнага рэдактара/
А. І. Чайкоўскі /намеснік галоўнага рэдактара/
Я. В. Рошчына – /вядучы рэдактар журналу/
М. П. Аношка, У. М. Байчораў, А. І. Барадзін, С. У. Буга,
І. В. Войтаў, С. Я. Галаваты, М. Р. Гермянчук, В. І. Гіпчык,
В. В. Грычык, С. В. Дзямідава, С. А. Дубянок, Дз. Л. Іваноў,
А. І. Кавалевіч, М. В. Клебановіч, А. М. Корбут,
К. У. Кузняцова, Б. В. Курзо, Р. Ю. Лабазнаў, В. В. Лапа,
С. А. Лысенка, А. А. Махнач, А. В. Нявераў, А. В. Пугачэўскі,
В. П. Сяменчанка, А. Э. Томсан, В. С. Хоміч, У. У. Ціток,
В. С. Шымава, М. А. Ярэўска

Адрас рэдакцыі:
вул. Акадэмічная, 1, к. 119,
220072, г. Мінск
Тэл. +375 17 284 19 19.
E-mail: prirod_res@mail.ru

Падпісныя індэксы:
012762 ведамасны
01276 індывідуальны

Камп'ютарная верстка А. У. Новік
Падпісана да друку 16 снежня 2019 г.
Фармат 60×84 1/8. Папера афсетная. Друк лічбавы.
Ум. друк. л. 16,28. Ул.-выд. л. 14,4.
Наклад 56 экз. Заказ 315.
Кошт: індывідуальная падпіска – 21,44 руб.,
ведамасная падпіска – 21,64 руб.

Выдавец і паліграфічнае выкананне:
Рэспубліканскае ўнітарнае прадпрыемства
«Выдавецкі дом «Беларуская навука».
Пасведчанні аб ДРВВРДВ №1/18 ад 02.08.2013,
№2/196 ад 05.04.2017, ЛП №02330/455 ад 30.12.2013.
Вул. Ф. Скарыны, 40, 220141, г. Мінск

**Scientific Journal
“NATURAL RESOURCES”
Published since 1996
Issued twice a year
December 2019**

Founders:
National Academy of Sciences of Belarus
Ministry of Natural Resources and
Environmental Protection
of the Republic of Belarus

Editor-in-Chief
Michael Yefimovich Nikiforov

Editorial board:
I. I. Lishtvan /Associate Editor-in-Chief/
A. I. Tchaikovsky /Associate Editor-in-Chief/
Ya. V. Roshchina /Lead Editor/
V. M. Baichorov, O. I. Borodin, S. V. Buga, I. V. Voitov,
M. G. Germenchuk, V. I. Gipchik, S. E. Golovaty,
V. V. Grichik, S. V. Demidova, S. A. Dubenok, M. A. Yeresko,
D. L. Ivanov, N. V. Klebanovich, A. I. Kovalevich,
A. N. Korbut, E. V. Kuznetsova, B. V. Kurzo, R. Yu. Labaznov,
V. V. Lapa, S. A. Lysenko, A. A. Makhnach, A. V. Neverov,
M. P. Onoshko, A. V. Pugachevskii, V. P. Semchenko,
V. V. Titok, A. E. Tomson, V. S. Khomich, O. S. Shimova

Address of editorial office:
1, Akademicheskaya str., room 119, 220072, Minsk,
Republic of Belarus.
Phone: 375 17 284 19 19
E-mail: prirod_res@mail.ru

Subscription indices:
012762 departmental
01276 individual

Computer imposition A. V. Novik
Signed for publication December 16, 2019
Format 60×84 1/8. Offset paper. Seal digital.
Related press sheet 16.28. Publisher's signatures 14.4.
Circulation 56 copies. Order 315.
Price: individual subscription – 21.44 BYN,
departmental subscription – 21.64 BYN.

Publisher and printing:
Republican Unitary Enterprise
“Publishing house “Belarusian Navuka”.
Certificates by SRPMDPE N 1/18 on 08.02.2013,
N 2/196 on 05.04.2017, LP N 02330/455 on 30.12.2013.
Str. Skorina, 40, 220141, Minsk

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЧВЕННО-ЗЕМЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

- Оношко М. П., Глаз А. С., Смыкович Л. И., Подружая М. А.** Оценка потенциальной способности почв Беларуси к самоочищению от нефти и нефтепродуктов 5
- Рыжиков В. А., Романкевич Ю. А., Савченко С. В., Зайнь Эль-Динь Р. М.** Ранжирование городов Беларуси по устойчивости почв к техногенным химическим нагрузкам 15

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

- Мансури-Фар Сиамак.** Геотермический режим и геохимия горячих источников горы Сабалан (северо-западный Иран) *(на англ. яз.)* 23

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

- Плакс Д. П.** О переотложенных остатках силурийской ихтиофауны в четвертичных отложениях Беларуси *(на англ. яз.)* 34
- Лапука И. И., Вежновец В. В.** Таксономический состав зообентоса озер Северный Волос и Южный Волос и его изменение с глубиной 46
- Гарри Смит, Дэвид Темпельман.** Перечень водяных клещей Беларуси (*Acari: Hydrachnidia*) *(на англ. яз.)* . . . 54
- Мороз М. Д., Вежновец В. В.** Макрозообентос реки Ствиги в пределах заказника «Ольманские болота» . . . 64
- Тюлькова Е. Г.** Действие ароматических углеводов на фотосинтетический аппарат саженцев древесных растений 72

КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

- Логинов В. Ф., Хитриков М. А.** Оценка биоклиматического потенциала Беларуси с использованием данных дистанционного зондирования и компьютерного моделирования 82
- Божкова В. В., Болотько Л. М., Людчик А. М., Павленко П. Н., Умрейко С. Д.** Климатическая норма приземного озона в чистой атмосфере Беларуси. 94
- Логинов В. Ф., Мельник В. И.** Особенности изменения осадков в Белорусском Полесье в современный период. 104

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ, ЭКОЛОГОБЕЗОПАСНЫЕ И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Ламан Н. А., Прохоров В. Н.** Распространение борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) при использовании плодородного слоя почвы со строительных площадок 113

ОБЗОРЫ

- Шевцова Н. С., Вишняк А. К., Пахомов А. В.** Научно-методические подходы к оценке природного туристско-рекреационного потенциала водных объектов 122

CONTENTS

SOIL AND LAND RESOURCES

- Onoshko M. P., Glaz A. S., Smykovich L. I., Podruzhaya M. A.** Assessment of the potential capacity of soils of Belarus for self-purification from oil and oil products 5
- Ryzhykau U. A., Ramankevich J. A., Savchenko S. V., Zain El-Dzin R. M.** Ranking of Belarusian cities by sustainability of soils to technogenic chemical pressure 15

WATER RESOURCES

- Mansouri-Far Siamak.** Geothermal regime and geochemistry of hot springs in Mount Sabalan (Northwest of Iran) 23

BIOLOGICAL RESOURCES

- Plax D. P.** On the redeposited silurian ichthyofauna remains in the quaternary deposits of Belarus 34
- Lapuka I. I., Vezhnavev V. V.** Taxonomic composition of zoobentos of "Severnyi Volos" and "Yuzhnyi Volos" lakes and its change with depth 46
- Harry Smit, David Tempelman.** A checklist of the water mites from Belarus (*Acari: Hydrachnidia*) 54
- Moroz M. D., Vezhnavev V. V.** Macrozoobenthos of Stviga river within the bounds of the wildlife area "Olmanskiye bolota" 64
- Tyulkova E. G.** The effect of aromatic hydrocarbons on photosynthetic apparatus of woody plants saplings 72

CLIMATIC RESOURCES

- Loginov V. F., Khitrykau M. A.** Estimation of bioclimatic potential of Belarus using remote sensing data and computer modeling 82
- Bozhkova V. V., Bolotsko L. M., Liudchik A. M., Pavlenko P. N., Umreiko S. D.** Climatic norm of surface ozone in clear atmosphere of Belarus 94
- Loginov V. F., Melnik V. I.** Features of changes in precipitation in Belarusian Polesia in modern period 104

NATURE MANAGEMENT, ECOLOGICALLY SAFE AND RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES

- Laman N. A., Prokhorov V. N.** Distribution of Sosnowsky's hogweed (*Heraclеum sosnowskyi* Manden.) when using fertile soil layer from building sites 113

REVIEWS

- Shevtsova N. S., Vishnyak A. K., Pakhomov A. V.** Scientific and methodological approaches for assessment of natural tourist-recreational potential of water bodies 122

ЗМЕСТ

ГЛЕБАВА-ЗЯМЕЛЬНЫЯ РЭСУРСЫ

- Аношка М. П., Глаз А. С., Смыковіч Л. І., Падружыя М. А.** Ацэнка патэнцыяльнай здольнасці глеб Беларусі да самаачышчэння ад нафты і нафтапрадуктаў 5
- Рыжыкаў У. А., Раманкевіч Ю. А., Зайн Эль-Дзін Р. М.** Ранжыраванне гарадоў Беларусі па ўстойлівасці глебы да тэхнагенных хімічных нагрузкаў 15

ВОДНЫЯ РЭСУРСЫ

- Мансур-Фар Сімак.** Геатэрмічныя ўмовы і геахімія гарачых крыніц гары Сабалан (паўночна-заходні Іран) 23

БІЯЛАГІЧНЫЯ РЭСУРСЫ

- Плак Дз. П.** Аб перакладзеных рэштках сілурыскай іхтыяфаўны ў чацвярцічных адкладах Беларусі 34
- Лапука І. І., Вежнавец В. В.** Таксанамічны склад заабентасу ў азёрах Паўночны Волас і Паўднёвы Волас і яго змяненне з глыбінёй 46
- Гары Сміт, Дэвід Тэмпельман.** Пералік вадзяных кляшчоў Беларусі (*Acari: Hydrachnidia*) 54
- Мароз М. Д., Вежнавец В. В.** Макразабентас ракі Сцвігі ў межах заказніка «Альманскія балоты» 64
- Цюлькова А. Р.** Дзеянне араматычных вуглевадародаў на фотасінтэтычны апарат саджанцаў драўняных раслін 72

КЛІМАТЫЧНЫЯ РЭСУРСЫ

- Логінаў У. Ф., Хітрыкаў М. А.** Ацэнка біякліматчнага патэнцыялу Беларусі з выкарыстаннем дадзеных дыстанцыйнага зандзіравання і камп'ютарнага мадэлявання 82
- Бажкова В. У., Балацько Л. М., Людчык А. М., Паўленка П. М., Умрэйка С. Дз.** Кліматычная норма прыземнага азону ў чыстай атмасферы Беларусі 94
- Логінаў У. Ф., Мельнік В. І.** Асаблівасці змянення ападкаў у Беларускім Палессі ў сучасны перыяд 104

ПРЫРОДАКАРЫСТАННЕ, ЭКОЛАГАБЯСПЕЧНЫЯ І РЭСУРСАЗБЕРАГАЛЬНЫЯ ТЭХНАЛОГІІ

- Ламан М. А., Прохараў В. М.** Распаўсюджванне баршчэўніка Сасноўскага (H.S.M.) пры выкарыстанні ўрадлівага пласта глебы з будаўнічых пляцовак 113

АГЛЯДЫ

- Шаўцова Н. С., Вішняк А. К., Пахомаў А. В.** Навукова-метадычныя падыходы да адзнакі прыроднага турысцка-рэкрэацыйнага патэнцыялу водных аб'ектаў 122

ПОЧВЕННО-ЗЕМЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ
SOIL AND LAND RESOURCES
ГЛЕБАВА-ЗЕМЕЛЬНЫЯ РЭСУРСЫ

УДК 550.4:551.4 (476)

М. П. Оношко¹, А. С. Глаз², Л. И. Смыкович³, М. А. Подружая¹

¹Филиал «Институт геологии» государственного предприятия «НПЦ по геологии»,
Минск, Беларусь, e-mail: onoshko_m44@mail.ru

²Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: alex_glas@nature.basnet.by

³Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: geosmykovich@gmail.com

**ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЧВ БЕЛАРУСИ К САМООЧИЩЕНИЮ
ОТ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ**

Приведены результаты территориальной оценки потенциальной способности почв к самоочищению от нефти и нефтепродуктов с учетом основных природных факторов, влияющих на физико-химическое, биологическое разложение и механическое рассеяние загрязняющих веществ. Оценка выполнена с использованием ГИС-технологий. В работе изложена методика построения и представлены следующие карты: потенциальной способности почв Беларуси к аккумуляции углеводородов и их рассеянию поверхностным стоком; по благоприятности почвенных условий для радиальной миграции нефтепродуктов и их выноса за пределы почвенного профиля; по суммирующей способности почв Беларуси к механическому рассеиванию углеводородов и итоговой карты потенциальной способности почв к самоочищению от нефтепродуктов. Показано, что для почв Беларуси основным фактором в процессе самоочищения от загрязнения нефтепродуктами является их биологическая деградация. Низкой потенциальной способностью к самоочищению обладают почвы в пределах центральной части Полесья и на севере страны, а также почвы западной части республики.

Ключевые слова: геоинформационная система, самоочищение почв, нефтепродукты, аккумуляция углеводородов, механическое рассеивание углеводородов, карты

M. P. Onoshko¹, A. S. Glaz², L. I. Smykovich³, M. A. Podrzhaya¹

¹Branch «Institute of Geology» of the State Enterprise «SPC for geology», Minsk, Belarus,
e-mail: onoshko_m44@mail.ru

²Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: alex_glas@nature.basnet.by

³Belarusian State University, e-mail: geosmykovich@gmail.com

**ASSESSMENT OF THE POTENTIAL CAPACITY OF SOILS OF BELARUS FOR SELF-PURIFICATION FROM OIL
AND OIL PRODUCTS**

A territorial assessment of the potential capacity of soils for self-purification from oil and oil products has been conducted, taking into consideration the main natural factors affecting the physical and chemical, biological decomposition and mechanical dispersion of contaminants. The assessment has been made with the use of GIS technology. The article outlines the method of development and presents the maps: they include the map of accumulation of hydrocarbons in the soils of Belarus; the intensity of dispersion of oil products by surface runoff and migration of hydrocarbons in the soil section; the removal of hydrocarbons beyond the soil section; the accumulating ability of the soils of Belarus for mechanical dispersion of hydrocarbons and the summarized map of the potential ability of soils for self-purification from hydrocarbons. It is indicated that for the soils of Belarus the main factor in the process of self-purification from oil pollution is their biological degradation. Soils within the central part of Polesye and in the north of the country, as well as the soils of the western part of the republic, have a low potential for self-purification.

Keywords: geoinformational system, self-purification of soil, oil products, accumulation of hydrocarbons, mechanical dispersion of hydrocarbons, maps

М. П. Аношка¹, А. С. Глаз², Л. И. Смыкович³, М. А. Падружая¹

¹Філіял «Інстытут геалогіі» дзяржаўнага прадпрыемства «НПЦ па геалогіі», Мінск, Беларусь, e-mail: onoshko_m44@mail.ru

²Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь, e-mail: alex_glas@nature.basnet.by

³Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь, e-mail: geosmykovich@gmail.com

АЦЭНКА ПАТЭНЦЫЙНАЙ ЗДОЛЬНАСЦІ ГЛЕБ БЕЛАРУСІ ДА САМААЧЫШЧЭННЯ АД НАФТЫ І НАФТАПРАДУКТАЎ

Праведзена тэрытарыяльная ацэнка патэнцыйнай здольнасці глеб да самаачышчэння ад нафты і нафтапрадуктаў з улікам асноўных прыродных фактараў, якія ўплываюць на фізіка-хімічнае, біялагічнае раскладанне і механічнае расейванне забруджвальных рэчываў. Ацэнка выканана з выкарыстаннем ГІС-тэхналогій. Выкладзена метадыка пабудовы і прадстаўлены наступныя карты: групоўка глеб па іх адноснай сарбцыйнай здольнасці да акумуляцыі вуглевадародаў унутры глебавага профілю; групоўка глеб па адноснай здольнасці да выносу нафтапрадуктаў за межы глебавага профілю, што падсумоўвае карта дыферэнцыяцыі тэрыторыі Беларусі па здольнасці глеб да механічнага расейвання нафтапрадуктаў і выніковая карта па патэнцыйнай здольнасці глеб Беларусі да самаачышчэння ад нафтапрадуктаў. Паказана, што для глеб Беларусі асноўным фактарам у працэсе самаачышчэння ад забруджвання нафтапрадуктамі з'яўляецца іх біялагічная дэградацыя. Нізкай патэнцыйнай здольнасцю да самаачышчэння валодаюць глебы заходняй часткі рэспублікі, у межах цэнтральнай часткі Палесся і на поўначы краіны.

Ключавыя словы: геаінфармацыйная сістэма, самаачышчэнне глебы, нафтапрадукты, акумуляцыя вуглевадародаў, механічнае расейванне вуглевадародаў, карты

Введение. С поступлением нефти и нефтепродуктов (НП) в почвы начинается процесс их естественного фракционирования и разложения. При этом легкие фракции постепенно испаряются в атмосферу, а водорастворимые выщелачиваются из профиля почв нисходящими и боковыми потоками влаги. Тяжелые фракции нефти, как правило, долго остаются в почвах и очень медленно разлагаются под воздействием микроорганизмов и химических реакций, протекающих в почвах. Свойства почв (щелочно-кислотные, сорбционные, окислительно-восстановительные и т.д.) определяют скорость разложения и особенности миграции различных загрязняющих веществ [1–11].

Наиболее подвижные водорастворимые соединения НП в кислой обстановке могут выщелачиваться из почвенного профиля и накапливаться на седиментационных и восстановительных барьерах в донных отложениях местных водоемов и в поймах рек, при этом зона загрязнения территории расширяется.

Время самовосстановления загрязненных земель определяется соотношением первичной аккумуляции нефти и процессов трансформации и миграции НП. Процессы деградаци (трансформации) и миграции нефтепродуктов в почвах контролируются целым рядом факторов и условий. Основными факторами, влияющими на интенсивность трансформации НП в ландшафте, являются климатические и окислительно-восстановительные условия. Миграция нефти в загрязненных ландшафтах определяется в основном типом водного режима, гранулометрическим составом почв и положением загрязненного участка в системе сопряженных геохимических ландшафтов.

Для сравнительной оценки почв республики по потенциальной способности к самоочищению от нефти и НП, устойчивости к углеводородному загрязнению нами разработана геоинформационная система «Потенциальная способность почв Беларуси к самоочищению от нефтепродуктов». Структурно геоинформационная система включает базу данных по почвенной, ландшафтной, климатических и гидрологических картах, которые суммируются в атрибутивной таблице к почвенной карте, и блоки картографических материалов, включающие карты по разложению, аккумуляции, выносу углеводородов и потенциальной способности почв к самоочищению от нефтепродуктов. В работе [12] нами изложена первая часть разработки ГИС-проекта, в которой дана оценка относительной способности почв Беларуси к разложению углеводородов (УВ), включая дифференциацию почвенного покрова по интенсивности биологического и физико-химического разложения УВ. В материалах данной статьи рассмотрены дальнейшие вопросы разработки геоинформационной системы – это разработка карт: а) потенциальной способности почв Беларуси к аккумуляции углеводородов; б) благоприятности почвенных условий для радиальной миграции УВ и их выноса за пределы почвенного профиля; в) способности почв к механическому рассеянию нефтепродуктов; г) итоговой карты по оценке потенциальной способности почв Беларуси к самоочищению от нефтепродуктов.

Материалы и методика исследований. При территориальной оценке потенциальной способности почв к самоочищению от нефти и нефтепродуктов учитываются основные природные факторы, влияющие на физико-химическое и биологическое разложение, а также механическое рассеяние загрязняющих веществ. Соотношение благоприятных и неблагоприятных факторов протекания этих процессов является основанием для отнесения почв к группе с низкой, средней или высокой способностью к физико-химической и биологической деградации и механическому рассеянию [7, 8].

Для сравнительной оценки почв Беларуси по потенциальной способности к самоочищению от нефти и НП, устойчивости к углеводородному загрязнению были использованы рекомендации, изложенные в работах [7–9]. При описании построения аналитических карт рисунки некоторых карт не прилагаются, чтобы не перегружать работу графическим материалом, но излагаются легенды построения карт. В итоге приводится суммирующая карта соответствующего блока.

Результаты исследований и их обсуждение. На потенциальную способность почв к самоочищению, помимо разложения углеводородов, влияет интенсивность механического рассеяния нефтепродуктов. В свою очередь интенсивность механического рассеяния нефтепродуктов определяют две разнонаправленные группы факторов, способствующие аккумуляции углеводородов и закреплению их в почвенном профиле (одна группа факторов), выносу углеводородов за пределы почвенного профиля (вторая группа). Разность относительных величин этих факторов и определяет относительную интенсивность механического рассеяния нефтепродуктов.

Способность почв Беларуси к аккумуляции углеводородов. В геоинформационной системе карты блока аккумуляции углеводородов отражают относительную способность почв к аккумуляции углеводородов на внутрипочвенных сорбционных и механических барьерах, которые препятствуют дальнейшей миграции загрязняющих веществ. Блок включает две аналитические и одну суммирующую карту группировки почв по относительной сорбционной способности органогенных и гумусовых горизонтов и минеральной части почв к аккумуляции НП.

Основным показателем сорбционной способности почв является мощность органогенных и гумусовых горизонтов, содержание в них $C_{орг}$, гранулометрический состав горизонта С (или ВС) и процентное содержание $C_{орг}$ в нем. Все эти показатели имеются в атрибутивной таблице почвенной карты. Для группировки почв использовались значения коэффициента фильтрации (они также приведены в атрибутивной таблице). По этим показателям построены две аналитические карты группировки почв по сорбционной способности гумусового и минерального горизонтов к аккумуляции НП. Карты строились согласно следующим легендам (табл. 1):

Легенда к аналитической карте по относительной способности к аккумуляции НП горизонтами С или ВС состоит из трех группировок почв по сорбционной способности минеральных горизонтов. В первую группу включены почвы легкого гранулометрического состава. Они обладают хорошими фильтрационными свойствами и, следовательно, низкой сорбционной способностью. В группу «средней сорбционной способности» включены почвы, подстилаемые супесью или двучленными породами – супесью с суглинками. Высокой сорбционной способностью обладают почвы третьей группы – это почвы тяжелого гранулометрического состава (глинистые, суглинистые) и торфяные горизонты.

Т а б л и ц а 1. Легенды к аналитическим картам группировки почв по сорбционной способности гумусовых, органогенных (1) и минеральных горизонтов (2) к аккумуляции нефтепродуктов

Сорбционная способность к аккумуляции НП	Легенда 1		Легенда 2		
	горизонты А, и Т		горизонты С или ВС		
	мощность горизонта, см	содержание $C_{орг}$, %	литология	содержание $C_{орг}$, %	коэффициент фильтрации, м/сут
Низкая	10–15	<1,0	Пески	<0,10	>1,5
Средняя	20–30	1,5–3,0	Супеси, суглинки	0,11–0,19	0,05–1,5
Высокая	45–50	>4,0	Суглинки, глины, торф	0,20–0,36	<0,05

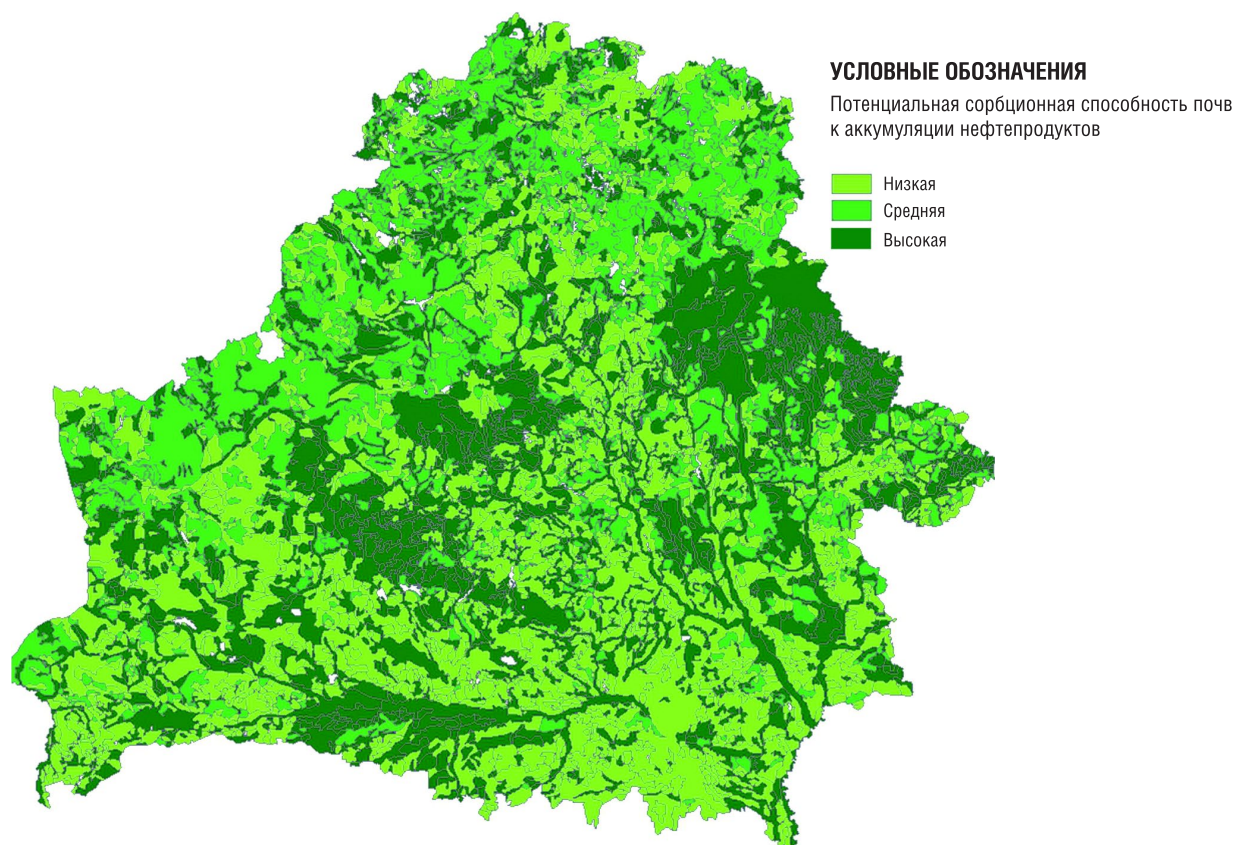


Рис. 1. Дифференциация территории Беларуси по потенциальной способности почв к аккумуляции нефтепродуктов

На основе двух аналитических карт построена суммирующая (интегральная) карта относительной сорбционной (аккумулирующей) способности почв по отношению к НП, отражающая низкую, среднюю и высокую способность почв к аккумуляции НП (рис. 1, табл. 2).

Распределение почв по относительной способности к аккумуляции НП очень пестрое. Высокая способность отмечена в местах, где сорбционные барьеры более мощные, где почвообразующими породами выступают лессы, суглинки, глины или мощные торфяники. Высокие показатели наблюдаются в северо-восточной, восточной и центральной частях республики.

Вынос углеводов за пределы почвенного профиля. Карты блока выноса углеводов, включающие две аналитические и одну суммирующую (карта относительной способности почв к выносу НП за пределы почвенного профиля), строились с учетом интенсивности поверхностного стока и миграции углеводов в пределах элементарных ландшафтов и почвенного профиля.

Таблица 2. Группировка почв по потенциальной способности к аккумуляции НП

Способность почв к аккумуляции НП	Сорбционная способность гумусовых горизонтов	Сорбционная способность минеральных горизонтов
Низкая	Низкая	Низкая
	Низкая	Средняя
	Средняя	Низкая
Средняя	Средняя	Средняя
	Низкая	Высокая
	Высокая	Низкая
Высокая	Высокая	Высокая
	Высокая	Средняя
	Средняя	Высокая

Дифференциация территории по потенциальной интенсивности рассеяния нефтепродуктов поверхностным стоком проводилась по двум показателям – среднегодовому количеству осадков и модулю среднегодового стока путем синтеза двух оцифрованных карт: карты среднегодового количества осадков и гидрографической карты (рис. 2).

Карта дифференциации территории Беларуси по потенциальной интенсивности рассеяния нефтепродуктов поверхностным стоком строилась согласно легенде (табл. 3).

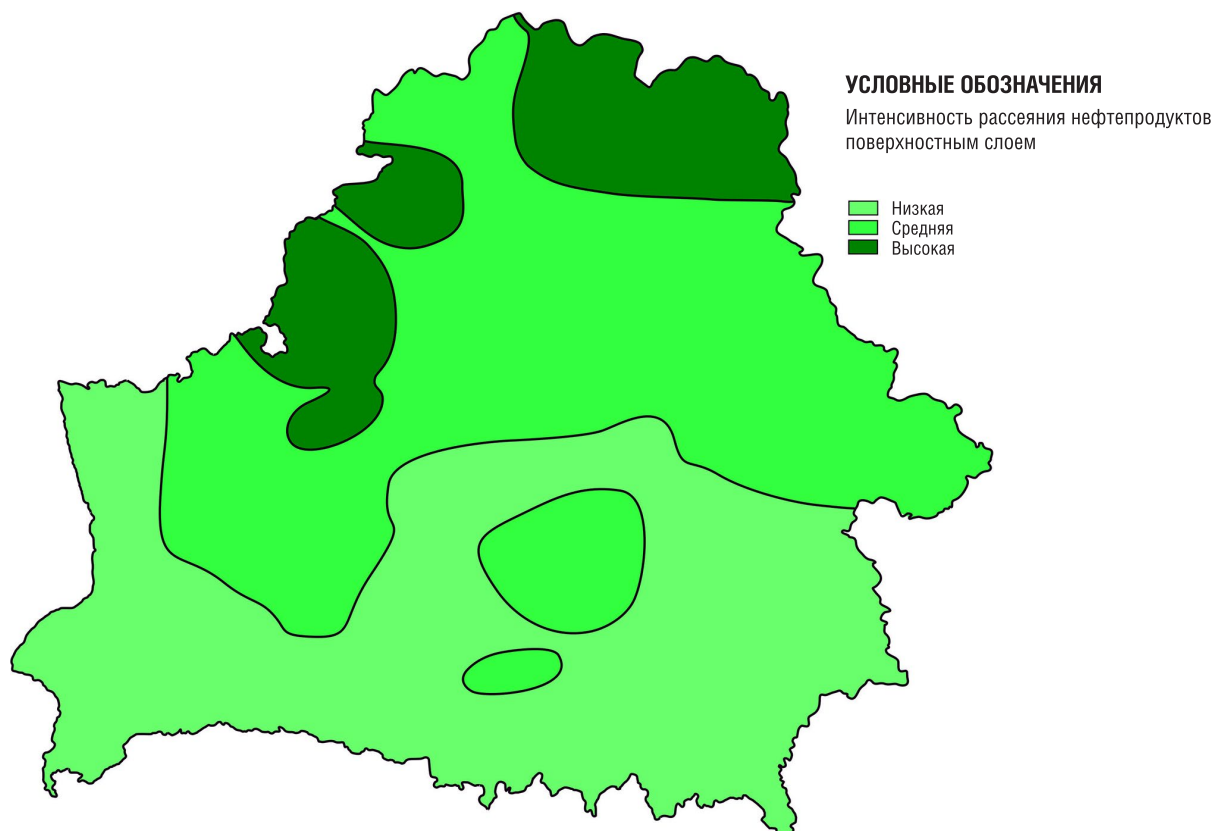


Рис. 2. Дифференциация территории Беларуси по потенциальной интенсивности рассеяния нефтепродуктов поверхностным стоком

Как свидетельствует анализ карты потенциальной интенсивности рассеяния нефтепродуктов поверхностным стоком, в рассеянии ведущим выступает фактор «модуль среднегодового стока», показатель которого уменьшается с севера на юг Беларуси. Наиболее высокая интенсивность рассеяния НП поверхностным стоком характерна для северо-восточной и западной части территории Витебской области (модуль стока здесь от 6,0 до > 8,0 л/с · км², количество осадков 650–750 мм/год. Для западной части Гродненской области и всей территории Брестской и Гомельской областей установлена низкая интенсивность рассеяния НП поверхностным стоком.

При составлении второй аналитической карты группировки почв по потенциальной интенсивности водной миграции НП в почвенном профиле (рис. 3) были взяты данные сочетания водного режима почв (из атрибутивной таблицы к почвенной карте) с их положением в элементарных ландшафтах (по карте элементарных ландшафтов Беларуси). По водному режиму выделены 3 группы почв: 1) почвы промывного (способность к рассеянию углеводородов высокая), 2) периодически застойного (способность средняя) и 3) застойного (эти почвы обладают низкой способностью к рассеянию углеводородов) режимов. Соответственно наиболее благоприятные условия для миграции (выноса) углеводородов имеют место в элювиальных ландшафтах. Менее предрасположены к миграции НП трансэлювиальные и трансаккумулятивные ландшафты. Наименее благоприятными условиями для выноса НП характеризуются аккумулятивные ландшафты.

Таблица 3. Легенда к карте дифференциации территории Беларуси по потенциальной интенсивности рассеяния нефтепродуктов поверхностным стоком

Интенсивность рассеяния НП поверхностным стоком	Среднегодовое количество осадков, мм	Модуль среднегодового стока, л/с · км ²
Низкая	<600	<4,5
Средняя	600–700	4,5–7,0
Высокая	>700	>7,0

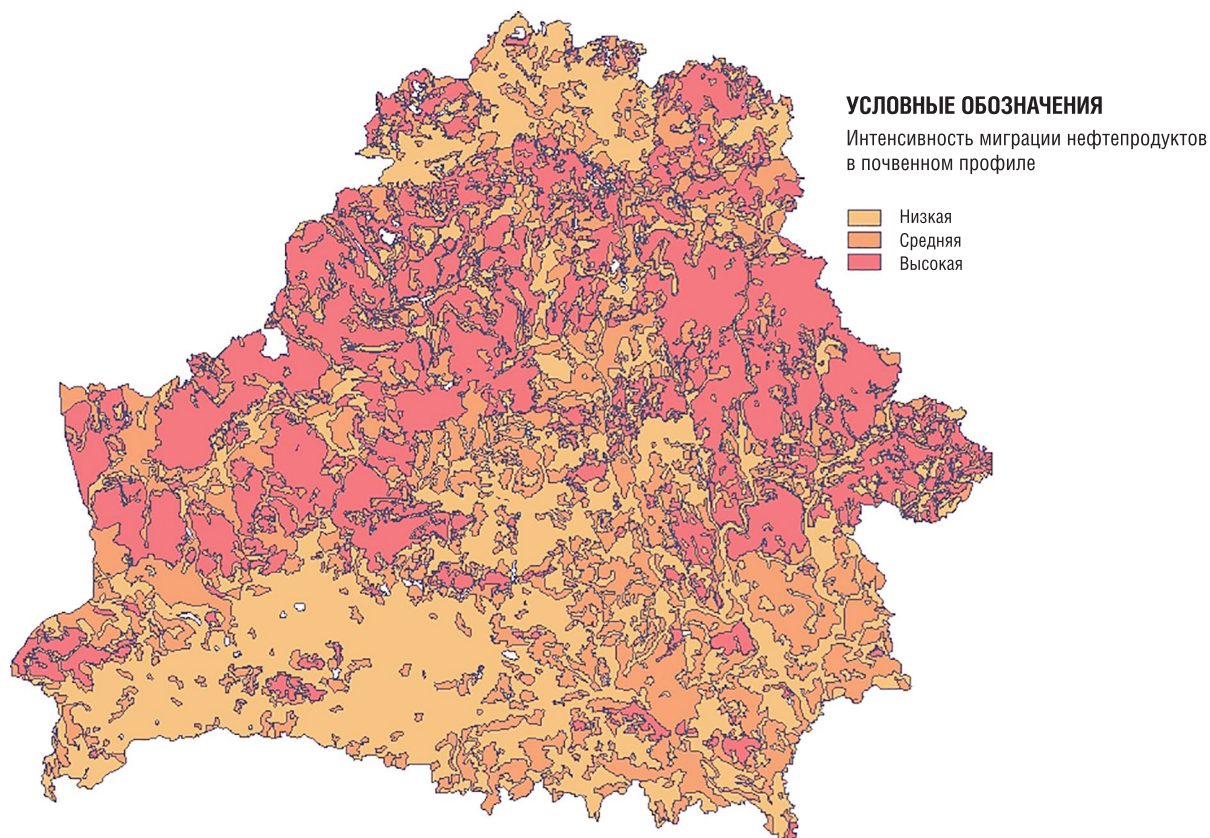


Рис. 3. Дифференциация территории Беларуси по потенциальной интенсивности миграции нефтепродуктов в почвенном профиле

Легенда к карте группировки почв по потенциальной интенсивности миграции НП в почвенном профиле представлена в табл. 4.

Для составления суммирующей карты относительной способности почв к выносу НП за пределы почвенного профиля (рис. 4) в расчет брались интенсивность рассеяния углеводородов поверхностным стоком и интенсивность миграции в почвенном профиле. Карта составлена согласно легенде (табл. 5).

Карта относительной способности почв к выносу нефтепродуктов за пределы почвенного профиля (рис. 4) в значительной степени схожа с картой потенциальной интенсивности рассеяния нефтепродуктов поверхностным стоком (см. рис. 2). Следовательно, при дифференциации территории Беларуси по выносу нефтепродуктов за пределы почвенного профиля определяющим фактором является интенсивность выноса НП поверхностным стоком.

Наиболее низкая способность к выносу НП за пределы почвенного профиля характерна для почв южной части территории республики и запада Гродненской области – это территории с пониженным количеством суммы среднегодовых осадков, более низким модулем среднегодового стока и территории с преобладанием супераквальных ландшафтов.

Таблица 4. Легенда к карте группировки почв по потенциальной интенсивности миграции НП в почвенном профиле

Интенсивность миграции НП в почвенном профиле	Водный режим почв	Элементарный ландшафт
Низкая	Водозастойный	Супераквальные
Средняя	Периодически промывной	Трансэлювиальные и трансаккумулятивные
Высокая	Промывной	Элювиальные

Таблица 5. Легенда карты группировки почв по относительной способности почв к выносу НП за пределы почвенного профиля

Интенсивность суммарного выноса НП за пределы почвенного профиля	Интенсивность рассеяния НП поверхностным стоком	Интенсивность миграции НП в почвенном профиле
Низкая	Низкая	Низкая
Средняя	Средняя	Средняя
Высокая	Высокая	Высокая

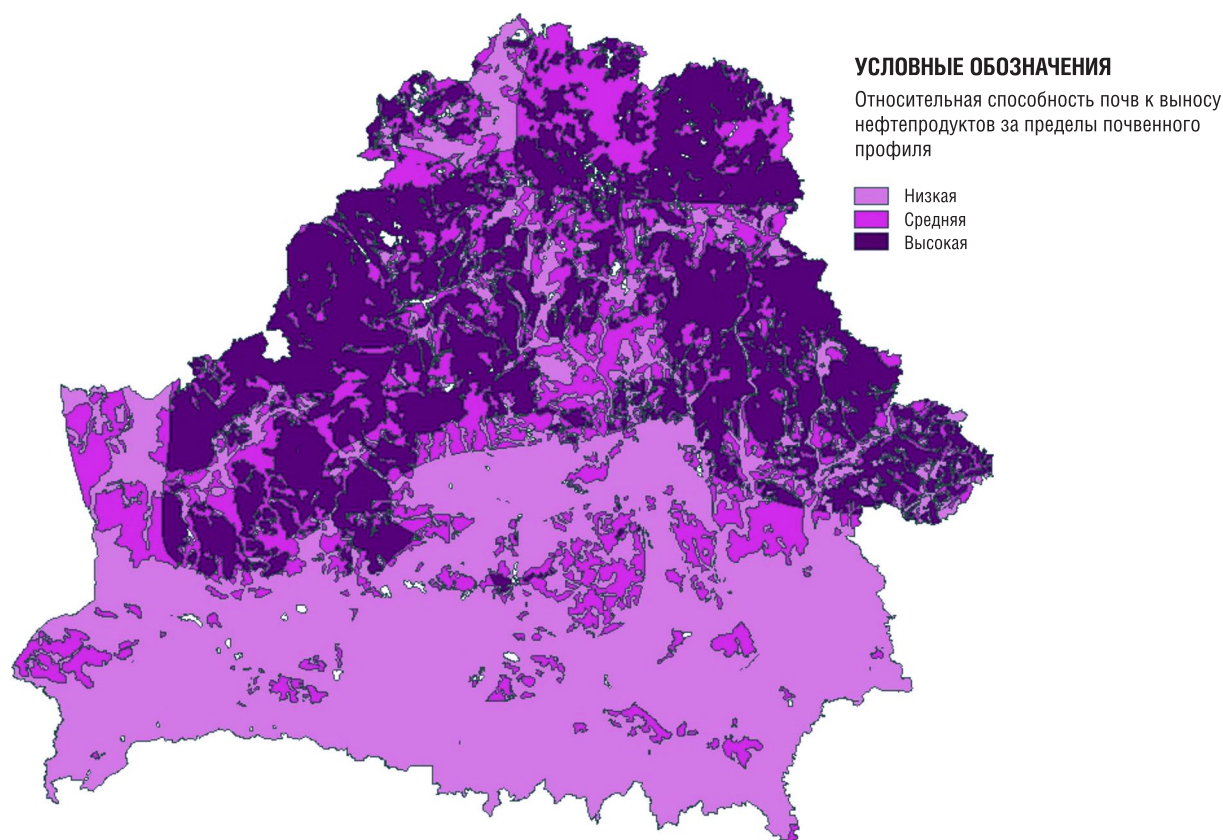


Рис. 4. Дифференциация территории Беларуси по относительной способности почв к выносу нефтепродуктов за пределы почвенного профиля

Следующий блок карт в ГИС-проекте представляют две суммирующие карты: карта группировки почв по относительной способности к механическому рассеянию нефтепродуктов и итоговая карта группировки почв по способности к самоочищению от углеводородного (НП) загрязнения.

Механическое рассеяние неразложившихся техногенных углеводородов водными потоками является одним из факторов самоочищения, устойчивости почв к загрязнению углеводородами. Рассеяние углеводородов происходит в двух направлениях: с поверхностным смывом с почвы и вертикальной миграцией в почвенном профиле. Карта группировки почв по потенциальной способности почв к механическому рассеянию НП (рис. 5) строилась на основе двух групп разнонаправленных факторов: факторы, способствующие аккумуляции НП и их закреплению в почвенном профиле (см. описание к рис. 1) и факторы, способствующие выносу за пределы почвенного профиля (см. описание к рис. 4).

Критерием разделения почв по условиям механического рассеяния НП принята разность показателей аккумуляции и выноса: преобладание аккумуляции – это низкая способность почвы к рассеянию НП, равенство – среднее, превышение выноса над аккумуляцией – высокая способность почвы к рассеянию НП (табл. 6).

Пространственная структура потенциальной способности почв к механическому рассеянию нефтепродуктов (рис. 5) в значительной степени схожа с пространственной структурой относительной способности почв к выносу нефтепродуктов за пределы почвенного профиля (см. рис. 4), что подчеркивает большую значимость фактора выноса НП.

Таблица 6. Легенда карты почв по потенциальной способности почв к механическому рассеянию НП

Способность почв к механическому рассеянию НП	Способность почв к аккумуляции НП	Интенсивность суммарного выноса НП из почвенного профиля
Низкая	Высокая	Низкая
Средняя	Средняя	Средняя
Высокая	Низкая	Высокая

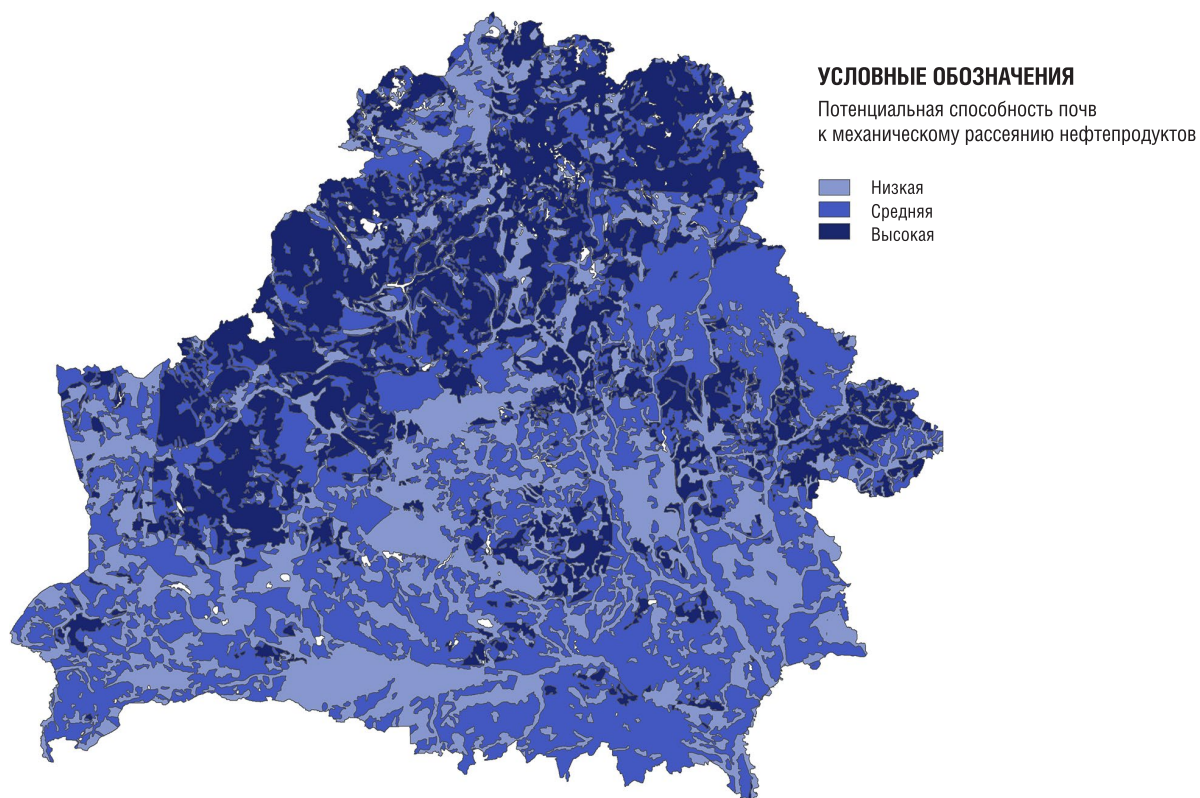


Рис. 5. Дифференциация территории Беларуси по потенциальной способности почв к механическому рассеянию нефтепродуктов

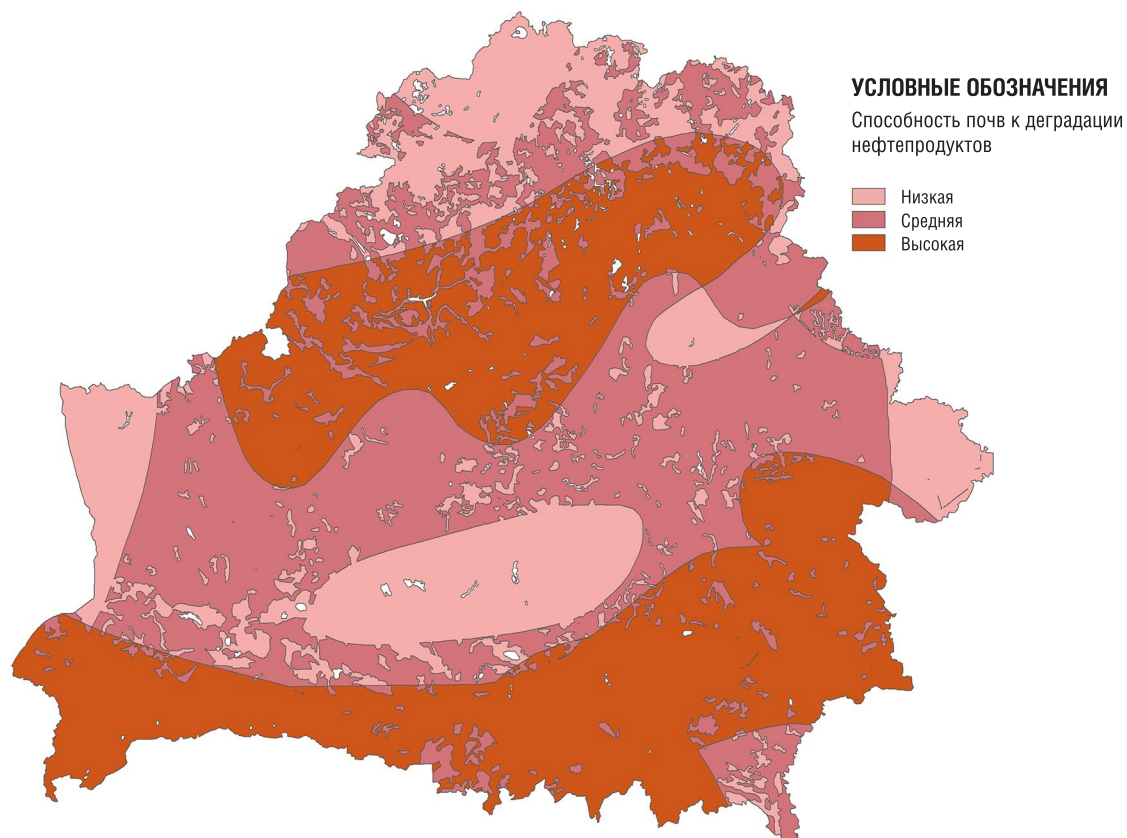


Рис. 6. Дифференциация территории Беларуси по способности почв к деградации нефтепродуктов [12]

Итоговая карта группировки почв по способности к самоочищению от углеводородного (НП) загрязнения (рис. 7) создана на основе синтеза карт блоков деградации и механического рассеяния углеводородов в почвах, а именно: совмещения карт потенциальной способности почв Беларуси к деградации углеводородов (рис. 6) и механического рассеяния НП (рис. 5) в почвах. В легенде (табл. 7) представлены сочетания показателей деградации и рассеяния НП.

Проведенное исследование позволило дифференцировать почвенный покров территории Беларуси по потенциальной способности к самоочищению от техногенных углеводородов. Для оценки выбраны почвенные и климатические характеристики, которые могут определять условия усиления или торможения процессов физико-химического и биологического разложения углеводородов в почвах и механического их рассеяния.

Анализ картографического материала свидетельствует, что для почв Беларуси основным ведущим фактором в процессе самоочищения от загрязнения нефтепродуктами является их биологическая деградация, которая оценивалась нами по количеству осадков в теплое время и продолжительности безморозного периода. Низкой потенциальной способностью к самоочищению обладают почвы в пределах центральной части Полесья, на севере республики и в западной части Гродненской области.

Таблица 7. Легенда к карте группировки почв по способности к самоочищению от углеводородного (НП) загрязнения

Способность почв к самоочищению от загрязнения НП (устойчивость почв к загрязнению НП)	Способность почв к деградации НП	Способности почв к механическому рассеянию НП
Низкая	Низкая	Низкая
	Средняя	Низкая
	Низкая	Средняя
Средняя	Низкая	Высокая
	Средняя	Средняя
	Высокая	Низкая
Высокая	Высокая	Средняя
	Средняя	Высокая
	Высокая	Высокая

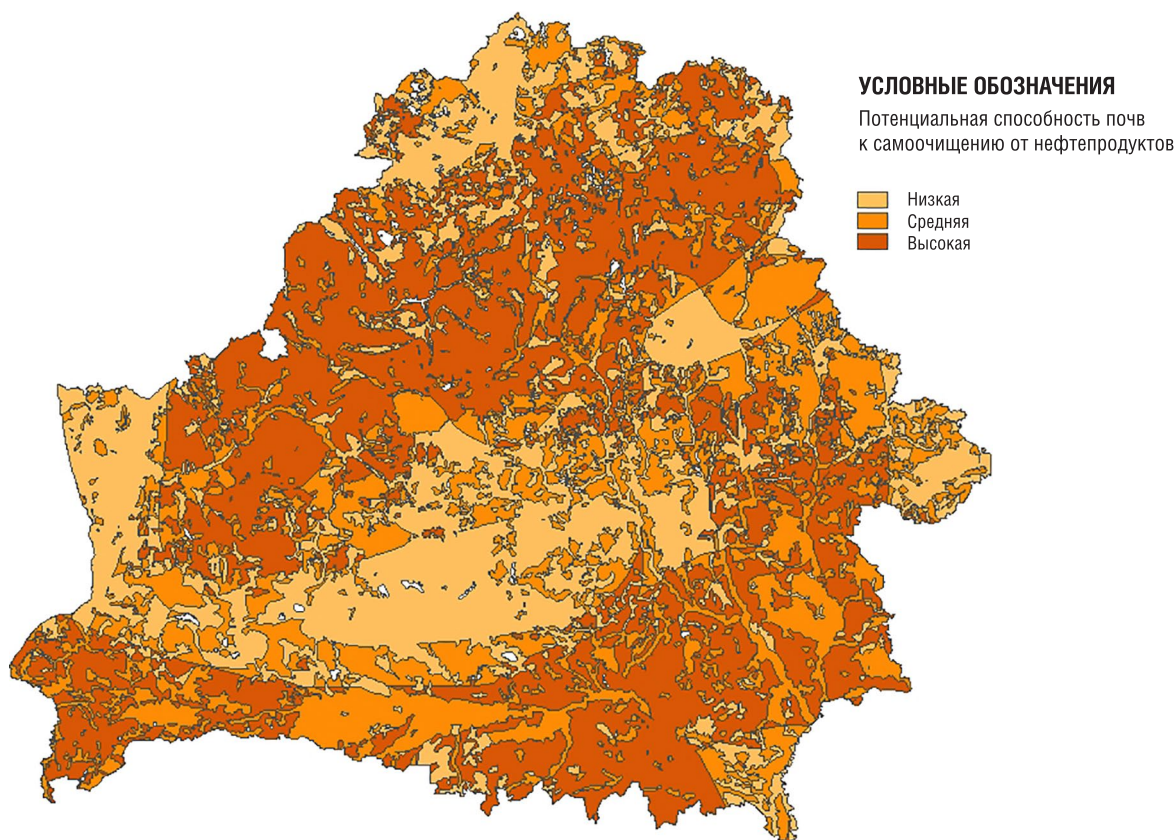


Рис. 7. Дифференциация территории Беларуси по потенциальной способности почв к самоочищению от нефтепродуктов

Приведенные факторы способности почв Беларуси к выносу и аккумуляции нефтепродуктов носят качественный характер. Они указывают лишь на почвенные условия без учета уровня загрязнения и состава загрязняющих веществ. При оценке потенциала самоочищения конкретной территории необходимо вводить показатели уровней загрязнения почвы, состава загрязняющих веществ и объемов их поступления.

Список использованных источников

1. Хаустов, А. П. Геохимическая модель трансформации и индикации нефтепродуктов при их вертикальной миграции в ландшафтах / А. П. Хаустов, М. М. Редина // Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию М. А. Глазовской): докл. Всерос. науч. конф. Москва, 4–6 апр. 2012 г. – М.: МГУ, 2012. – С. 342–344.
2. Максимова, С. Л. Способ деструкции нефти и нефтепродуктов в загрязненных почвах / С. Л. Максимова, В. В. Инкин // Природные ресурсы. – 2015. – № 1. – С. 107–113.
3. Медведев, В. С. Топливный комплекс России: мифы и реальность / В. С. Медведев // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 3. – С. 40.
4. Хаустов, А. П. Трансформация нефтепродуктов в геологической среде при изменении их битумоидного статуса / А. П. Хаустов, М. М. Редина // Геоэкология. Инженерная геология. Геокриология. – 2013. – № 6. – С. 502–515.
5. Орлов, Д. С. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении / Д. С. Орлов, Л. К. Садовников, И. Н. Лозановская. – М.: Высш. шк., 2002. – 334 с.
6. Илларионов С. А. Трансформация углеводородов нефти в почвах гумидной зоны: дис. ... д-ра биол. наук. спец. 03.00.16. – Сыктывкар, 2006. – 426 с.
7. Геннадиев, А. Н. Карты устойчивости почв к загрязнению нефтепродуктами и полициклическими ароматическими углеводородами: метод и опыт составления / А. Н. Геннадиев, Ю. И. Пиковский // Почвоведение. – 2007. – № 1. – С. 80–92.
8. Пиковский, Ю. И. ГИС для оценки устойчивости почв к загрязнению техногенными углеводородами (на примере Калининград. обл.) / Ю. И. Пиковский, А. А. Геннадиева // Вестн. Моск. гос. ун-та. Сер. 5. География. – 2004. – № 3. – С. 18–24.
9. Картографическая оценка потенциала самоочищения почв от техногенных углеводородов на территории России / Ю. И. Пиковский [и др.] // География и окружающая среда. – М.: ГЕОС, 2000. – С. 286–303.
10. Зборищук, Ю. Н. Почвенно-экологический мониторинг / Ю. Н. Зборищук. – М.: МГУ, 1992. – 86 с.
11. Хаустов, А. П. Техногенные системы как феномен самоорганизации материи (на примере загрязнения геологической среды углеводородами) / А. П. Хаустов // Литосфера. – 2014. – № 1. – С. 105–116.
12. Оценка потенциальной способности почв Беларуси к разложению углеводородов / М. П. Оношко [и др.] // Природные ресурсы. – 2019. – № 1. – С. 6–13.

Поступила 20.02.2019

ISSN 1810-9810 (Print)
УДК 550.4:551.4 (476)

В. А. Рыжиков, Ю. А. Романкевич, С. В. Савченко, Р. М. Зайнь Эль-Динь

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
e-mail: ryghik24@tyt.by, yuliya_romankevich@mail.ru, svscience@rambler.ru, rostmcfc@mail.ru*

РАНЖИРОВАНИЕ ГОРОДОВ БЕЛАРУСИ ПО УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ К ТЕХНОГЕННЫМ ХИМИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ

Основу предложенного ранжирования составляет информация о функциональном статусе города, его ландшафтной принадлежности и гранулометрическом составе почв, которые определяют эколого-химическое состояние почвенного покрова в пределах городской территории. Данное ранжирование позволяет оценивать урбанизированные территории по их способности противостоять техногенным нагрузкам.

Ключевые слова: ландшафтная принадлежность, гранулометрический состав почв, функциональный статус города, техногенная нагрузка

U. A. Ryzhikau, J. A. Ramankevich, S. V. Savchenko, R. M. Zain El-Dzin

*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: ryghik24@tyt.by, yuliya_romankevich@mail.ru, svscience@rambler.ru, rostmcfc@mail.ru*

RANKING OF BELARUSIAN CITIES BY SUSTAINABILITY OF SOILS TO TECHNOGENIC CHEMICAL PRESSURE

The ranking is based on information on the functional status of the city, its landscape structure and particle size distribution of soils. These indicators determine the ecological and chemical state of the soil cover within an urban area. This rankings makes it possible to evaluate the urbanized territories by their ability to withstand the technogenic impact.

Keywords: landscape affiliation, granulometric composition of soils, functional status of the city, technogenic impact

У. А. Рыжыкаў, Ю. А. Раманкевіч, С. В. Саўчанка, Р. М. Зайнь Эль-Дзінь

*Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь
e-mail: ryghik24@tyt.by, yuliya_romankevich@mail.ru, svscience@rambler.ru, rostmcfc@mail.ru*

РАНЖЫРАВАННЕ ГАРАДОЎ БЕЛАРУСІ ПА ЎСТОЙЛІВАСЦІ ГЛЕБЫ ДА ТЭХНАГЕННЫХ ХІМІЧНЫХ НАГРУЗАК

Аснову прапанаванага ранжывання складае інфармацыя аб функцыянальным статусе горада, яго ландшафтанай прыналежнасці і грануламетрычным складзе глеб, якія вызначаюць экалага-хімічны стан глебавага покрыва ў межах гарадской тэрыторыі. Дадзенае ранжыванне дазваляе ацэньваць урбанізаваныя тэрыторыі па іх здольнасці супрацьстаяць тэхнагенным нагрузкам.

Ключавыя словы: ландшафтная прыналежнасць, грануламетрычны склад глеб, функцыянальны статус горада, тэхнагенная нагрузка

Введение. На территории Беларуси насчитывается 115 городов общей площадью по данным Министерства статистики более 2,9 тыс. км², что составляет около 1,4 % от общей площади страны. Ежегодно в городах увеличивается количество населения, растет плотность городской застройки, строятся новые промышленные объекты, увеличивается парк автомобильного транспорта, что способствует росту количества выбрасываемых в атмосферный воздух загрязняющих веществ и объемов промышленных и бытовых отходов. Все это приводит к преобразованию или полной трансформации почв и почвообразующих пород, естественного растительного покрова, условий залегания грунтовых вод и др.

Техногенные факторы, которые воздействуют на почвы в пределах города, условно можно разделить на три группы: механические, физические и химические [1]. Среди механических факторов, воздействующих на почвы, можно выделить засыпку и срезание естественных почв в результате нивелирования городского рельефа, их запечатывание асфальтом и бетоном, захлamlение поверхности почвы, переуплотнение корнеобитаемого слоя. Следствием физических факторов воздействия на почвы является развитие процессов водной и ветровой эрозии,

нарушение водного (подтопление и иссушение) и теплового (промерзание и теплое загрязнение) балансов почв. Химическое воздействие проявляется в загрязнении почв токсичными веществами (тяжелыми металлами, нефтепродуктами, ПАУ, ПХБ и др.), нарушении кислотно-щелочных условий, изменении окислительно-восстановительного потенциала.

Для городских территорий наиболее значимыми, оказывающими приоритетное влияние на биоту и человека, большинство авторов выделяют химические факторы воздействия [1–3], так как продукты техногенеза с воздушными или водными потоками поступают на земную поверхность, накапливаются в верхних горизонтах почв и вновь включаются в природные и техногенные циклы миграции. В результате пыления незадернованных городских почв, а также аккумуляции загрязняющих веществ в сельхозпродукции, выращиваемой на территории городов, возникает риск поступления поллютантов в организм человека [1].

В настоящее время в научной литературе приводится большое количество данных о химическом состоянии почв многих промышленных городов России, Украины, Беларуси и др. [1–3]. В то же время работы, в которых бы оценивалась устойчивость городских почв к химическим нагрузкам, учитывалась их способность к самоочищению, не столь многочисленны [2]. В этой связи обоснование методических приемов к оценке устойчивости городских почв к химическим нагрузкам по широкому перечню показателей является актуальным направлением исследований, так как позволяет дифференцировать города по устойчивости городской территории к техногенным воздействиям и выявить территории, в большей или меньшей степени способные противостоять техногенным нагрузкам.

Методика исследований. В научной литературе понятие устойчивости природных систем (почв, ландшафтов, геосистем и т.д.) к техногенным нагрузкам трактуется по-разному, но несмотря на многообразие определений, большинство авторов под устойчивостью понимает способность природных систем противостоять техногенному воздействию (потенциальный запас буферности и способность к самоочищению) [4] или способность к восстановлению «нормального функционирования» (восстановление исходных природных свойств) [5, 6]. В зависимости от трактовки используются различные критерии при оценке устойчивости территорий: глубина расчленения рельефа и величина поверхностного стока [7]; особенности ландшафтно-геохимических барьеров и их способность противостоять техногенному воздействию, которая выражается в мобилизации и переводе загрязняющих веществ в недоступные для биоты малоподвижные формы [4]; тип биологического круговорота и класса водной миграции, а также миграционные коэффициенты, характеризующие интенсивность этих процессов [8]; высотная принадлежность ландшафтов; степень развитости почвенного профиля; каменистость; плотность; гранулометрический состав; тип водного режима почв [9].

Несмотря на различия подходов и критериев оценки устойчивости почв к химическим нагрузкам большинство из них базируется на основах учения о геохимии ландшафтов, которые учитывают условия миграции и аккумуляции загрязняющих веществ.

Таким образом, при оценке устойчивости почв городских ландшафтов к химическим нагрузкам целесообразно учитывать факторы, определяющие латеральный и радиальный вынос загрязняющих веществ. По мнению М.А. Глазовской, оценка геохимической устойчивости почв должна производиться с учетом их положения в пределах элементарных ландшафтно-геохимических систем и их геохимически сопряженных рядов [4]. Соответственно в пределах одного ландшафтно-геохимического сопряжения с однородным климатическим фоном и сходными кислотно-щелочными условиями скорость химических реакций и вынос загрязняющих веществ будут определяться геоморфологическим положением территории и гранулометрическим составом почв.

Исходя из этого, для ранжирования ландшафтов по устойчивости почв к химическим нагрузкам факторы, их определяющие, можно разделить на две основные группы: факторы, обеспечивающие латеральный вынос загрязняющих веществ за пределы элементарного ландшафта и факторы, обеспечивающие радиальный вынос загрязняющих веществ за пределы элементарного ландшафта.

Дифференциация по первому фактору позволяет в самом общем виде определить устойчивость почв конкретного ландшафта в зависимости от его принадлежности к группам возвышенных, средневысотных или низменных ландшафтов (табл. 1). Из возвышенных ландшафтов загрязняющие вещества будут активно выноситься, из средневысотных интенсивность их выноса будет ниже, в то же время в низменных ландшафтах будет происходить накопление загрязняющих веществ.

Следовательно, возвышенные (элювиальные) ландшафты отличаются максимальной устойчивостью к загрязнению, низменные (супераккумулятивные) – минимальной устойчивостью, средневозвышенные (трансэлювиальные) ландшафты занимают промежуточное положение. Таким образом, по устойчивости к химическому загрязнению данные группы ландшафтов соответственно подразделяются на устойчивые, относительно устойчивые и неустойчивые [9].

Факторы, обеспечивающие радиальный вынос загрязняющих веществ определяются главным образом гранулометрическим составом почв и их гумусированностью. Так, почвы «легкого» гранулометрического состава (пески, супеси), как правило, обеднены органическим веществом и способны быстрее проводить радиальные потоки. Почвы, богатые илистыми частицами (суглинки, глины) и органическим веществом (торф), обладают более высокой сорбционной способностью [5]. Таким образом, почвы различного гранулометрического состава, который определяет радиальный вынос загрязняющих веществ и соответственно устойчивость почв к химическому загрязнению, можно по аналогии с ландшафтами также разделить на устойчивые (песчаные почвы), относительно устойчивые (супесчаные), неустойчивые (суглинистые, глинистые и торфяные почвы) (см. табл. 1).

Вышеуказанные факторы, определяющие природную составляющую поведения загрязняющих веществ в городских ландшафтах, не учитывают техногенные потоки загрязняющих веществ, которые в условиях города могут существенно различаться в зависимости от наличия или отсутствия на городской территории значительного количества различных источников поступления в окружающую среду загрязняющих веществ. Следовательно, третьим фактором, который необходимо учитывать при оценке почвенного потенциала городов, является уровень техногенной нагрузки и степень загрязнения городской среды.

Об уровне техногенной нагрузки в городах в первую очередь можно судить по степени загрязнения депонирующих сред, в частности почв, однако данные о состоянии почв городов весьма ограничены. В настоящее время имеется информация о состоянии почв Минска, Светлогорска, Гомеля, Гродно, Мозыря, Березовки, Новополоцка [2] и городов, включенных в перечень объектов Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь (НСМОС), в которых осуществляется наблюдение за химическим загрязнением городских почв [10].

Косвенным признаком, который позволяет судить об уровне техногенной нагрузки, является функциональный статус города в общехозяйственной классификации (промышленный, агропромышленный, туристско-рекреационный и т.д.). Очевидно, что максимальный уровень техногенной нагрузки характерен для крупных промышленных городов, а минимальный – для малых аграрных и туристско-рекреационных городов. Промежуточное положение занимают агропромышленные населенные пункты.

Согласно данным мониторинга техногенного загрязнения почв, проводимого в рамках НСМОС в городах различного категориального статуса [10, 11], максимальное загрязнение нефтепродуктами и тяжелыми металлами характерно для крупнейших, крупных, средних и малых городов, относящихся к категории промышленных. Относительно невысокое содержание данных загрязнителей почв наблюдается в пределах агропромышленных городов и низкое – аграрных, туристско-рекреационных и природоохранных. Таким образом, по уровню техногенной нагрузки исследуемые города условно можно разделить на устойчивые (аграрные,

Т а б л и ц а 1. Критерии устойчивости почв к химическим нагрузкам

Критерии выделения	Категория устойчивости		
	Устойчивые	Относительно устойчивые	Неустойчивые
Ландшафтная принадлежность	Возвышенные	Средневозвышенные	Низменные
Гранулометрический состав почв	Песчаные	Супесчаные	Суглинки, глины, торф

туристско-рекреационные и природоохранные), относительно устойчивые (агропромышленные) и неустойчивые (промышленные).

На основании вышеперечисленных трех факторов (функционального статуса города, его ландшафтной структуры и гранулометрического состава почв в пределах городской территории) составлена матрица, на одной из осей которой отражена способность ландшафтов пропускать латеральные водные потоки, содержащие тяжелые металлы и прочие загрязняющие вещества, на другой – гранулометрический состав пород, влияющий на промывной режим и определяющий способность ландшафтов пропускать радиальные водные потоки, на третьей – уровень техногенной нагрузки, определяемый функциональным статусом города.

Для классификации городов по сочетанию данных признаков осуществлялась балльная оценка, при которой каждой категории устойчивости были присвоены баллы: группа ландшафтов (низменные – 1, средневысотные – 2, возвышенные – 3); гранулометрический состав почв (суглинистые, глинистые и органогенные – 1, супесчаные – 2, песчаные – 3); функциональный статус города (промышленный – 1, агропромышленный – 2, аграрный, туристско-рекреационный, природоохранный – 3). Далее рассчитывался общий балл для каждого города по трем показателям. В результате города были объединены в группы: города, территории которых неустойчивы к техногенным нагрузкам (1,00–1,40 балла), относительно неустойчивые (1,41–1,80 балла), среднеустойчивые (1,81–2,20 балла), относительно устойчивые (2,21–2,60 балла) и устойчивые (2,61–3,00 балла).

Результаты исследований и их обсуждение. Согласно [9], группа возвышенных ландшафтов, относящихся к категории устойчивых к химическим нагрузкам, включает холмисто-моренно-озерные, холмисто-моренно-эрозионные, камово-моренно-озерные, лессовые ландшафты. К средневысотным относятся ландшафты: моренно-озерные, вторично-моренные, моренно-зандровые, водно-ледниковые с озерами, вторичные водно-ледниковые. Группу низменных ландшафтов образуют озерно-ледниковые, аллювиальные террасированные, пойменные речные долины и нерасчлененные комплексы с преобладанием болот.

Для анализа ландшафтной принадлежности каждого города использовалась ландшафтная карта Белорусской ССР М 1:600 000 [12]. Границы ландшафтов уточнялись с использованием ландшафтной карты каждого административного района М 1:100 000 [13] и физико-географической карты М 1:100 000 (для идентификации абсолютных отметок на территории города). Отнесение городов к той или иной категории устойчивости к химическому воздействию осуществлялось исходя из анализа преобладающих на городской территории групп ландшафтов. На основании полученных данных города были сгруппированы по следующим категориям устойчивости к химическим нагрузкам (табл. 2).

К категории устойчивых отнесены города (около 24 %), в пределах которых преобладают преимущественно возвышенные ландшафты (рис. 1). Как видно из табл. 2, большинство городов данной категории расположены в пределах холмисто-моренно-эрозионных и лессовых ландшафтов, меньшее их количество относится к территориям с холмисто-моренно-озерными и камово-моренно-озерными ландшафтами.

К категории относительно устойчивых относится около 48 % рассматриваемых городов, в границах которых преобладающими являются средневысотные ландшафты. Большая часть городов расположена в пределах вторично-моренных, моренно-зандровых и вторичных водно-ледниковых ландшафтов, в меньшей степени – моренно-озерных и водно-ледниковых с озерами ландшафтов (рис. 1).

Около 28 % городов Беларуси, в пределах территории которых преобладают низменные ландшафты, по устойчивости к химическим нагрузкам можно отнести к категории неустойчивых. Это города, преимущественно расположенные в пределах Полесской ландшафтной

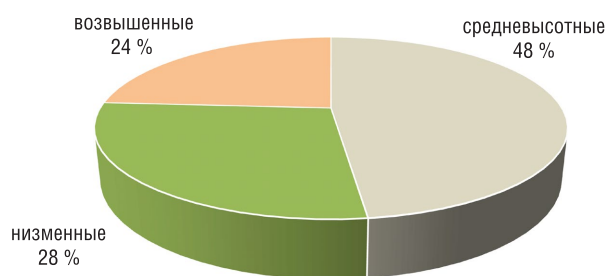


Рис. 1. Структура городов по категориям устойчивости в зависимости от группы ландшафтов, преобладающих на их территории

Таблица 2. Ранжирование городов по категориям устойчивости в зависимости от преобладающих на их территории групп и родов ландшафтов

Категория устойчивости	Группа ландшафта	Род ландшафта	Города
Устойчивые	Возвышенные, 200–346 м	Холмисто-моренно-озерные	Новолукомль, Лепель, Мядель, Круглое, Славгород
		Холмисто-моренно-эрозионные	Воложин, Заславль, Гродно, Косово, Копыль, Новогрудок, Дзержинск, Ошмяны, Клецк, Любань, Логойск, Фаниполь, Минск, Мозырь
		Камово-моренно-озерные	Браслав, Поставы
		Лессовые	Мстиславль, Горки, Дубровно, Толочин, Барань, Орша
Относительно устойчивые	Средневозвышенные, 150–200 м	Моренно-озерные	Миоры, Витебск, Чашники, Глубокое, Сенно
		Вторично-моренные	Климовичи, Докшицы, Лида, Сморгонь, Дятлово, Узда, Щучин, Кировск, Пружаны, Бобруйск, Столбцы, Крупки, Бельничичи, Кричев, Чаусы, Чериков, Жодино, Несвиж, Смолевичи, Могилев
		Моренно-зандровые	Ивье, Барановичи, Береза, Ляховичи, Костюковичи, Буда-Кошелево, Иваново, Солигорск, Чечерск, Гомель
		Водно-ледниковые с озерами	Островец, Городок
		Вторичные водно-ледниковые	Молодечно, Свислочь, Белоозерск, Ганцевичи, Осиповичи, Старые Дороги, Червень, Марьяна Горка, Дрогичин, Высокое, Ельск, Малорита, Ивацевичи, Хойники, Жлобин, Вилейка, Слуцк, Шклов
Неустойчивые	Низменные, 100–150 м	Озерно-ледниковые	Скидель, Василевичи, Калинковичи, Наровля, Светлогорск, Ветка, Житковичи, Лунинец, Микашевичи, Полоцк, Новополоцк, Брест, Жабинка
		Аллювиальные террасированные	Мосты, Березовка, Быхов
		Пойменные	Рогачев, Давид-Городок, Кобрин, Пинск, Добруш, Петриков, Туров, Каменец, Речица, Столин
		Нерасчлененные речные долины	Березино, Борисов, Волковыск, Кличев, Слоним, Верхнедвинск, Дисна

провинции, захватывающей Брестскую, Гомельскую и частично Минскую области. Большинство городов данной категории в своих пределах характеризуются преобладанием озерно-ледниковых, пойменных ландшафтов и ландшафтов нерасчлененных речных долин (рис. 1).

Для анализа почвенной принадлежности каждого города использовалась почвенная карта Белорусской ССР М 1:600 000 [14] и карта педогеохимического районирования Белорусской ССР [15]. Отнесение городов к той или иной категории устойчивости к химическому воздействию осуществлялось на основе анализа гранулометрического состава почв, преобладающих на городской территории (табл. 3, рис. 2). Как видно из табл. 3, к категории устойчивых относятся

Таблица 3. Ранжирование городов по категориям устойчивости в зависимости от гранулометрического состава почв

Категория устойчивости	Гранулометрический состав почв	Города
Устойчивые	Песчаные	Березино, Березовка, Брест, Вилейка, Добруш, Ельск, Ивацевичи, Кличев, Кобрин, Малорита, Микашевичи, Молодечно, Мосты, Рогачев, Светлогорск, Климовичи, Борисов, Волковыск, Иваново, Наровля, Осиповичи, Островец, Свислочь, Старые Дороги, Узда, Чаусы, Червень, Щучин, Новополоцк, Славгород
Относительно устойчивые	Супесчаные	Барановичи, Белоозерск, Бобруйск, Василевичи, Верхнедвинск, Воложин, Высокое, Ганцевичи, Докшицы, Дрогичин, Дятлово, Жлобин, Жодино, Ивье, Калинковичи, Каменец, Лида, Ляховичи, Чечерск, Ветка, Гомель, Горки, Гродно, Дисна, Лунинец, Новолукомль, Петриков, Солигорск, Столбцы, Витебск, Глубокое, Городок, Заславль, Лепель, Марьяна Горка, Минск, Поставы, Сенно, Шклов, Полоцк, Смолевичи
Неустойчивые	Суглинистые, торфяные	Барань, Бельничичи, Браслав, Буда-Кошелево, Быхов, Дзержинск, Дубровно, Кировск, Клецк, Копыль, Несвиж, Косово, Костюковичи, Кричев, Крупки, Любань, Миоры, Круглое, Могилев, Мозырь, Житковичи, Мстиславль, Мядель, Новогрудок, Орша, Ошмяны, Пружаны, Толочин, Фаниполь, Хойники, Чашники, Логойск, Береза, Сморгонь, Пинск, Речица, Скидель, Давид-Городок, Жабинка, Слоним, Слуцк, Столин, Туров

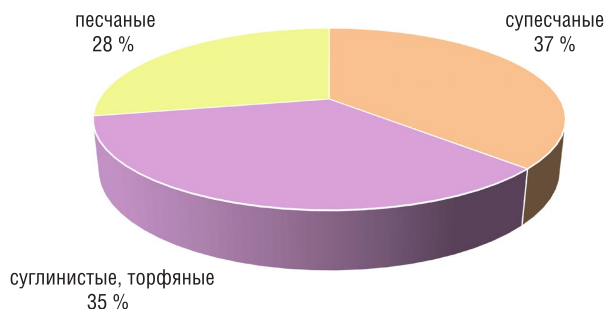


Рис. 2. Структура городов по категориям устойчивости в зависимости от гранулометрического состава почв

города, в пределах которых представлены почвы с преобладанием песчаных фракций и небольшим содержанием тонкодисперсных частиц (< 0,001 мм). В почвах таких городов наиболее интенсивно должны проявляться процессы радиального выноса загрязняющих веществ. На долю городов, относящихся к этой категории устойчивости, приходится 28 % от всех рассматриваемых населенных пунктов (рис. 2).

К группе относительно устойчивых относятся города, на территории которых преобладают почвы супесчаного гранулометрического состава. На долю городов данной группы приходится около 37 %. Около 35 % составляют города, в почвенном покрове которых преобладают почвы тяжелого гранулометрического состава (суглинки), и города, в пределах которых находятся почвы с высокой долей органической составляющей (торф).

Для определения функционального статуса города использовалась методика, предложенная Г.В. Ридевским [16]. Степень загрязнения почвенного покрова оценивалась по данным мониторинга техногенного загрязнения почв НСМОС [10, 11]. На основании этих данных города были сгруппированы по устойчивости к техногенным нагрузкам (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Ранжирование городов по уровню техногенной нагрузки в зависимости от их функционального статуса

Категория устойчивости	Функциональный статус города	Города
Устойчивые	Аграрные, туристско-рекреационные, природоохранные	Белыничи, Высокое, Дубровно, Ивье, Свислочь, Сенно, Чечерск, Дрогичин, Старые Дороги, Туров, Браслав, Заславль, Каменец, Лепель, Логойск, Миоры, Мядель, Несвиж, Новогрудок
Относительно устойчивые	Агропромышленные	Береза, Березино, Буда-Кошелево, Верхнедвинск, Ветка, Воложин, Ганцевичи, Глубокое, Городок, Давид-Городок, Дисна, Докшицы, Дятлово, Ельск, Жабинка, Житковичи, Иваново, Ивацевичи, Кировск, Круглое, Климовичи, Кличев, Копыль, Костюковичи, Крупки, Любань, Ляховичи, Малорита, Мстиславль, Наровля, Островец, Ошмяны, Петриков, Пружаны, Славгород, Смолевичи, Столбцы, Столин, Толочин, Узда, Фаниполь, Чаусы, Чашники, Червень, Чериков, Щучин
Неустойчивые	Промышленные	Барань, Барановичи, Белоозерск, Березовка, Бобруйск, Борисов, Брест, Быхов, Василевичи, Вилейка, Витебск, Волковыск, Гомель, Горки, Гродно, Дзержинск, Добруш, Жлобин, Жодино, Калинковичи, Клецк, Кобрин, Косово, Кричев, Лида, Лунинец, Марьина Горка, Микашевичи, Минск, Могилев, Мозырь, Молодечно, Мосты, Новолукомль, Новополоцк, Орша, Осиповичи, Пинск, Полоцк, Поставы, Речица, Рогачев, Светлогорск, Скидель, Слоним, Слуцк, Сморгонь, Солигорск, Хойники, Шклов

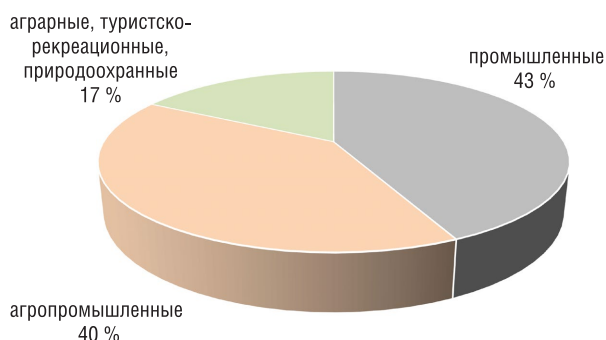


Рис. 3. Структура городов с разным функциональным статусом

К категории устойчивых относятся аграрные, туристско-рекреационные и природоохранные города, имеющие минимальную техногенную нагрузку. На их долю приходится около 17 % от общего количества городов. К группе относительно устойчивых относятся агропромышленные города с относительно невысокой техногенной нагрузкой, доля которых составляет около 40 %. К категории неустойчивых относятся промышленные города с высоким уровнем техногенной нагрузки (около 43 %) (рис. 3).

В результате компиляции полученных характеристик (ландшафтной структуры на территории городов, гранулометрического состава почв и функциональной принадлежности каждого города) выполнена балльная оценка городской территории и произведена группировка городов по устойчивости городских почв к химическим нагрузкам (табл. 5). Как видно из табл. 5, к категории устойчивых относятся города с аграрным, туристско-рекреационным и природоохранным статусом, расположенные на возвышенных ландшафтах с преобладанием на городской территории песчаных и супесчаных почв. К данной группе относится 15 % городов Беларуси.

К относительно устойчивым относятся агропромышленные, аграрные, туристско-рекреационные и природоохранные города, территории которых приурочены к возвышенным и средневозвышенным ландшафтам с песчаными и супесчаными почвами. Эта довольно многочисленная группа, на долю которой приходится 18 % населенных пунктов.

К категории среднеустойчивых относится широкий перечень городов, различных по соотношению определяющих их ландшафтный, почвенный и функциональный статус: промышленные города с преобладанием на городской территории возвышенных ландшафтов с преимущественно супесчаными почвами; промышленные города со средневысотными ландшафтами и песчаными почвами; агропромышленные города с возвышенными ландшафтами и суглинистыми, и органогенными почвенными разновидностями; агропромышленные города со средневысотными ландшафтами и супесчаными почвами; агропромышленные города с низменными ландшафтами и песчаными почвами; аграрные, туристско-рекреационные, природоохранные города со средневысотными ландшафтами и суглинистыми, органогенными почвами; аграрные, туристско-рекреационные, природоохранные города с преобладанием низменных ландшафтов и преимущественным распространением супесчаных почв. К данной группе относится 27 % городов страны (табл. 5, рис. 4).

Т а б л и ц а 5. Ранжирование городов по устойчивости к химическому загрязнению

Неустойчивые (1,00–1,40 балла)	Относительно неустойчивые (1,41–1,80 балла)	Средне-устойчивые (1,81–2,20 балла)	Относительно устойчивые (2,21–2,60 балла)	Устойчивые (2,61–3,00 балла)
Быхов, Василевичи, Давид-Городок, Жабинка, Калинковичи, Кричев, Лунинец, Могилев, Пинск, Полоцк, Речица, Скидель, Слоним, Слуцк, Сморгонь, Хойники	Барань, Барановичи, Белоозерск, Березовка, Береза, Бобруйск, Борисов, Брест, Буда-Кошелево, Верхнедвинск, Ветка, Волковыск, Витебск, Гомель, Дзержинск, Дисна, Добруш, Житковичи, Жлобин, Жодино, Кировск, Клецк, Кобрин, Косово, Костюковичи, Крупки, Лида, Марьина Горка, Микашевичи, Мозырь, Мосты, Новополоцк, Орша, Петриков, Пружаны, Рогачев, Светлогорск, Солигорск, Столин, Туров, Чашники, Шклов	Бельничичи, Березино, Вилейка, Высокое, Ганцевичи, Глубокое, Горки, Городок, Гродно, Докшицы, Дятлово, Копыль, Круглое, Любань, Кличев, Ляховичи, Минск, Миоры, Молодечно, Мстиславль, Наровля, Несвиж, Новолукомль, Осиповичи, Ошмяны, Поставы, Сенно, Смолевичи, Столбцы, Толочин, Фаниполь	Браслав, Воложин, Дубровно, Дрогичин, Ельск, Иваново, Ивацевичи, Ивье, Каменец, Климовичи, Логойск, Малорита, Мядель, Новогрудок, Островец, Узда, Чаусы, Червень, Чериков, Щучин	Заславль, Лепель, Славгород, Старые Дороги, Свислочь, Чечерск

Относительно неустойчивые – это промышленные города, приуроченные к возвышенным ландшафтам с преобладанием суглинистых и органогенных почв; промышленные города со средневысотными ландшафтами и супесчаными почвами; промышленные города с низменными ландшафтами и песчаными почвами; агропромышленные города со средневысотными ландшафтами и суглинистыми, и органогенными почвами; агропромышленные города с низменными ландшафтами и супесчаными почвами; города с аграрным,

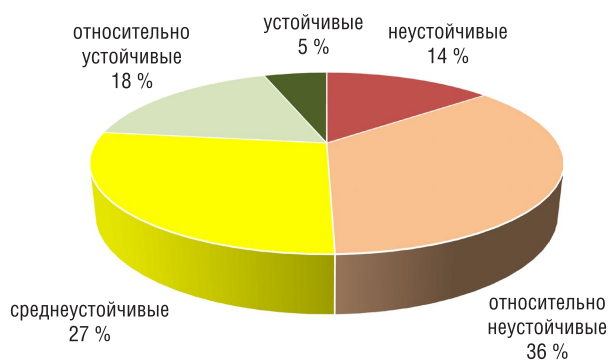


Рис. 4. Структура городов по устойчивости к химическому загрязнению

туристско-рекреационным и природоохраным статусом, приуроченные к низменным ландшафтам, с преимущественным распространением суглинистых и органогенных почв. Данная группа городов включает 36 % населенных пунктов (рис. 4).

К неустойчивым к химическим нагрузкам на почвы относятся промышленные города с низменными ландшафтами и суглинистыми, и органогенными почвами, с низменными ландшафтами и супесчаными почвами; промышленные города со средневысотными ландшафтами и суглинистыми, и органогенными почвами; агропромышленные города с низменными ландшафтами с преобладанием суглинистых и органогенных почв. Доля этой группы – 14 % от общего числа городов Беларуси.

Выводы. Таким образом, проведенные исследования позволили разработать методические подходы к оценке устойчивости почв к химическому воздействию, в основу которых положена информация о функциональном статусе города, его ландшафтной структуре и гранулометрическом составе почв, и на этой основе провести ранжирование городов Беларуси по устойчивости их территорий к техногенным нагрузкам.

Установлено, что наибольшим потенциалом устойчивости к химическим нагрузкам обладают аграрные, туристско-рекреационные города и города с природоохраным статусом, расположенные на возвышенных ландшафтах с преимущественным распространением песчаных и супесчаных почв.

Наибольшей техногенной уязвимостью обладают промышленные города с низменными ландшафтами с различными по гранулометрическому составу почвами, промышленные города со средневысотными ландшафтами с преимущественным распространением на их территории суглинистых и органогенных почв, а также агропромышленные города с низменными ландшафтами и распространенными в их пределах суглинистыми и органогенными почвами. Данные города отнесены к категории неустойчивых к техногенным нагрузкам.

Данная классификация имеет прикладное значение и может быть использована в градостроительном проектировании при учете размещения различного рода промышленных производств, а также для разработки природоохранных мероприятий на территории городов, наиболее уязвимых к техногенным нагрузкам.

Список использованных источников

1. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация; под ред. акад. РАН Г.В. Добровольского / М.И. Герасимова [и др.]. – Смоленск: Ойкумена, 2003.
2. Хомич, В.С. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси / В.С. Хомич, С.В. Какарека, Т.И. Кухарчик. – Минск, 2004. – 260 с.
3. Экогеохимия городских ландшафтов; под ред. Н.С. Касимова. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 333 с.
4. Глазовская, М.А. Методология эколого-геохимической оценки устойчивости почв как компонента ландшафта / М.А. Глазовская // Изв. РАН. Сер. Географическая. – 1997. – № 3. – С. 19–29.
5. Солнцева, Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов / Н.П. Солнцева. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с.
6. Дьяконов, К.Н. Устойчивость и инерционность геосистем / К.Н. Дьяконов, А.Н. Иванов // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. – 1991. – С. 28–34.
7. Снытко, В.А. Миграция вещества, техногенез и самоочищающая способность ландшафтов Прибайкалья / В.А. Снытко, С.А. Филиппова, С.В. Дьякова // География и природные ресурсы. – 1992. – № 3. – С. 49–56.
8. Нечаева, Е.Г. Ландшафтно-геохимический подход к изучению устойчивости геосистем / Е.Г. Нечаева // География и природные ресурсы. – 1997. – № 3. – С. 34–39.
9. Струк, М.И. Оценка устойчивости территории административных районов Беларуси / М.И. Струк, А.А. Хомич, В.А. Бакарасов // Природопользование. – 2001. – Вып. 7. – С. 57–60.
10. Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь, 2015–2018 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecoinfo.by/content/647.html/>. – Дата доступа: 11.10.2019.
11. Состояние природной среды Беларуси. Экологический бюллетень 1995–2016 гг.; под ред. В.Ф. Логинова. – Минск, 1996–2017.
12. Ландшафтная карта Белорусской ССР. М 1:600000. – ГУГК, 1984.
13. Энциклопедия природы Беларуси: у 5 т. – Т. 1–5. – Минск, 1983–1986.
14. Почвенная карта Белорусской ССР. М 1:600000. – ГУГК, 1984.
15. Петухова, Н.Н. Геохимия почв Белорусской ССР / Н.Н. Петухова. – Минск, 1987.
16. Ридевский, Г.В. Функциональная типология административных районов и классификация городов Республики Беларусь / Г.В. Ридевский // География: проблемы выкладки. – 2004. – № 1. – С. 3–14.

Поступила 17.10.2019

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ
WATER RESOURCES
ВОДНЫЯ РЭСУРСЫ

UDC 550.4.02

Mansouri-Far Siamak*Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: siamak_mansourifar@yahoo.com*

**GEOHERMAL REGIME AND GEOCHEMISTRY OF HOT SPRINGS IN MOUNT SABALAN
(NORTHWEST OF IRAN)**

The district of the Mount Sabalan is regarded as the best place to investigate geothermal activity within the northwest Iran. Since the last episode of volcanic activity in the Plio-Quaternary time, hot springs and surficial steam as a conspicuous manifestation of geothermal activity around slopes of the Mount Sabalan. Hot fluids circulating in this geothermal field contain anions chiefly of HCO_3^- and Cl^- ; however, SO_4^{2-} content in some water samples is relatively high, imparting sulfate characteristics to such fluids. Geothermometric studies provided compelling evidence for estimation of the reservoir temperature ($\sim 150^\circ\text{C}$) in the study areas. In this respect, the geothermal systems in the eastern slope of the Mount Sabalan were categorized as high-temperature ones. Hot springs within the Sarein area contain the highest Na^+ content. The highest Ca^{2+} content belongs to hot springs in the Sardabeh and Yeddiboloug areas. The maximum concentration values for K and Mg are 40 and 20 mg/dm^3 , respectively. The information on the dissolved silica concentration in a water solution could be used as a geothermometer. The fracturing provided a suitable secondary permeability and facilitated the upward migration of high-temperature geothermal fluids.

Keywords: Geothermal conditions, geochemistry, temperature, geothermometers, dissolved silica, Iran, Sabalan

Мансури-Фар Сиамак*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: siamak_mansourifar@yahoo.com*

**ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ГЕОХИМИЯ ГОРЯЧИХ ИСТОЧНИКОВ ГОРЫ САБАЛАН
(СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ИРАН)**

Район горы Сабалан выбран в качестве лучшего объекта для изучения геотермальной активности в северо-западном Иране. Начиная с последнего эпизода вулканической деятельности в плио-четвертичное время, горячие источники и проявления пара на поверхности являются свидетельством геотермальной активности вдоль склонов горы Сабалан. Горячие флюиды, циркулирующие в этом геотермальном поле, содержат в основном анионы HCO_3^- и Cl^- ; однако содержание SO_4^{2-} в отдельных пробах воды сравнительно высокое, свидетельствующее о сульфатных свойствах этих флюидов. Исследования с использованием геотермометров показывают, что пластовая температура оценивается в ($\sim 150^\circ\text{C}$) на изучаемой площади. В этой связи геотермальная система восточной части горы была охарактеризована как высокотермальная. Горячие источники на площади Сарейн (Sarein) имеют максимальное содержание Na^+ . Наибольшее содержание Ca^{2+} связано с горячими источниками площадей Сардабех (Sardabeh) и Еддиболуг (Yeddiboloug). Максимальное содержание для K и Mg – 40 и 20 мг/дм^3 соответственно. Информация по концентрации кремнезема в пробах воды может быть использована в качестве геотермометра. Трещиноватость создает вторичную проницаемость и способствует выходу высокотемпературных геотермальных флюидов.

Ключевые слова: геотермические условия, геохимия, температура, геотермометры, растворенный кремнезем, Иран, Сабалан

Мансуры-Фар Сиамак*Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь, e-mail: siamak_mansourifar@yahoo.com*

ГЕАТЭРМІЧНЫЯ ўМОВЫ І ГЕАХІМІЯ ГАРАЧЫХ КРЫНІЦ ГАРЫ САБАЛАН (ПАўНОЧНА-ЗАХОДНІ ІРАН)

Мясцовасць гары Сабалан выбрана ў якасці найлепшага аб'екту для вывучэння геатэрмальнай актыўнасці ў паўночна-заходнім Іране. Пачынаючы з апошняга эпизоду вулканічнай дзейнасці ў пліа-чацвярцічны час, праявы гарачых крыніц вады і пару на зямной паверхні сведчаць аб геатэрмальнай актыўнасці ўздоўж схілаў гары Сабалан.

Гарачыя флюіды, якія цыркуліруюць у гэтым геатэрмальным полі, утрымліваюць галоўным чынам аніёны HCO_3^- і Cl^- ; аднак ўтрыманне SO_4^{2-} у асобных пробах вады параўнальна высокае, што сведчыць аб сульфатных якасцях гэтых флюідаў. Даследаванні з выкарыстаннем геатэрмометраў адзначаюць, што тэмпература ў калектары ацэньваецца прыкладна ў $150\text{ }^\circ\text{C}$ на вывучаемай плошчы. У гэтай сувязі геатэрмальная сістэма ўсходняй часткі гары была вызначана як высокатэрмальная. Гарачыя крыніцы на плошчы Сарэйн (Sarein) утрымліваюць максімальную колькасць Na^+ . Найвялікшае ўтрыманне Ca^{2+} адзначана на плошчах Сардабех (Sardabeh) і Едзіболуг (Yeddiboloug). Максімальнае ўтрыманне для K і Mg – 40 і 20 мг/дм^3 адпаведна. Дадзеныя па канцэнтрацыі крэмнязёму ў водным раствору могуць быць выкарыстаны ў якасці геатэрмометра. Трэшчынаватасць стварае другасную прапушчальнасць і садзейнічае выхату высокатэмпературных геатэрмальных флюідаў.

Ключавыя словы: геатэрмічныя ўмовы, геахімія, тэмпература, геатэрмометры, раствораны крэмнязём, Іран, Сабалан

1. Introduction. Geothermal research is used to identify the origin of geothermal fluids and to quantify the processes that govern their composition and the associated chemical and mineralogical transformations of rocks interacting with fluids. A variation in the chemistry of geothermal fluids provides the information regarding their origin, mixing, and flow regimes of the systems [1]. Their subject has a strong applied component. The chemistry constitutes an important tool for an exploration of geothermal resources and in assessing the production characteristics of drilled geothermal reservoirs and their response to production. Geothermal fluids are also of interest as analogues to ore-forming fluids. Thermodynamic and kinetic experiments and numerical modeling of fluid flow [2] have advanced understanding of chemical processes within active geothermal systems.

The Mount Sabalan in the northwest of Iran is a part of the Azerbaijan crustal block. The map of geologic structure of Mount Sabalan and the Moeil Valley is shown in (fig. 1).

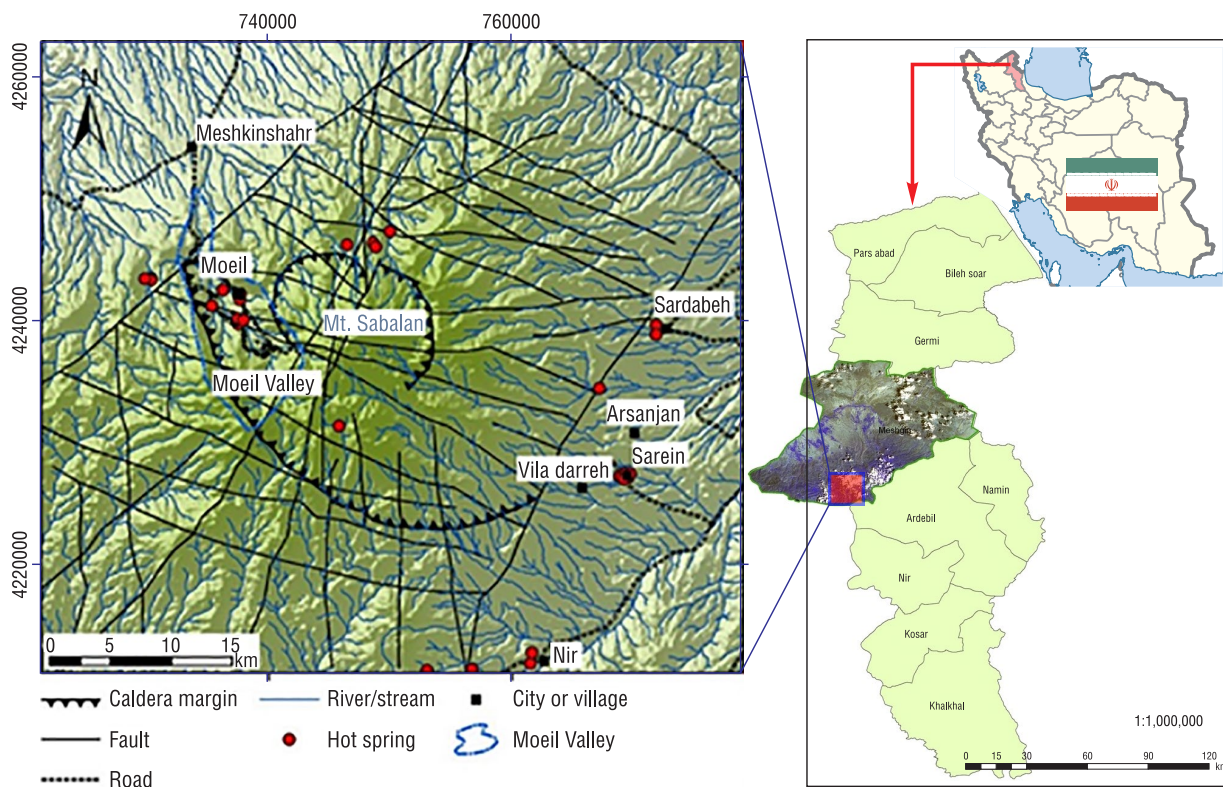


Fig. 1. Mount Sabalan area, northwestern Iran and positions of known hot springs [3]

From the geotectonic point of view, this block is situated in between the Arabian and Eurasian plates [4, 5]. In fact, the Sabalan volcano is a part of a volcanic belt stretching from the Caspian Sea in the east to the Black Sea in the west [6]. A volcanic activity along this belt is observed in various parts of Armenia, Anatolia, and western Alborz within Iran. The geothermal gradient in young volcanic regions is normally higher with a number of geothermal anomalies. It was reported by various researchers in the

early twentieth of the last century in many countries, having such anomalously high geothermal gradients in potential areas, to do attempts to harness this endless geothermal energy accumulated beneath the ground surface.

The area around the Mount Sabalan within the northwest Iran was geothermally active during the Plio-Quaternary time [7]. Also higher surficial geothermal anomalies were distinguished within other parts of the country [8]. Thus, these areas were recognized to be very important, and hence, were regarded as the first priority ones for exploration and exploiting the geothermal resources. The primary outline of geothermal systems including hot springs and surficial steams in many areas around the Mount Sabalan is indicative of a widespread young subsurface magmatic activity in this region.

In general numerous hot springs and hot areas, based on available manifestations of the volcanic rocks (according to the Geological Survey of Iran) are spread all over the whole territory of Iran.

2. Geology, tectonics and hydrology of the Sabalan area. *2.1. Geology.* The Mt. Sabalan region lies on the South Caspian Plate, which underthrusts the Eurasian Plate to the north. It is in turn underthrust by the Iranian Plate, which produces compression in a northwestern direction. Geological structures in this area are complicated further by a dextral rotational movement caused by the northward underthrusting of the nearby Arabian Plate beneath the Iranian Plate. There is no Benioff-Wadati zone to indicate any present-day subduction. Due to this tectonic framework, the Cenozoic geologic history and stratigraphy of the region are complex, with units of different structural characteristics [3, 9 – 13]. The geologic structure map of the eastern slope of Sabalan is shown in fig. 2.

Igneous activity began in the Eocene with an accumulation of potassic alkalic volcanics over a sequence of Mesozoic and Paleozoic sediments. These rocks were intruded and thermally metamorphosed by an Early Miocene monzonitic batholith, which is elongated in a NW–SE direction and is exposed on the western ridge of the Mount Sabalan. Significant uplift and erosion of the batholith followed, and a sequence of Late Miocene sediments were deposited to the southwest and southeast of the batholith [14].

2.2. Tectonics. The volcanic axis of the Sabalan area is completely covered by sediments. Thus, its structure cannot be identified. Analysis of aerial photos has pointed out two main fracture systems, one trending approximately NE–SW, prevailing over almost the whole area and integrated with a second, trending NW–SE, prevailing in the southeast sector. Minor fractures trending N–S and E–W also present. The density of the total fracture field has its maximum in correspondence with the summit of the Sabalan Massif. The gravimetric highs defined in the residual gravity map are in the northeast, west and south of the Sabalan massif and bear out the hypothesis of a structural high centered on the volcanic massif itself, which can be correlated with intrusive magmatic stocks. Local negative gravimetric minima

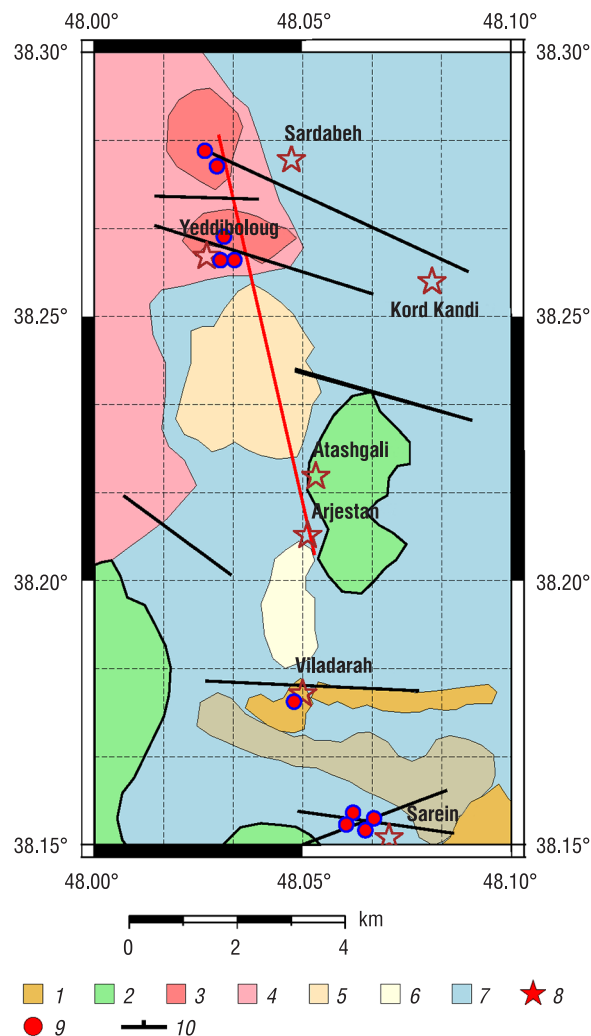


Fig. 2. Hot springs of the eastern slope of the Mount Sabalan: 1 – alternation of tuff and lahar (Quaternary); 2 – alluvial terraces (Quaternary); 3 – amorphous silica deposit (Quaternary); 4 – porphyritic basalt and andesite (Quaternary); 5 – Fe and Mn mineralization (Quaternary); 6 – andesite and trachyte (Pliocene); 7 – conglomerate with volcanic ash (Quaternary); 8 – residential area; 9 – hot springs; 10 – faults

are in Ahar–Meshkin Shahr–Lahrood, those of Nir–Ardebil and at the basin of Sarab. The anomalies are bounded by gravimetric faults that probably indicate their tectonic origin. The Meshkin Shahr area (outside the map frame) corresponds to the northern edge of the two gravimetric structural highs, one trending E–W (Sabalan west), the other NE–SW (Sabalan NE) which converge towards the area of the Sabalan massif. Geothermal springs are at the boundary of these structural highs and the Ahar–Meshkin Shahr–Lahrood Depression. The connection between the thermal springs and the fracture, bordering the structural high, seems evident for this area. In the Sarein area, west of Ardabil, thermal springs are located inside the Nir–Ardebil Depression.

2.3. Hydrology. The geothermally interesting hydrological characteristics of the sedimentary substratum can be summarized as follows: a) precambrian rocks are mainly composed of limestone, dolomite and sandstone and have a good permeability. Permo-Triassic succession, made of quartzites alternating with limestone and dolomites, has good permeability; b) the Shemshak formation, composed of shales, siltstones and sandstones has a very low permeability and can act as a good caprock; c) magmatic intrusions are permeable because of fracturing, mostly in their upper part; d) volcanites of the Oligo-Quaternary succession, made up mainly of lava, are permeable because of fractures; e) pyroclastic deposits and altered zones have medium to low permeability. In the north of the district, the dominant lithological units are trachyandesitic, dacitic, and basaltic lavas with porphyry texture manifested by plagioclase and occasionally pyroxene and amphibole phenocrysts [15].

3. Hydrogeochemistry. Hydrogeochemistry is an indispensable unit of hydrogeological studies. It aids in the determination of chemical properties and the overall qualities of groundwater, including their genesis and relationship with surface and rain waters. So far, little work on geothermal fluids has been carried out to the east of Mount Sabalan, and most of the previous studies were done on geothermal activities in other areas around the Mount Sabalan [16–19].

Despite the lack of deep drilling data, the important subjects such as hydrogeochemical characteristics of the fluids, isotopic issues, geologic conditions governing the geothermal reservoirs, lithological compositions, and fluid-feeding localities in the study area, all they merit more detailed investigations. Hydrogeochemical studies were used as the most suitable method to consider the potential geothermal characteristics of the district with the aim of approaching to applicable estimates of the geothermal energy potential.

Some of geochemical parameters, which could be applicable to get the geothermal information for the considered area, are shown in the Table 1 [6]. It was reworked and simplified and only parameters useful for estimation of temperature by geothermometric method were kept there. The data obtained from chemical analysis (major cations and anions, surface temperature hot water and hot springs flow rate) are listed there. From the physico-chemical point of view, the hot springs in the Sabalan region demonstrate characteristics of surficial geothermal fluids (acid-sulfate waters), and the physico-chemical parameters of these hot waters vary in a wide range. The maximum temperatures at the point of discharge belong to hot springs in the Sarein area (~53 °C) and the minimum ones are related to those in the Villadara area (~20 °C). The measured total dissolved solutes (TDS) in geothermal waters in this region exhibit a direct relationship with the temperature of hot springs, so that the maximum measured TDS belongs to samples from the Sarein area (TDS = 1016 mg/dm³) and the minimum to ones from the Villadara area (TDS = 275 mg/dm³).

The concentration of cations and anions in the hot springs, fig. 3, representing the above-mentioned areas are not similar and show different distribution patterns. However, an overall trend for cations like $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ and for anions like $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$ can be observed (fig. 4). Among other cations, the highest concentration values have Na^+ (240 mg/dm³) and Ca^{2+} (198 mg/dm³). Hot springs in the Sarein area contain the highest Na^+ content. The highest Ca^{2+} content belongs to the hot springs in the Sardabeh and Yeddiboloug areas.

Among the major anions, the maximum concentration values of the sulfate ($\text{SO}_4^{2-} = 528 \text{ mg/dm}^3$) and bicarbonate ($\text{HCO}_3^- = 439 \text{ mg/dm}^3$) belong to samples from the Sardabeh and Sarein areas, respectively. Chloride ion (Cl^-), relative to the other two, has a lower concentration, with a maximum value of 214 mg/dm³ in the Sarein area. The silica content of the geothermal fluids to the east of Mount Sabalan

Table 1. Physico-chemical parameters, chemical analyses, and isotopic composition data for the selected hot spring water samples from geothermal field to the east of Mount Sabalan. The sign (–) stands for a lack of analytical data [6, modified]

Sample ID	Sampling station	TDS, mg/dm ³	Elev., m	Flow rate, dm ³ /min	T, °C	Na, mg/dm ³	K, mg/dm ³	Na/K ratio	T _{Na/K} , °C	Cl ⁻ , mg/dm ³	SO ₄ ²⁻ , mg/dm ³	SiO ₂ , mg/dm ³	T _{SiO₂} , °C
ES1	Sarein	1016	1670	600	50	179	39.1	4,58	290.9	199	96.0	98.0	132.8
ES2	Sarein	936	1670	80	53	191	36.0	5,31	268.0	209.0	96.0	105.0	136.1
ES3	Sarein	396	1620	30	25	19	3.8	5.00	277.0	11.0	58.0	73.0	119.6
ES4	Sarein	277	1620	4	26	13	2.5	5.20	271.0	5.0	48.0	78.0	122.5
ES5	Sarein	910	1620	50	52	172	34.8	4,94	278.8	209.0	96.0	103.0	135.2
ES6	Sarein	910	1650	45	52	240	40.0	6.00	250.3	194.0	170.0	60.0	111.2
ES7	Sarein	–	1676	60	53	202	36.7	5.50	262.6	214.0	–	44.9	99.4
ES8	Sarein	–	1685	25	44	202	34.6	5.84	254.2	3.0	3.4	46.7	101.0
ES9	Sarein	–	1685	30	45	198	34.6	5.72	257.0	–	–	46.6	100.9
ES10	Sarein	–	1690	45	45	200	34.9	5.73	256.8	–	–	47.5	101.7
ES11	Sarein	–	1670	60	46	200	35.0	5.71	257.2	–	–	47.9	102.0
ES12	Sardabeh	830	1900	–	36	21	6.6	3.18	356.4	6.0	480.0	85.0	126.3
ES13	Sardabeh	876	1910	60	36	23	6.3	3.65	329.9	2.0	480.0	84.0	125.8
ES14	Sardabeh	891	1930	150	37	22	7.0	3.14	358.9	2.0	528.0	81.0	124.2
ES15	Sardabeh	510	1945	3	22	15	2.5	6.0	250.3	–	231.0	56.0	108.3
ES16	Sardabeh	777	1900	3	22	20	6.3	3.17	356.9	4.0	442.0	68.0	116.5
ES17	Sardabeh	–	1890	10	34	23	6.8	3.38	344.4	–	–	37.7	92.7
ES18	Sardabeh	–	1907	20	33	24	7.0	3.43	341.7	–	–	38.3	93.3
ES19	Sardabeh	–	1966	25	27	0.03	0.0	N/A	N/A	0.0	–	27.7	81.4
ES20	Sardabeh	–	1934	60	35	25	6.8	3.68	328.6	6.0	–	36.0	91.0
ES21	Sardabeh	–	1915	15	28	22	6.7	3.28	350.1	–	–	38.4	93.4
ES22	Yeddiboloug	–	1970	60	35	26	6.6	3.94	316.2	–	6.5	35.8	90.7
ES23	Yeddiboloug	–	1930	45	34	23	7.0	3.29	350.0	–	–	36.5	91.5
ES24	Yeddiboloug	–	1950	30	36	23	6.8	3.38	344.4	–	6.5	38.1	93.1
ES25	Yeddiboloug	–	1940	25	32	23	6.8	3.38	344.4	–	–	37.5	92.5
ES26	Viladara	275	1850	400	21	14	3.1	4.52	293.1	3.0	37.0	79.0	123.1
ES27	Viladara	369	1840	600	22	23	7.0	3.29	350.0	5.0	44.0	98.0	132.9
ES28	Viladara	288	1830	15	22	12	2.0	6.00	250.3	4.0	12.0	84.0	125.8
ES29	Viladara	390	1850	6	20	25	6.6	3.79	323.2	4.0	35.0	106.0	136.6
ES30	Viladara	430	1793	30	23	32	8.6	3.72	326.4	6.0	37.0	118.0	141.7

displays a wide range (27–118 mg/ dm³) and the maximum values belong to the springs in the Viladara (118 mg/ dm³) and Sarein (105 mg/ dm³) areas.

4. Subsurface temperatures. Our estimates of temperatures were fulfilled using two kinds of geothermometers, namely silica content and the Na/K ration as more frequently used [21]. Besides them there are known geothermometers based on ion exchange reactions that have temperature-dependent equilibrium constants. The respective columns Na/K ratio, T_{Na/K} (°C) and T_{SiO₂} (°C) with results of our calculations were inserted into the table 1. For the Na-K geothermometers there were proposed three different formulas [22].

We used the Na–K geothermometers (100–275 °C) for hot springs of the eastern slope of the Mount Sabalan based on the following relationship:

$$t, \text{ }^{\circ}\text{C} = \frac{856}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + 0.857} - 273.15,$$

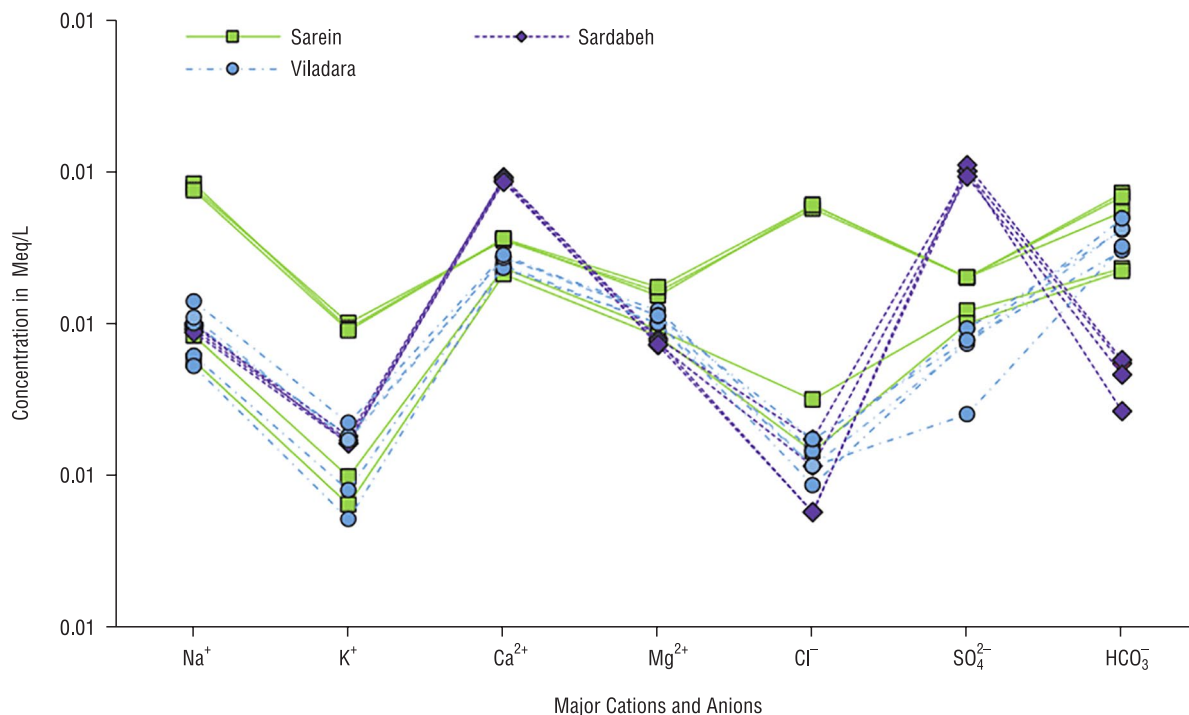


Fig. 3. Concentration variations of major cations and anions for the geothermal water samples to the east of the Mount Sabalan [20]

Na–K geothermometers [23–28] are based on ion exchange between albite-microcline, albite adularia or Na–K montmorillonite and water. The reactions on which this geothermometer is based take longer to reach equilibrium at a given temperature than those on which other common geothermometers are based and estimates, therefore, often give relatively high temperatures originating in the deeper part of a system where waters reside for relatively long periods.

Temperature estimates could be obtained using the wide spread silica thermometer. The solubility of most common silica minerals have been determined experimentally as functions of temperature at the vapor pressure of the solution. Pressure and added salts have little effect on the solubility of quartz and amorphous silica below 300 °C. Assumptions for the use of silica geothermometers are: 1) a particular silica mineral controls a dissolved silica concentration; 2) no silica precipitation occurs during ascent of a geothermal fluid from the reservoir to the surface because of conductive or adiabatic cooling; 3) silica geothermometry applied to warm spring waters is not likely to give higher temperatures than 230–250 °C because quartz dissolves and precipitates very quickly in response to changing temperature at ~ 230 °C [29, 30].

$$T = 1533.5 / (5.768 - \log \text{SiO}_2) - 273.15$$

(±2 °C in the range +125 ... +275 °C)

In general the mixing process of deep and surface waters in springs affect the results of all geothermometers. As it was mentioned the silica thermometer is widely used. Due to the good correlation between Na and K in chloride-bicarbonate and chloride-sulfate waters, which means that the Na and K ratios are less affected by mixing (for these two water types), the Na-K geothermometer probably yields the most reliable temperature.

5. Discussion. The prediction of subsurface temperature in geothermal fields is one of the most important aims of geothermal investigation. Chemical (also isotopic) geothermometers are widely used to estimate reservoir temperature. Chemical geothermometers are based on the assumption that temperature dependent mineral solute equilibria are attained in the geothermal reservoir.

The solubility of most common silica minerals have been determined experimentally as functions of temperature at the vapor pressure of the solution. Pressure and added salts have little effect on the solubility of quartz and amorphous silica below 300 °C. This information allows the dissolved silica concentration in a hydrothermal solution to be used as a chemical geothermometer.

The correlation of predicted temperature values and the silica content (see table 1) is shown in fig. 4.

A nonlinear smooth increase of the temperature from around 80 until 140 °C takes place in this figure without spikes. It could be a result of carefully collected water samples and their processing in laboratory conditions.

The Na–K geothermometers require using the respective ratio of these two cations, which is shown in the fig. 5. This plot demonstrates uneven distribution of this ration. Triangles in the upper right corner correspond to the most of samples collected from the samples Nos. ES2, ES3, ES6–ES11, ES15, ES 28. Triangle concentrated in the left lower corner were received for the rest of tested water samples. Despite this specific distribution of Na/K, using this geothermometer gives rather smooth relationship between the Na/K ratio and the calculated temperature, fig. 6. The temperature estimated using this geothermometer ranges from around 250 until 360 °C, which is higher than values received using the silica geothermometer.

The temperature calculated from the Na/K ratio regularly reduces when the Na/K decreases in a regular way as shown in the fig.6. Temperature values estimated using the silica and Na/K geothermometers considerably differ. Other researchers reported this feature also. Several water samples taken from the Sarein area were studied earlier [21] by silica (T_g , °C), Na/K and Na–K–Ca and other geothermometers, table 2. In general the results from the table 2 and table 1 correlate concerning the area of Sarein hot springs, though the data on studied water samples (their exact localities, laboratory conditions for analysis of these samples, etc. in table 2) are not described in this publication and they may slightly differ of those, included into the table 1. All three geothermometers show considerable differences in predicted temperatures, but all they exceed 100 °C.

The Na/K geothermometer gives much higher temperatures. The highest difference is observed between results obtained using the silica and Na/K geothermometers systematically exceeding 100 °C.

Silica geothermometry applied to warm spring waters is not likely to give higher temperatures than 230–250 °C because quartz dissolves and precipitates very quickly in response to changing temperature at ~ 230 °C [21, 22].

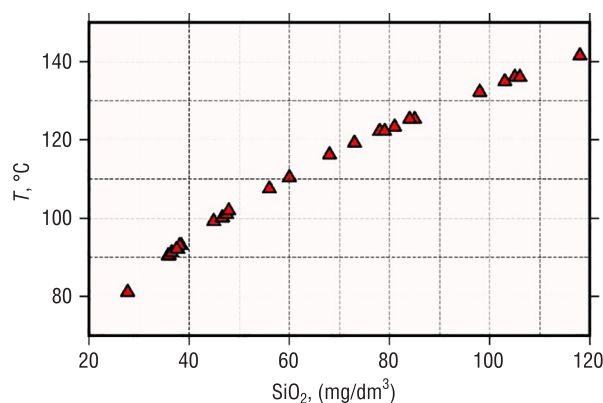


Fig. 4. SiO₂ content in water samples and calculated temperature

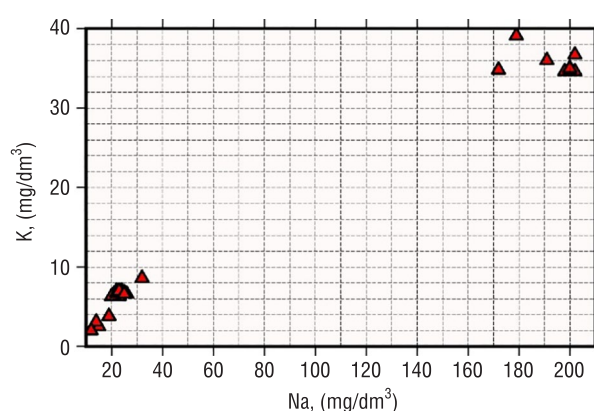


Fig. 5. Na/K ratio plot

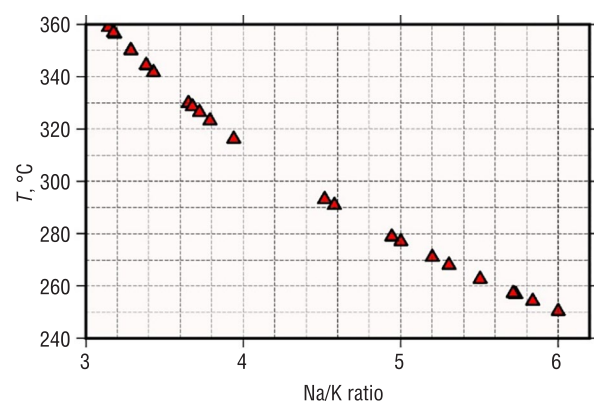


Fig. 6. Temperature estimated from the ratio of lithophilic elements Na/K

Table 2. Results for silica and cation geothermometers for thermal springs in the Sarein locality of the Mount Sabalan (derived from [21])

Area	Sample No.	T_g , °C	$T_{Na/K}$, °C	T_{Na-K-C} , °C
Sarein	1001	138	305	193
Sarein	1004	139	274	210
Sarein	1007	139	299	215
Sarein	1009	127	285	182
Sarein	1010	110	274	216

6. Conceptual model. The reservoir rocks of the geothermal system to the east of Sabalan consist generally of volcanic units that were subjected to intense fracturing imposed by the tectonic stress. The fracturing provided suitable secondary permeability and facilitated the upward migration of high-temperature geothermal fluids (fig. 7). The high-temperature chloride-bearing ascending fluids reach the surface as geothermal springs in the Sarein area. There are also hot spring waters of carbonate composition generated from condensation of the ascending CO_2 -rich steam by low- O_2 underground waters in this area. In the northern parts of the studied areas (the Sardabeh and the Yediboloug), the composition of spring waters is different, and have chiefly acid-sulfate nature resulting from oxidation of sulfides by high O_2 content in underground waters. Based upon geothermometric calculations, the geothermal reservoirs in these areas have a temperature range of 150–250 °C. Field observations revealed that the principal water feeding areas are located around the Sabalan caldera, which is covered permanently by glaciers and snow throughout the year. The melted water in the area percolates deep into the ground through existing numerous fault and cracked zones around the caldera.

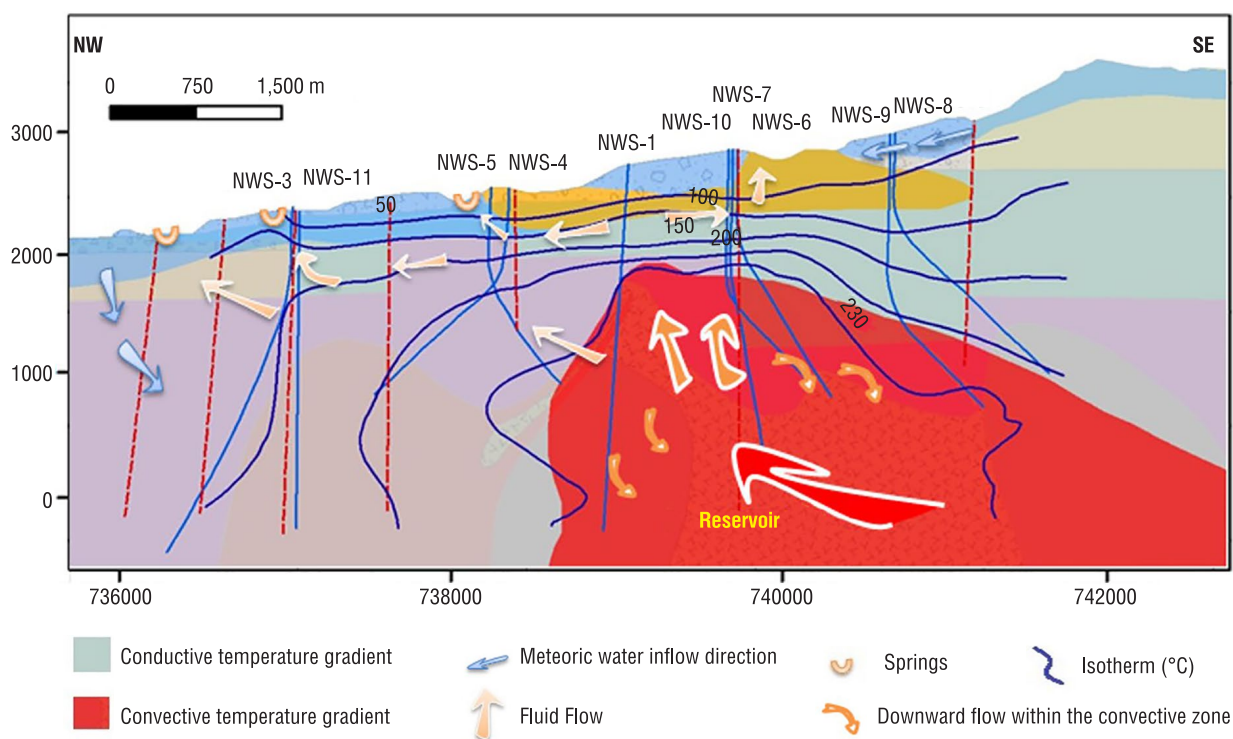


Fig. 7. Geologic-geothermal cross-section through several prospecting well of the NW part of the Mount Sabalan [31]

Temperature values recorded in the logging process in several prospecting wells drilled in the NW part of the Mount Sabalan reach 150–250 °C. An example of the temperature variation with depth is shown in fig. 8 for the NWS-3 well for different shut-down time from 40 days till 5 months, fig. 8.

The recorded temperature reaches up to 300–350 °C at depth exceeding 2000 – 2500 m. These values are compatible with the temperature data shown in the table 1 as we assume that the Sabalan has same magma source for the whole area of the volcano. The temperature values calculated using two considered geothermometers can differ also depending on the depth of the origin of hot springs discharged water to the ground surface. It is possible to assume that lithophile elements Na and K were dissolved in water at deeper layers and then migrating upwards to rocks with lower temperature enriched in silica. Then a mixture of these waters discharges to the ground surface. It will result in lower temperatures predicted using the silica thermometer and higher for Na/K based geothermometer. This possible mechanism requires further investigations.

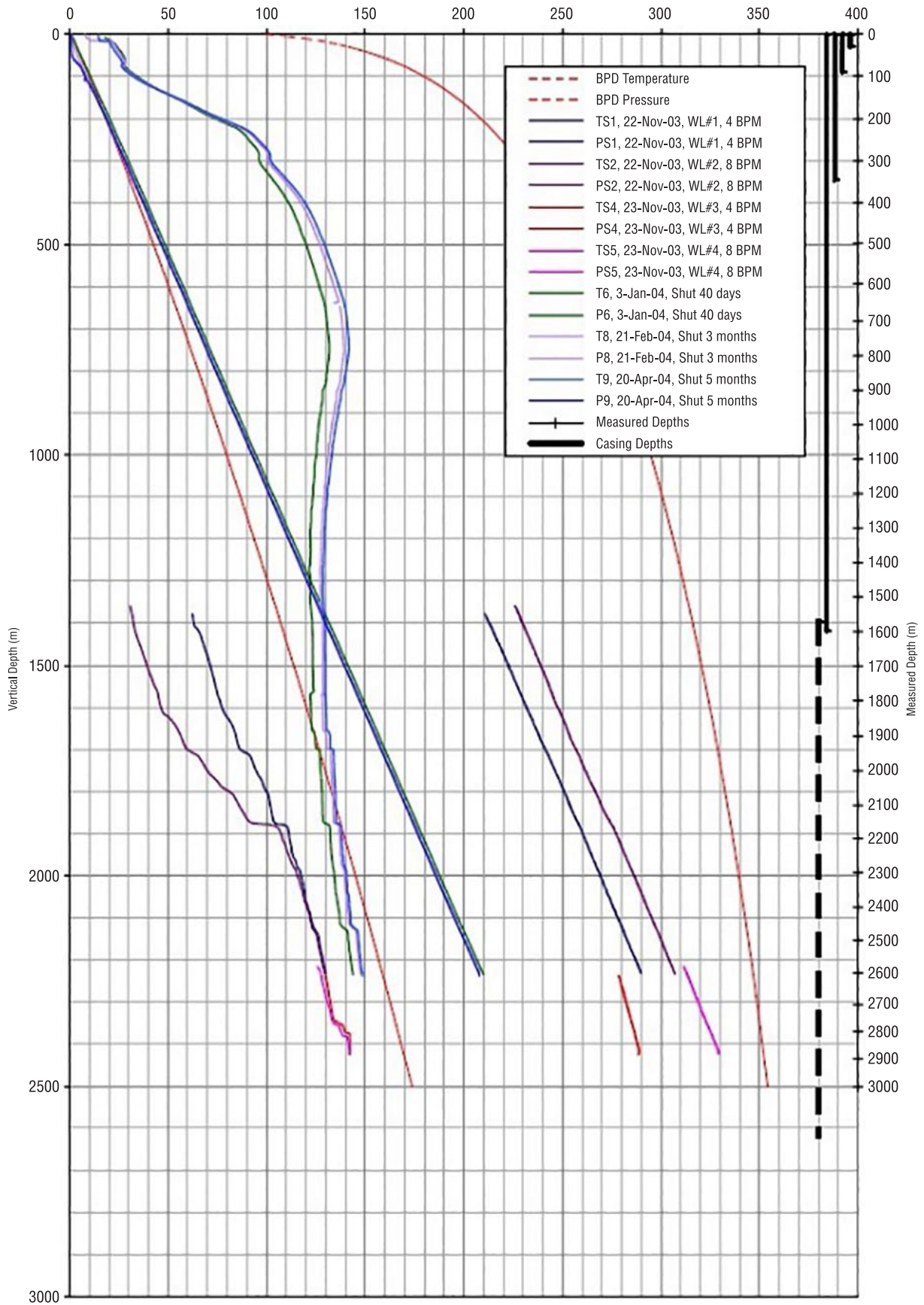


Fig. 8. Temperature-depth logs for the NWS-3 well for different shut-down time [32]

Conclusions. 1. Geological considerations east of the Mount Sabalan indicate that the calc-alkaline volcanic-sedimentary units constitute the great volume of the geothermal reservoir in the study district. Rocks suffered argillic alteration act as cap rocks for this reservoir. In some localities of the study district siliceous (chalcedony and opal) sinters developed around orifices of hot springs. The NW–SE trending faults played an important role in the development of these hot springs.

2. The geothermal fluids in the study district, in terms of physico-chemical parameters, have characteristics that differ from those of other geothermal fields around Mount Sabalan, particularly in the southern and northwestern districts.

3. The information on the dissolved silica concentration and the Na/K ratio in a hydrothermal solution can be used as chemical geothermometers.

4. The geothermal system to the east of Sabalan could be considered as an important area for geothermal steam extraction for production of “geothermal” electricity in future.

References

1. Smith M., Bisiar T., Putra T., Blackwood V. Geochemistry of geothermal fluids Rico, Colorado. *Final report*, 2011, 22 p.
2. Arnorsson S., Stefansson A., Bjarnason J. Fluid-fluid interactions in geothermal systems. Institute of Earth Sciences, University of Iceland. *Rev Mineral Geochem*, 2007, vol. 65, pp. 259–312.
3. ENEL. Geothermal power development in Iran – General report on Sabalan zone. *ENEL, internal report submitted to Ministry of Energy, Islamic Republic of Iran*, 1983, 74 pp.
4. McKenzie D. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 1972, vol. 30, pp. 109–185.
5. Dewey J. F., Pitman W. C., Ryan W. B. F., Bonnin J. Plate tectonics and the evolution of the Alpine system. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1973, vol. 84, pp. 3137–3180.
6. Masomi R., et al. Evaluation of hydrogeochemical and isotopic properties of the geothermal waters in the east of Mount Sabalan, NW Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences*, November 2017, vol. 26, no. 6, pp. 441–453. <https://doi.org/10.3906/yer-1705-11>
7. Alberti A., Chiaramonti P., Batistini G., Nicoletti M., Petrucciani C., Sinigoi S. Geochronology of Eastern Azerbaijan volcanic plateau (North-West Iran). *RENDICONTI Soc. Italiana di Mineralogia e Petrologia*, vol. 32, no. 2, pp. 579–589.
8. Yousefi H., Ehara S., Noorollahi Y. Geothermal Potential Site Selection Using GIS in Iran. *Proceedings Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California, January 22–24, 2007, SGP-TR-183, 9 p.
9. Amidi M. 1:250,000 geological quadrangle map of Iran. Ahar. *Ministry of Mines and Metals*, Tehran: Geological Survey of Iran, 1978.
10. TBCE. Geothermal power development studies, Sabalan zone. *Tehran Berkeley Consulting Engineers, Report to the Ministry of Energy, Islamic Republic of Iran.*, 1979, Tehran, 950 pp.
11. Manouchehri M. 1:250,000 Geological quadrangle map of Iran. No. B1 & B2, Tabriz-Poldasht, *Ministry of Mines and Metals*, Geological Survey of Iran, Tehran, 1989.
12. Nejad J. E. 1:250,000 scale geological quadrangle map of Iran. No. D2 Ardabil. *Ministry of Mines and Metals, Geological Survey of Iran*, Tehran, 1987.
13. Emami M. H. 1:100,000 geological map of Iran, Sheet 5566, *Ministry of Mines and Metals*, Tehran: Geological Survey of Iran, 1994.
14. KML. Sabalan geothermal project, Stage 1-Surface exploration, final exploration report. *Kingston Morrison Limited Co*, Report 2505-RPT-GE-003 for the Renewable Energy Organization of Iran, Tehran, 1998, 83 pp.
15. Haddadan M., Abbasi Damani A. 1:100000 geologic map of Ardabil. Geological survey of Iran, 1997.
16. Masoumi R., Calagari A. A., Siahcheshm K., Porkhial S. Hydrogeochemistry and origin of hydrothermal fluids on the basis of isotopic data in Sabalan geothermal system. *Quaternary Journal of Iran*, 2016, no. 2, pp. 183–195.
17. Masoumi R., Calagari A. A., Siahcheshm K., Porkhial S., Pichler T. Consideration of geological aspects and geochemical parameters of fluids in Bushdi geothermal field, south of mount Sabalan, NW Iran. *J. Afr. Earth Sci.*, 2017, vol. 129, May, pp. 692–700.
18. Masoumi R., Calagari A. A., Siahcheshm K., Porkhial S. Investigation of concentration values of heavy and rare elements in active hydrothermal fluids in geothermal field, south of Mount Sabalan, Ardebil Province, NW Iran. *Scientific Quarterly J. Geosciences.*, Summer 2018, vol. 27, no. 108, pp. 293–302 (in Persian)
19. Masoumi R., Calagari A. A., Siahcheshm K. Using geochemical and isotopic techniques for exploration of geothermal energy in Southern Sabalan geothermal field, NW Iran. *EGU General Assembly, EGU2017*, proceedings from the conference held 23–28 April, 2017 in Vienna, Austria, p.761.
20. Schoeller H. Les eaus souterraines Masson et. *Cie*, Paris, France, 1962.
21. Khosrow Khosrawi. Geochemistry of geothermal springs in the Sabalan area, Azarbydjan-Iran. Geothermal training programme. *Orkustofnun, Grensasvegur 9, IS-108 Reykjavik, Iceland. Reports*, 1996, no. 7, pp. 1–25.
22. Yock A. Geothermometry / United Nations University. *Geothermal training programme. Presented at “Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources”, organized by UNU-GTP and LaGeo, in Ahuachapan and Santa Tecla, El Salvador*, 17–30 October, 2009, 8 p. <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-09-18a.pdf>. Access on 21st Nov., 2019.
23. Truesdell A. H. Summary of section III – Geochemical techniques in exploration. *Proceedings of the 2nd UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco*, 1976, vol. 1, 28 p.
24. Tonani F. Some remarks on application of geochemical techniques in geothermal exploration / Proceedings of the 2nd International Seminar on the Results of EC Geothermal Energy Research, 4–6 March 1980, pp. 428–443.

25. Arnórsson S., Gunnlaugsson E., Svavarsson H. The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochim., Cosmochim. Acta*, 1983, vol. 47, no. 3, pp. 567–577.
26. Fournier R. O. A revised equation for Na-K geothermometer. *Geoth. Res. Council, Transactions*, 1979, vol. 3, pp. 221–224.
27. Nieva D., Nieva R. Developments in geothermal energy in Mexico part twelve. A cationic geothermometer for prospecting of geothermal resources. *Heat Recovery Systems and CHP*, 1987, vol. 7, no. 3, pp. 243–258.
28. Giggenbach W.F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na–K–Mg–Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1988, vol. 52, no. 12, pp. 2749–2765.
29. Fournier R. O. Silica in thermal waters. Laboratory and field investigations. *Proceedings of the International Symposium on Hydrogeochemistry and Biochemistry*, 1973, Tokyo, Clark Company., Washington D. C., pp. 122–139.
30. Rimstidt I. D., Bames H.L. The kinetics of silica-water reaction. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1980, vol. 44, no. 11, pp. 1683–1699.
31. Seyedrahimi Niaraq M., Doulati Ardejani F., Noorollahi Y., Porkhial S. Development of an updated geothermal reservoir conceptual model for NW Sabalan geothermal field, Iran. *Geotherm. Energy*, 2017, vol. 5, no. 14, 22 p. <https://doi.org/10.1186/s40517-017-0073-0>
32. Abdollahzadeh Bina F. Geothermal resource assessment of the NW-Sabalan field, Iran, through well testing / United Nations University. *Geothermal training programme. Orkustofnun, Grensásvegur 9, IS-108 Reykjavík, Iceland, Number 6, Presented at "Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources", organized by UNU-GTP and LaGeo, in Ahuachapan and Santa Tecla, El Salvador, 17–30 October, 2009, pp. 15–44, Access on 21st Oct. 2019. <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-09-06.pdf>*

Поступила 17.10.2019

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ
BIOLOGICAL RESOURCES
БІЯЛАГІЧНЫЯ РЭСУРСЫ

UDC 551.791; 567 (476)

D. P. Plax*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: agnatha@mail.ru*

**ON THE REDEPOSITED SILURIAN ICHTHYOFAUNA REMAINS
IN THE QUATERNARY DEPOSITS OF BELARUS**

The paper presents for the first time the information on the redeposited remains (scales and tesserae) of the Silurian vertebrates found in the Quaternary deposits of Belarus. A complete systematic review and brief descriptions of the agnathan and fish taxa with the identification of their material, determination of their preservation degree, location and geographical distribution, as well as with an assumption of the age of the rock enclosing these ichthyofauna remains and their redeposition type.

Keywords: redeposited skeletal elements, Silurian ichthyofauna, Quaternary deposits, Belarus

Д. П. Плакс*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: agnatha@mail.ru*

**О ПЕРЕОТЛОЖЕННЫХ ОСТАТКАХ СИЛУРИЙСКОЙ ИХТИОФАУНЫ
В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БЕЛАРУСИ**

Впервые приводятся сведения о находке в четвертичных отложениях на территории Беларуси переотложенных остатков (чешуй и тессер) силурийских позвоночных. Дается полный систематический обзор и краткие описания таксонов бесчелюстных и рыб с указанием материала, характера его сохранности, местонахождения и географического распространения, а также высказывается предположение относительно возраста вмещающей породы, содержащей остатки ихтиофауны, и типе ее переотложения.

Ключевые слова: переотложенные скелетные элементы, силурийская ихтиофауна, четвертичные отложения, Беларусь

Дз. П. Плакс*Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь, e-mail: agnatha@mail.ru*

АБ ПЕРАКЛАДЗЕННЫХ РЭШТКАХ СИЛУРЫЙСКОЙ ІХТЫЯФАУНЫ Ў ЧАЦВЯРЦІЧНЫХ АДКЛАДАХ БЕЛАРУСІ

Упершыню прыводзяцца звесткі аб знаходцы ў чацвярцічных адкладах на тэрыторыі Беларусі перакладзеных рэшткаў (лусак і тэсэр) сілурыіскіх хрыбетных. Даецца поўны сістэматычны агляд і кароткія апісанні таксонаў бясківічных і рыб з указаннем матэрыялу, характару захаванасці, месцазнаходжання і геаграфічнага распаўсюджвання, а таксама выказваецца меркаванне адносна ўзросту пароды, якая ўмяшчае рэшткі іхтыяфаўны, і тыпу яе перакладу.

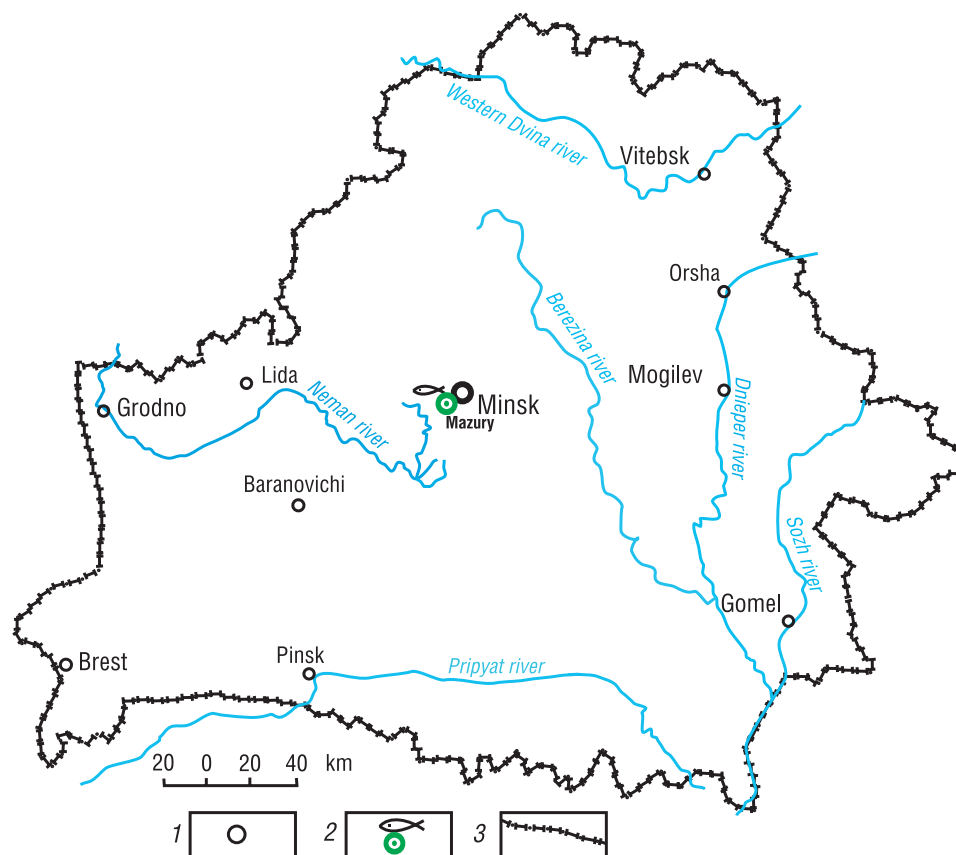
Ключавыя словы: перакладзеныя шкелетныя элементы, сілурыіская іхтыяфаўна, чацвярцічныя адклады, Беларусь

Introduction. For a long time there were no reliable evidences on the redeposited skeletal elements of the Silurian vertebrates in the Quaternary deposits found within the territory of Belarus. However, since the last century some data on the Silurian remains of the invertebrate animals occurring in the secondary bedding in the Quaternary deposits of the country became available. Findings of the redeposited Silurian corals, mollusks, brachiopods from the Quaternary deposits are mentioned in several publications by famous geologists of that time [1–4]. The author of this paper also succeeded to find

numerous redeposited remains of the Silurian invertebrate fauna in the Quaternary deposits for several years of its investigation. He found the skeletons of the sponges, stromatoporoids, corals, trilobites, ostracod valves, shells of the bivalves, gastropods, cephalopods, tentaculites and brachiopods, skeletons of the bryozoans, echinoderms and graptolites, but didn't manage to find the vertebrate remains. Only recently palaeontologist Yu.V. Zaika was lucky to find a rather large redeposited rock fragment with the Silurian vertebrate remains in one of the sandy and gravel quarries of the Minsk region. This is the first reliably established finding in the territory of Belarus and so far the only one. The preliminary results on its study were published as a short report in the proceedings of the 15th International Scientific and Technical Conference held at the Belarusian National Technical University in 2017 [5]. This paper presents a comprehensive information about this interesting finding.

Material and methods. The studied micromeric skeletal remains of the thelodonts and acanthodians were obtained from an acetic acid-treated piece of the organogenic limestone. The photographs of the agnathan and fish microremains were made with a scanning electron microscope JSM-5610 LV (JEOL, Japan). The images were processed with Adobe Photoshop CS6, the figures were created with CorelDRAW X3. The skeletal elements were studied using microscopes MBS-1 and «LOMO» Biolam au-12. The diagnostics of the skeletal elements of the agnathans and fishes were based mainly on the external morphological features. A small part of the scales, mainly those represented by more than one specimen were exposed to the histological examination.

Results of research. As a result of the research it was established that the rock containing the Silurian ichthyofauna remains is a light grey, cryptocrystalline, dense, massive, rather hard, rounded, basically fine-detrital, slightly clayey organogenic limestone. This rock piece is about 15 cm in diameter. It was found in the «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol (Dzerzhinsk district, Minsk region) (Text-Figure 1). After this organogenic limestone sample dissolving with acetic



Text-Fig. 1. Location of the area of finding the redeposited Silurian vertebrates in the Quaternary deposits in the territory of Belarus: 1 – city; 2 – place of finding of the redeposited Silurian ichthyofauna in the Quaternary deposits («Mazury» sandy and gravel quarry); 3 – frontiers

acid there were found rather abundant ostracod valves, calcareous tubes of the worms, crinoid segments, some fragments of the brachiopod shells, some single conodonts, more than a dozen of discrete thelodont scales of *Thelodus parvidens* Agassiz, *T. cf. sculptilis* Gross, *T. admirabilis* Märss, numerous isolated acanthodian scales of *Nostolepis striata* Pander, *N. cf. striata* Pander, *N. cf. elegans* (Brotzen), *N. sp.*, *N. ? sp.*, *Gomphonchus sandelensis* (Pander), *G. volborthi* ? (Rohon), *G. cf. volborthi* (Rohon), *G. sp.*, *Gomphonchoporus hoppei* (Gross), *G. hoppei* ? (Gross), Ischnacanthiformes gen. et sp. indet., Acanthodii gen. et sp. indet. 1, Acanthodii gen. et sp. indet. 2, Acanthodii gen. et sp. indet. 3, one scale of probably acanthodian head sensory line and four Nostolepid stellate tesserae.

The ichthyofauna found in this organogenic limestone permits a conclusion that this rock is either Late Silurian, or Latest Ludfordian, or Earliest Pridolian in age. The similar vertebrate assemblage with an exception of some acanthodian taxa is known from both the deposits of the Kuressaare Regional Stage of the Ludfordian Stage of the Ludlowian Series, and the sediments of the Äigu Beds of the Kaugatuma Regional Stage of the Lower Pridolian of the Upper Silurian of Estonia [6, 7]. In Lithuania the similar ichthyofauna assemblage also excluding some representatives of the acanthodians is known from the deposits of the upper part of the Pagegial Regional Stage of the Ludfordian Stage and the lower strata of the Minija Regional Stage of the bottom part of the Pridolian Series of the Upper Silurian [7–9].

It should be noted that according to the classification by T.B. Yanin [10] the discovered rock containing organic remains is related to the glacial type redeposition rocks, i.e., this rock had been reburied from the more ancient deposits, in our case, from the Upper Silurian formations into the younger Quaternary formations.

Taxonomic composition and brief description of the ichthyofauna. A brief palaeontological description of the taxa of the Silurian vertebrates found in the Quaternary deposits of Belarus without specifying the synonymy is presented below. The collection of the skeleton fragments of the agnathans and fishes is a part of the author's personal collection.

Phylum CHORDATA Haeckel, 1874
Subphylum VERTEBRATA Lamarck, 1801
Superclass AGNATHA Cope, 1889
Class DIPLORHINA Kiaer, 1924
Subclass Thelodonti Jaekel, 1911
Order Thelodontiformes Kiaer, 1932
Family Coelolepididae Pander, 1856
Genus *Thelodus* Agassiz, 1839
Thelodus parvidens Agassiz, 1839
 Plate I, Figures 1a, 1b, 2a, 2b and 2c

Description. Morphology. Two cephalo-pectoral scales with the crowns about 0.55 mm and 0.85 mm long were found. The shape of the crown of the scales is rhomboid. The anterior margin is round, the lateral corners are distinct and slightly rounded. The posterior part of the crown is slightly elongated with a slightly rounded end. The crown surface is smooth, flat with a slightly lowered anterior edge. At high magnification the microscopic longitudinal scratches (grooves) are clearly observed in the anterior part of the crown. The neck is distinct, high, smooth on the anterolateral walls and with short vertical ribs on the posterior walls. The base of one scale is well defined, oval, convex and not very high (Plate I, Figure 1b), the base of second scale is diamond-shaped, high and strongly convex (Plate I, Figure 2b and 2c). The pulp opening is located in the center of the base.

The histological examination of the scales was not performed as sufficient data were available for their reliable determination by the external morphological characters, as well as because of their small number.

Material and its preservation. Two scales of very good preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Russia, Estonia, Latvia, Lithuania, Belarus, Great Britain, Netherlands, Sweden, Germany, Poland.

Thelodus cf. sculptilis Gross, 1967

Plate I, Figure 3

Description. Morphology. The cephalo-pectoral scale with a crown about 0.45 mm in length. The crown shape is elongated-rhomboid, much larger than the base. The posterior edge of the crown is slightly pointed. The crown surface is slightly convex, with a downturned anterior edge. Three segments - the medial and two lateral ones separated by two longitudinal grooves are distinctly distinguished on the crown. The medial part of the crown is the longest as compared to the two lateral ones. The crown is covered with microscopic grooves and pores which are most distinctly visible in its anterior and posterior parts. The neck is high with vertical ridges on the posterolateral walls. The base is oval, medium high. The pulp opening is located in the center of the base.

Material and its preservation. One scale of good preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry nearby the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Russia, Baltic States, Belarus, Sweden.

Thelodus admirabilis Märss, 1982

Plate I, Figures 4, 5a, 5b, 6, 7, 8, 9, 10 and 11

Description. Morphology. The rostral scales with a crown 0.3 - 0.45 mm in length. The crown is rounded, oval, rounded-rhomboid, flat or slightly convex. Numerous ridges on the crown surface converge and get narrower towards the center. They tend to bifurcate at the outer margin and are separated by steep deep furrows. The neck is not high. The base is well-defined, oval, rounded-rhomboid. A large pulp opening is located in the center of the base.

The cephalo-pectoral scales with their crown length ranging from 0.5 to 0.62 mm. Their crown is rhomboid, flat, with a downturned anterior edge. The crown sculpture consists of a series of ridges and grooves. The ridges are two to three times wider than the grooves. The ridges separated by narrow grooves usually converge nearby the posterior corner of the scale. Some shallow but steep grooves between the ridges die out in the same direction or proceed through the scale. The posterior corners of the cephalo-pectoral scales always have almost circular or pointed peg-like posterior projections. The scales have relatively long ridges anteriorly and a segmented margin posteriorly. The neck of the scales is high, distinct with short vertical ribs on the posterolateral walls. The base of the scales is almost of the same size as the crown. It is convex. The pulp opening is in the center of the base.

The postpectoral scales have a length of 0.63 to 0.65 mm. The shape of their crown is oblong-rhomboid, flat with an anterior margin curved downwards. The postpectoral scales have a length of 0.63 to 0.65 mm. The shape of their crown is oblong-rhomboid, flat with an anterior margin curved downwards. The crown sculpture consists of numerous (up to 9) longitudinal ridges and furrows directed radially to its posterior edge. Some furrows open at the posterior edge of the crown. A prong may occur in the medial distal part. The neck is distinct, relatively high. The base is well defined, with a pulp opening.

Histology. The dentine tubules are thin radially diverging from the single pulp cavity towards the surface of the crown. The dentine tubules are straight in the center of the crown. These are shorter than those rising towards the margins. The dentine tubules are branching at several levels, crowded in the central part of the crown and are fewer and sinuous within the neck. In the base these can merge with Sharpey's fibers of the basal layer.

Material and its preservation. Ten scales of good and satisfactory preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located nearby the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Estonia, Latvia, Lithuania, Belarus, Poland, Sweden.

Infraphylum GNATHOSTOMATA Gegenbaur, 1874**Superclass Pisces Linnaeus, 1758****Class ACANTHODII Owen, 1846****Order Clamatiiformes Berg, 1940****Family indeterminate****Genus *Nostolepis* Pander, 1856***Nostolepis striata* Pander, 1856

Plate II, Figures 1, 2, 3, 4, 5 and 6

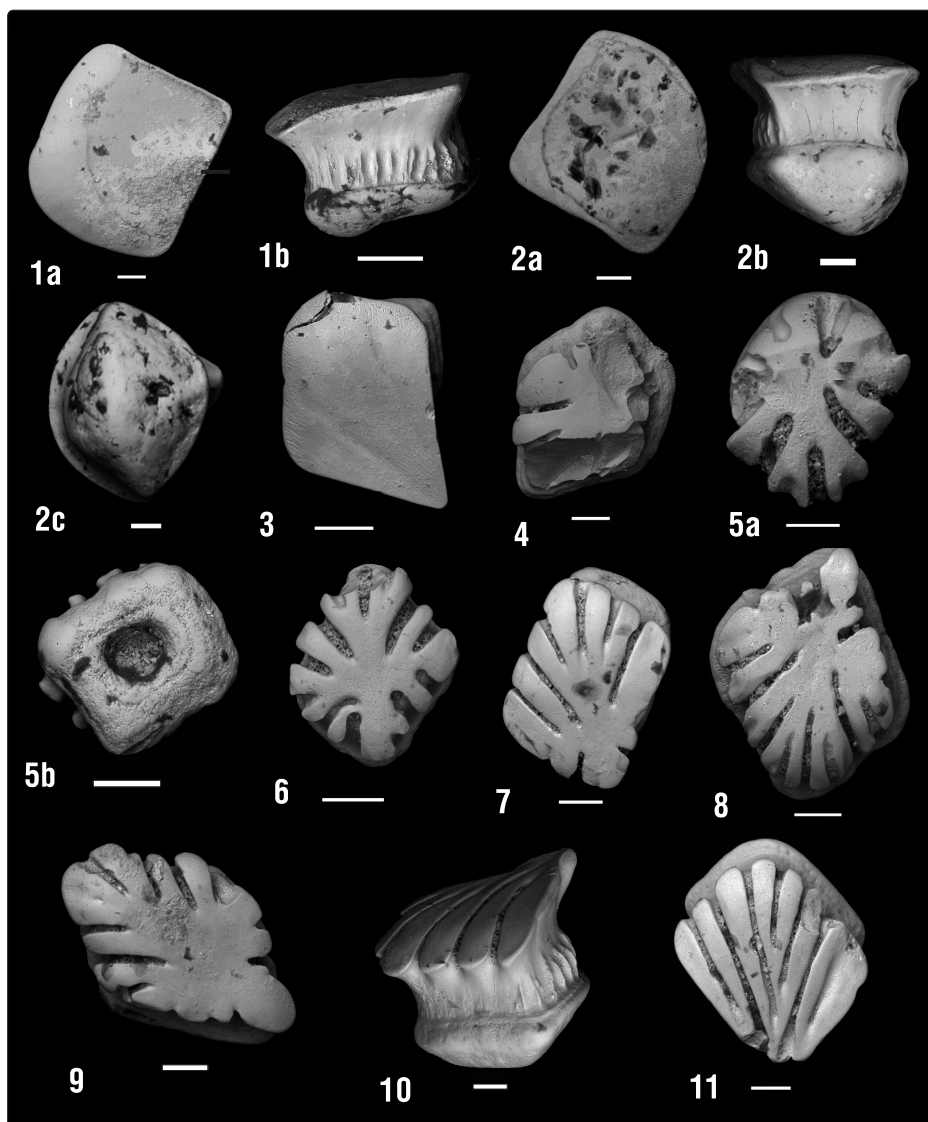


Plate I. Silurian thelodont scales found in the Quaternary deposits of the «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol in the Minsk region. Scale bar of 50 μ m for Figure 5a; 100 μ m for Figures 1a, 2a, 2b, 2c, 3, 4, 5b, 6, 7, 8, 9, 10 and 11; 200 μ m for Figure 1b

Figure 1 – *Thelodus parvidens* Agassiz, 1839. Specimen № 111/8-3, cephalo-pectoral scale: a – scale in crown view, $\times 100$; b – scale in lateral view, $\times 95$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 2 – *Thelodus parvidens* Agassiz, 1839. Specimen № 111/8-32, cephalo-pectoral scale: a – scale in crown view, $\times 120$; b – scale in lateral view, $\times 120$; c – scale in basal view, $\times 100$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 3 – *Thelodus cf. sculptilis* Gross, 1967. Specimen № 111/8-38, cephalo-pectoral scale in crown view, $\times 200$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 4 – *Thelodus admirabilis* Märss, 1982. Specimen № 111/8-12, rostral scale in crown view, $\times 150$; the sandy and gravel quarry «Mazury» near the town of Fanipol. Figure 5 – *Thelodus admirabilis* Märss, 1982. Specimen № 111/8-1, rostral scale: a – scale in crown view, $\times 370$; b – scale in basal view, $\times 250$; the sandy and gravel quarry «Mazury» near the town of Fanipol. Figure 6 – *Thelodus admirabilis* Märss, 1982. Specimen № 111/8-2, rostral scale in crown view, $\times 200$; the sandy and gravel quarry «Mazury» near the town of Fanipol. Figure 7 – *Thelodus admirabilis* Märss, 1982. Specimen № 111/8-20, cephalo-pectoral scale in crown view, $\times 150$; the sandy and gravel quarry «Mazury» near the town of Fanipol. Figure 8 – *Thelodus admirabilis* Märss, 1982. Specimen № 111/8-23, cephalo-pectoral scale in crown view, $\times 150$; the sandy and gravel quarry «Mazury» near the town of Fanipol. Figure 9 – *Thelodus admirabilis* Märss, 1982. Specimen № 111/8-26, cephalo-pectoral scale in oblique crown view, $\times 150$; the sandy and gravel quarry «Mazury» near the town of Fanipol. Figure 10 – *Thelodus admirabilis* Märss, 1982. Specimen № 111/8-9, postpectoral scale in oblique lateral view, $\times 120$; the sandy and gravel quarry «Mazury» near the town of Fanipol. Figure 11 – *Thelodus admirabilis* Märss, 1982. Specimen № 111/8-22, postpectoral scale in crown view, $\times 130$; the sandy and gravel quarry «Mazury» near the town of Fanipol

Description. Morphology. The scales of various sizes with a crown sloping anteriorly. Subparallel ribs of different length located on the crown are often fading out, but sometimes reaching the distal section. There are scales with lateral subordinate ridges. The neck is poorly developed. The base is rhomboid, rounded-rhomboid, convex with an apex either located in the center, or shifted toward the anterior edge.

Histology. The crown is mainly formed of oriented mesodentine and in the marginal parts of the growth lamellae only is represented by simple mesodentine. The intertwined dentine tubules form a dense network on the crown. These are thin and directed upward. Strangewebe is developed in the crown posterior part and the scale primordium. This tissue occupies most of each growth lamella. Large ascending, radial and circular vascular canals form a complicated network. In the bone tissue of the base there are large cavities with bone cells.

Material and its preservation. More than a dozen of scales of good preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Russia, Estonia, Latvia, Lithuania, Belarus, Ukraine, Canada, Great Britain, Sweden, Svalbard, Germany, China, India, Australia.

Nostolepis cf. striata Pander, 1856

Plate II, Figure 7

Description. Morphology. A scale with a crown about 0.4 mm long. The crown of the scale is flat, rhomboid with an elongated posterior part. In the anterior part of the crown there are about nine short, poorly visible (most probably erased) ribs. The neck is low, poorly developed. The base is large, massive, convex. The apex is in the center of the base.

Material and its preservation. One scale of satisfactory preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located not far from the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Russia, Estonia, Lithuania, Latvia, Ukraine, Belarus, Australia, etc.

Nostolepis cf. elegans (Brotzen, 1934)

Plate II, Figures 8 and 9

Description. Morphology. The scales with the crowns 0.4 mm and 0.6 mm in length. The crowns of the scales are slightly downturned, flat, one of them is triangular-elongated in shape, the second one is rhomboid-elongated. Only the anterior part of the medial area is ornamented with several short, strongly rounded ridges. The lateral areas are outlined by inclined long neck ridges. The posterior end of the crown can go far beyond the edge of the base. The necks of the scales are low. The bases are rhomboid and slightly going beyond the anterior edge of the crown. An apex of the scales is shifted forward from the center of the base.

Material and its preservation. Two scales of satisfactory preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located not far from the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Baltic States, Sweden, Belarus.

Nostolepis sp.

Plate II, Figures 10, 11, 12, 13 and 14

Description. Morphology. Both intact, and fragmentary scales were found. In the fragmented scales the posterior part of the crown is either not preserved, or destructed after being extracted from the rock. All the scales in the anterior part of the crown have rough, wide or sharp ridges of different length. Some of them reach the distal end of the crown. The crown of the intact specimens is elongated-rhomboid, triangular-elongated sloping with a medial depression. The neck is poorly developed. The base is rounded-rhomboid, oval, massive, convex, slightly extending beyond the anterior edge of the crown. The apex is usually slightly shifted forward.

Material and its preservation. More than a dozen of scales of good and satisfactory preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Russia, Lithuania, Latvia, Estonia, Belarus, Ukraine, Poland, Great Britain, Sweden, China, Australia, etc.

Nostolepis ? sp.

Plate II, Figure 15

Description. Morphology. The scale with a crown about 0.4 mm long. The crown is oval-rhomboid, flat, in the anterior part there is a series of short, indistinctly expressed ridges. The neck is low. The base is rhomboid, large, slightly convex. The apex is indistinct, slightly shifted forward.

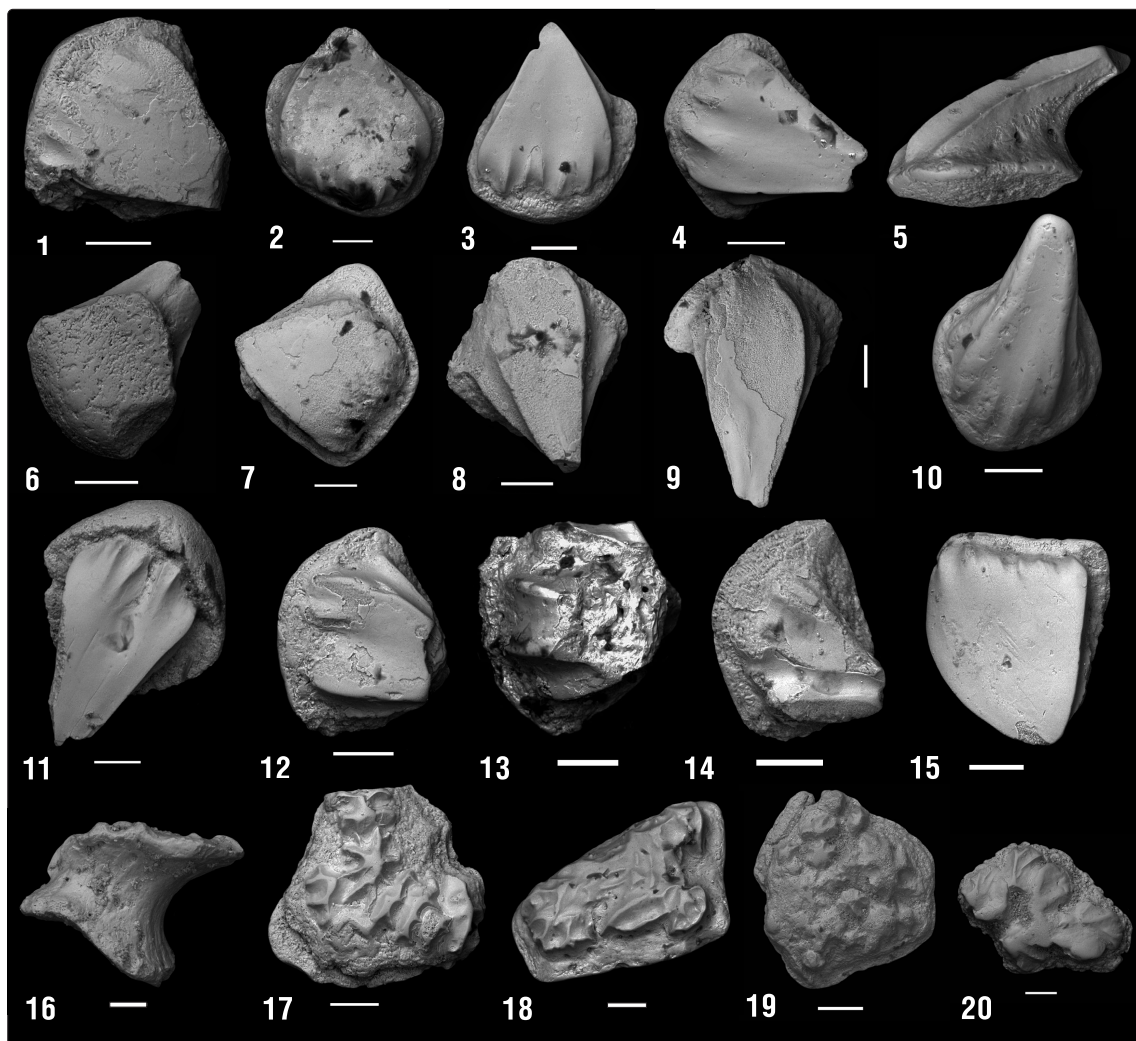


Plate II. The Silurian acanthodian scales and tesserae found in the Quaternary deposits of the sandy and gravel quarry «Mazury» located near the town of Fanipol of the Minsk region. Scale bar of 100 μ m for Figures 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 and 20; 200 μ m for Figure and 19

Figure 1 – *Nostolepis striata* Pander, 1856. Specimen № 111/8-19, scale in crown view, $\times 250$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 2 – *Nostolepis striata* Pander, 1856. Specimen № 111/8-43, scale in crown view, $\times 150$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 3 – *Nostolepis striata* Pander, 1856. Specimen № 111/8-35, scale in crown view, $\times 150$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 4 – *Nostolepis striata* Pander, 1856. Specimen № 111/8-24, scale in crown view, $\times 230$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 5 – *Nostolepis striata* Pander, 1856. Specimen № 111/8-27, scale in lateral view, $\times 200$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 6 – *Nostolepis striata* Pander, 1856. Specimen № 111/8-28, scale in basal view, $\times 230$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 7 – *Nostolepis cf. striata* Pander, 1856. Specimen № 111/8-41, scale in crown view, $\times 150$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 8 – *Nostolepis cf. elegans* (Brotzen, 1934). Specimen № 111/8-34, scale in crown view, $\times 200$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 9 – *Nostolepis cf. elegans* (Brotzen, 1934). Specimen № 111/8-39, scale in crown view, $\times 150$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 10 – *Nostolepis* sp. Specimen № 111/8-7, scale in crown view, $\times 200$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 11 – *Nostolepis* sp. Specimen № 111/8-25, scale in crown view, $\times 150$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 12 – *Nostolepis* sp. Specimen № 111/8-14, scale in crown view, $\times 200$, the posterior part of the crown is broken; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 13 – *Nostolepis* sp. Specimen № 111/8-47, scale in crown view, $\times 200$, the posterior part of the crown is broken; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 14 – *Nostolepis* sp. Specimen № 111/8-57, scale in crown view, $\times 200$, the posterior part of the crown is broken; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 15 – *Nostolepis* ? sp., Specimen № 111/8-55, scale in crown view, $\times 200$; «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 16 – *Nostolepis* sp. Pultschuppe sensu Gross 1971. Specimen № 111/8-6, scale in oblique lateral view, $\times 150$, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 17 – *Nostolepid*. Specimen № 111/8-16, stellate tessera in top view, $\times 180$, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 18 – *Nostolepid*. Specimen № 111/8-42, stellate tessera in oblique top view, $\times 150$, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 19 – *Nostolepid*. Specimen № 111/8-10, stellate tessera in top view, $\times 90$, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 20 – *Nostolepid*. Specimen № 111/8-11, stellate tessera in top view, $\times 180$, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol

Material and its preservation. One scale of satisfactory preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located not far from the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Belarus.

Nostolepis sp. Pultschuppe sensu Gross, 1971
Plate II, Figure 16

Description. Morphology. The scales with a crown measuring about 0.5 mm. The crown is oval-elongated, not smooth. The anterior part of the crown is gently sloping, downturned anteriorly, the posterior part is raised. The neck is distinct, high. The base is oval, flattened, with weak concavity in the anterior part.

Remark. In the report [5] these scales were initially identified as Chondrichthyes indet.

Material and its preservation. Two scales of satisfactory preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Belarus and some other countries.

Nostolepid stellate tesserae
Plate II, Figures 17, 18, 19 and 20

Description. Morphology. Four polygonal tesserae from 0.45 to 1.2 mm in size were found in the rock. Their outer surface is covered with branched or stellate tubercles covering not the entire surface area. The tessera base is massive, flat or slightly convex.

Material and its preservation. Four tesserae of good and rather good preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Russia, Baltic States, Belarus, Sweden, Australia, etc.

Order Ischnacanthiformes Berg, 1940
Family Ischnacanthidae Woodward, 1891
Genus *Gomphonchus* Gross, 1971

Gomphonchus sandelensis (Pander, 1856)

Description. Morphology. The scales with their crowns measuring 0.5 mm and 0.8 mm. The crown is rhomboid, oval-rhomboid, flat, usually smooth or with short ridges in the proximal part. The anterior margin of the crown is circular and slightly downturned. The neck is distinct, high, with vertical ribs posteriorly. The neck rim is sharp. The base is rhomboid, massive, strongly convex jutting slightly out of the crown. The apex is shifted slightly forward.

Histology. The crown is composed of dentine and enamel-like dentine. Long narrow ascending vascular canals containing many lateral branches and located in the basis parts of each of the growth lamellae are clearly expressed in the neck. The growth lamellae are penetrated by dense ascending vascular canals. No lacunae are presented. The radial canals occur above the base surface and consist of many long branches. The acellular bone tissue of the base is penetrated by numerous narrow, short tubules and Sharpey's fibers.

Material and its preservation. Two scales of good and satisfactory preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry in the vicinity of the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Russia, Lithuania, Latvia, Estonia, Belarus, Ukraine, Poland, Central Asia, Sweden, Great Britain, China.

Gomphonchus volborthi ? (Rohon, 1893)
Plate III, Figures 1 and 2

Description. Morphology. The scales with their crowns ranging from 0.3 to 0.35 mm in length. The crown shape is almost triangular with a circular or straight anterior edge. The posterior part of the crown is rounded and extends slightly behind the base. Most part of the crown surface of the scales is flat and smooth. The anterior part of the crown is covered with distinct radial ridges, that quickly fade away not reaching the side corners. The neck is well defined, relatively not high. The base is rhomboid, large, strongly convex and is larger in size than the crown. The apex is slightly shifted forward from the base center.

Material and its preservation. Two scales of good preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry in the area of the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Belarus.

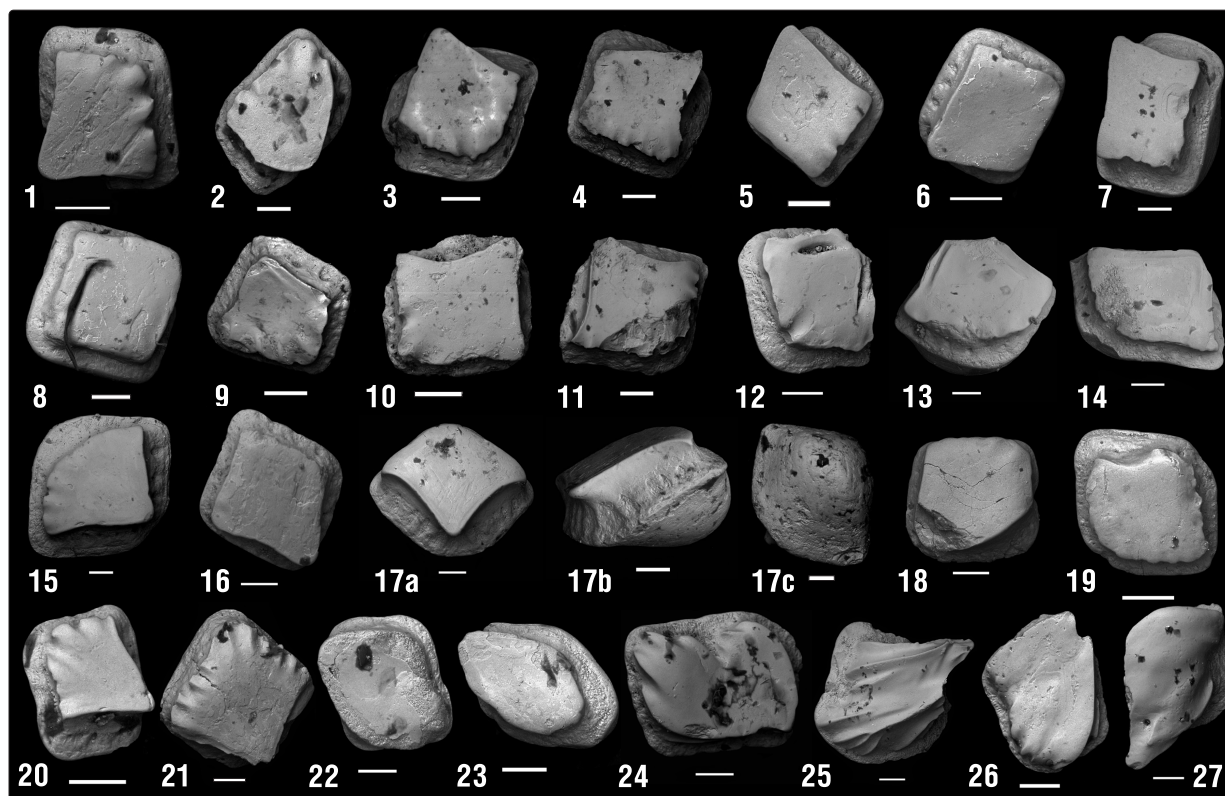


Plate III. Silurian acanthodian scales found in the Quaternary deposits of the «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol in the Minsk region. Scale bar of 100 µm for Figures 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17a, 17b, 17c, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26 and 27; 200 µm for Figure 25

Figure 1 – *Gomphonchus volborthi* ? (Rohon, 1893). Specimen № 111/8-30, scale in crown view, ×250, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 2 – *Gomphonchus volborthi* ? (Rohon, 1893). Specimen № 111/8-61, scale in crown view, ×150, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 3 – *Gomphonchus cf. volborthi* (Rohon, 1893). Specimen № 111/8-45, scale in crown view, ×200, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 4 – *Gomphonchus cf. volborthi* (Rohon, 1893). Specimen № 111/8-46, scale in crown view, ×150, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 5 – *Gomphonchus cf. volborthi* (Rohon, 1893). Specimen № 111/8-51, scale in crown view, ×200, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 6 – *Gomphonchus cf. volborthi* (Rohon, 1893). Specimen № 111/8-59, scale in oblique crown view, ×250, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 7 – *Gomphonchus cf. volborthi* (Rohon, 1893). Specimen № 111/8-49, scale in crown view, ×150, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 8 – *Gomphonchus* sp. Specimen № 111/8-18, scale in crown view, ×190, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 9 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947). Specimen № 111/8-48, scale in crown view, ×200, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 10 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947). Specimen № 111/8-17, scale in crown view, ×250, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 11 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947). Specimen № 111/8-44, scale in crown view, ×150, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 12 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947). Specimen № 111/8-15, scale in oblique crown view, ×200, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 13 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947). Specimen № 111/8-4, scale in oblique crown view, ×140, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 14 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947). Specimen № 111/8-5, scale in oblique crown view, ×150, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 15 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947). Specimen № 111/8-13, scale in crown view, ×120, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 16 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947). Specimen № 111/8-8, scale in crown view, ×190, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 17 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross). Specimen № 111/8-36, scale: a – scale in anterior crown view, ×150; b – scale in lateral view, ×130; c – scale in basal view, ×130, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 18 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947). Specimen № 111/8-50, scale in oblique crown view, ×200, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 19 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947). Specimen № 111/8-53, scale in crown view, ×200, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 20 – *Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947). Specimen № 111/8-58, scale in crown view, ×200, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 21 – *Gomphonchoporus hoppei* ? (Gross, 1947). Specimen № 111/8-40, scale in crown view, ×150, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 22 – *Ischnacanthiformes* gen. et sp. indet. Specimen № 111/8-52, scale in crown view, ×200, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 23 – *Ischnacanthiformes* gen. et sp. indet. Specimen № 111/8-54, scale in crown view, ×200, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 24 – *Acanthodii* gen. et sp. indet. 1. Specimen № 111/8-29, scale in crown view, ×200, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 25 – *Acanthodii* gen. et sp. indet. 2. Specimen № 111/8-37, scale in crown view, ×65, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 26 – *Acanthodii* gen. et sp. indet. 3. Specimen № 111/8-62, scale in crown view, ×200, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol. Figure 27 – Possibly acanthodian head sensory line scale. Specimen № 111/8-31, scale in crown view, ×150, «Mazury» sandy and gravel quarry near the town of Fanipol

Gomphonchus cf. volborthi (Rohon, 1893)

Plate III, Figure 3, 4, 5, 6 and 7

Description. Morphology. The scales are 0.3-0.5 mm long. Their crown is diamond-shaped with a slightly elongated posterior edge. The posterior edge is usually sharp. Most of the crown surface is flat. Its anterior part is smooth or covered with short radial ridges. The neck is clear, not high. The base is rhomboid, rounded-rectangular, massive, large, strongly convex, larger than the crown. The apex of the scales is slightly displaced forward from the center of the base.

Material and its preservation. About a dozen of scales of good and satisfactory preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Belarus, Great Britain, Sweden, Poland.

Gomphonchus sp.

Plate III, Figure 8

Description. Morphology. The scales with their crowns ranging from 0.4 to 0.7 mm in length. The crowns of the scales are rhomboid, flat, smooth. The posterior edge of the crowns is circular, obtuse. The neck is well defined, not very high. The base is diamond-shaped, massive, strongly convex, slightly larger than the crown with the apex slightly shifted toward the anterior edge of the scale.

Material and its preservation. Three scales of satisfactory preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Russia, Lithuania, Latvia, Estonia, Belarus, Ukraine, Poland, the USA, Great Britain, Sweden, Svalbard, Greenland, India, Australia.

Family Poracanthodidae Vergoossen, 1997**Genus *Gomphonchoporus* Vergoossen, 1999***Gomphonchoporus hoppei* (Gross, 1947)

Plate III, Figures 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17a, 17b, 17c, 18, 19 and 20

Description. Morphology. The scales are from small to relatively large ones in size (0.3-0.8 mm). The crown is rhomboid or almost triangular, with angular or rounded anterior edge. The posterior edge of the crown is sharp or obtuse (rounded). The anterior part of the crown up to the lateral corners is either smooth, or with prominent, sharp radial ridges, that may extend beyond the lateral corners or may be short. The surface of the crown between the ridges can be concaved rather deeply, especially in the anterior part. One narrow deep groove can be observed on each side in the posterior part of the crown. The neck is well-defined, not very high. Its posterolateral areas are lowered with ribs or without them. The base is oval, rhomboid, massive, strongly convex, exceeds the size of the crown. The apex is shifted forward.

Histology. The crown of the scales consists of dentine located in numerous thin growth lamellae. The posterior part of the crown contains the pore canals or can be without them. There is a well-defined network of thin sinuous branching and ascending vascular canals. The radial canals located in the neck do not usually form long branches. They may be exposed on some scales. The dentine tubules in the crown surface layer are short in length. Their centripetal orientation is well observed. The base of the scales is represented by the acellular bone tissue, which is penetrated by numerous narrow and short tubules and well-defined long Sharpey's fibers.

Material and its preservation. About fifteen scales of good and satisfactory preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry in the vicinity of the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Russia, Estonia, Latvia, Lithuania, Belarus, the Netherlands, Germany, etc.

Gomphonchoporus hoppei ? (Gross, 1947).

Plate III, Figure 21

Description. Morphology. The scale shows a crown measuring 0.45 mm in length. The crown is rhomboid in shape. The posterior edge of the crown is slightly broken. The anterior part of the crown is covered by short distinct radial ridges. The neck is not very high. The base is oval-rhomboid, massive, convex, slightly larger than the crown. The crown is slightly shifted anteriorly.

Material and its preservation. One scale of relatively good preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Belarus.

Ischnacanthiformes fam. gen. et sp. indet.

Plate III, Figures 22 and 23

Description. Morphology. The scales with a crown measuring about 0.4 mm in size. Their crown is rounded-rhomboid, oval-elongated, flat, without sculpture. The neck of the scales is high, well-defined. The base of the scales is rounded-rhomboid, ellipsoidal, large, convex, slightly larger than the crown. The apex is located either in the center of the base, or slightly shifted forward.

Material and its preservation. Seven scales of which four are fairly well-preserved and three are slightly rounded; «Mazury» sandy and gravel quarry in the area of the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Besides Belarus, the acanthodian scales belonging to this order are widely distributed throughout the world.

Acanthodii gen. et sp. indet. 1

Plate III, Figure 24

Description. Morphology. A small scale with a crown slightly concave in the middle part and flattened on each side, as well as with several short vanishing ridges on the proximal edge. The neck is low. The base is rounded-rectangular, large, massive, strongly convex, larger than the crown.

Remarks. This scale is somewhat similar to the scales of *Canadalepis linguiformis* Vieth [9, 11, 12]. However, the scales of this species are characteristic of the deposits of the upper part of the Pridolian Series of the Upper Silurian and the Lochkovian Stage of the Lower Devonian. The scale described here is more ancient, according to dating of the rock sample from which it originates. The presence of an abundant scale material would allow the more detailed study and the more accurate species determination.

Material and its preservation. One scale of good preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located nearby the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Belarus.

Acanthodii gen. et sp. indet. 2

Plate III, Figure 25

Description. Morphology. The scale is large, the crown is about 1.4 mm in length. The crown is steeply downturned forward. The sculpture consists of three distinct large ribs running from the posterior section of the crown to the anterior one. In the anterior part of the crown they break up into 2 - 3 short ridges. The base is large, angular-oval, very massive, strongly convex and protrudes anteriorly and on each side of the crown edges. The apex is in the center of the base.

Material and its preservation. One scale of good preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Belarus.

Acanthodii gen. et sp. indet. 3

Plate III, Figure 26

Description. Morphology. The scales with a crown measuring about 0.4 mm in length. The crown is flat with small depressions on each side and with short poorly expressed ridges along the anterior margin. The neck is low. The base is large, improperly rhomboid, convex, slightly larger than the crown. The apex is well-defined, slightly moved forward.

Material and its preservation. One scale of good preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry in the vicinity of the town of Fanipol in the Minsk region.

Geographical distribution. Belarus.

Possible acanthodian head sensory line scale

Plate III, Figure 27

Description. Morphology. Small scale with a slightly destroyed crown. The crown is thin, smooth; the surface is uneven with a gently sloping circular anterior edge. The neck is poorly developed and smoothly passing into the crown. The base is rounded-rhomboid, flattened, slightly extending beyond the crown edges.

Material and its preservation. One scale of good preservation; «Mazury» sandy and gravel quarry located near the town of Fanipol of the Minsk region.

Geographical distribution. Belarus.

CONCLUSIONS

Micromeric skeleton elements (scales and tesserae) of the redeposited Silurian ichthyofauna represented by thelodonts and acanthodians were revealed for the first time in the Quaternary deposits of the territory of Belarus, namely, in the Minsk region, and their descriptions and photographs are presented. Unfortunately, due to a small number of some skeletal remains found or to their not perfect preservation, the significant part of this ichthyofauna representatives could not be accurately identified to a species. The author believes that in the future the task-oriented searches for the skeletal elements of the Silurian vertebrates, which occur in the secondary bedding in the Quaternary deposits, will nevertheless permit discovering their abundant remains. This will provide an opportunity to perform the more accurate taxonomic definitions and to supplement their systematic composition in the territory of Belarus, as well as to find out the ways of their skeletal element transportation by glaciers together with their enclosing rocks within the country.

The author of the paper is grateful to Yu.V. Zaika, candidate of geological and mineralogical sciences, for the material he kindly provided for the study, and to Dr. C. Burrow (University of Queensland, Queensland, Australia) for the helpful discussion of some definitions of the ichthyofauna taxa. The author appreciates the help of V. G. Filippova in editing the English version of the paper.

References

1. *Helmersen G.A.* Geognostical study of the Devonian belt of central Russia from the Western Dvina River to the Voronezh River // Notes of the Imperial Russian Geographical Society, 1856, Book XI, pp. 3–59 (in Russian).
2. *Helmersen G.A.* Report on the geological investigations and explorations made from 1872 to 1876 in the provinces of Grodno and Kurland to study the mineral fuel deposits found in them // Mining Journal, 1880, vol. 1, no. 2, pp. 182–239 (in Russian).
3. *Antonovich M.A.* Geognostical essay of the banks of the Western Dvina within the Vitebsk province // Mining Journal, 1873, vol. 2, no. 4, pp. 55–87 (in Russian).
4. *Karnozhitsky A.N.* Geological investigations in the southwestern part of the Vitebsk province and in the northern parts of the Minsk and Mogilev provinces // Materials on Geology of Russia. Saint Petersburg, 1895, vol. 17, pp. 113–131 (in Russian).
5. *Plax D. P. & Zaika Yu. V.* First findings of the redeposited Silurian ichthyofauna in the Quaternary deposits of Belarus / Proceedings of the 15th International Scientific and Technical conference «Science for Education, Production and Economy Purposes» // Editorial Board: B.M. Khroustalev, F.A. Romaniuk, A.S. Kalinichenko. Minsk: BNTU, 2017, vol. 3, pp. 232.
6. *Märss T.* Silurian vertebrates of Estonia and West Latvia. Fossilia Baltica, 1986, no. 1, pp. 1–104 (in Russian, with English summary).
7. *Märss T., Nännik P.* Revision of Silurian vertebrate biozones and their correlation with the conodont succession // Estonian Journal of Earth Sciences, 2013, vol. 62, no. 4, pp. 181–204.
8. *Karatajūtė-Talimaa V.N. & Brazauskas A.* Distribution of vertebrates in the Silurian of Lithuania // Geologija, 1994, no. 17, pp. 106–114.
9. *Valiukevičius J.* Silurian acanthodian biostratigraphy of Lithuania // Geodiversitas, 2005, vol. 27, no. 3, pp. 349–380.
10. *Yanin B. T.* Fundamentals of Taphonomy. Moscow: Nedra Publ., 1983, 184 p. (in Russian).
11. *Vieth J.* Thelodontier-, Acanthodier- und Elasmobranchier-Schuppen aus dem Unter-Devon der Kanadischen Arktis (Agnatha, Pisces). Göttinger Arb. Geol. Paläont., 1980, no. 23, 69 s.
12. *Valiukevičius J.* Acanthodians and zonal stratigraphy of Lower and Middle Devonian in East Baltic and Byelorussia // Palaeontographica, Stuttgart, 1998, abt. A, pp. 1–53.

Поступила 05.03.2019

И. И. Лапука, В. В. Вежновец*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам, Минск, Беларусь,
e-mail: ilya.lapua@yandex.ru, vezhn47@mail.ru***ТАКСОНОМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗООБЕНТОСА ОЗЕР СЕВЕРНЫЙ ВОЛОС
И ЮЖНЫЙ ВОЛОС И ЕГО ИЗМЕНЕНИЕ С ГЛУБИНОЙ**

Установлен видовой состав зообентоса в озерах Северный Волос и Южный Волос, входящих в состав Национального парка «Браславские озера». Зарегистрировано 39 видов и форм, относящиеся к 3 типам: членистоногие, кольчатые черви и моллюски. Наиболее встречаемые в обоих озерах – личинки хирономид. Число таксонов выше в оз. Ю. Волос, имеющем большую прозрачность и высокое содержание кислорода в гипolimнионе. Несмотря на имеющееся соединение между озерами бентофауна совпадает только на 39,5 %. В составе зообентоса оз. Ю. Волос зарегистрировано 2 вида реликтовых ракообразных: бокоплав Палласа и понтопорья, а в оз. С. Волос встречается только один реликтовый вид (бокоплав Палласа). Общее количество видов и состав зообентоса изменяется с глубиной, в обоих озерах идет рост разнообразия от литорали к зоне температурного скачка, где наблюдается максимум. В профундали оз. С. Волос идет постепенное обеднение фауны, что, вероятно, обусловлено недостатком кислорода. а в оз. Ю. Волос при благоприятном кислородном режиме к максимальным глубинам количество населяемых таксонов возрастает.

Ключевые слова: озера, зообентос, видовой состав, глубина, температура, содержание кислорода

I. I. Lapuka, V. V. Vezhnavecs*Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources, Minsk, Belarus, e-mail: ilya.lapua@yandex.ru, vezhn47@mail.ru***TAXONOMIC COMPOSITION OF ZOOBENTOS OF “SEVERNYY VOLOS” AND “YUZHNY VOLOS” LAKES
AND ITS CHANGE WITH DEPTH**

Species composition of the zoobenthos of “Severnny Volos” and “Yuzhny Volos” which are part of the National Park “Braslavskie Oзера”, was established. There were registered 39 species and forms, which belong to 3 types: arthropods, annelids and mollusks. In both lakes the most common were the chironomid larvae. The number of taxa was higher in the Yu. Volos, which has greater transparency and high oxygen content in the hypolimnion. Despite the connection that exists between the lakes, benthofauna match only with a 39.5 % agreement. In the zoobenthos composition of the Yu. Volos was registered 2 relic crustaceans: Pallasiopsis and Monoporeia. Only one relict species was found in the S. Volos (Pallasiopsis). The total number of species and zoobenthos composition varies with depth. In both lakes there is a diversity increase from the littoral to the temperature jump zone, where is a maximum. There is a gradual depletion of fauna in profundal zone of the S. Volos, which is probably due to a lack of oxygen. In the Yu. Volos the number of inhabited taxa increases to the maximum depths under favorable oxygen regime.

Keywords: lakes, zoobenthos, species composition, depth, temperature, oxygen content

I. I. Лапука, В. В. Вежновец*Навукова-практычны цэнтр Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі па біяресурсах, Мінск, Беларусь,
e-mail: ilya.lapua@yandex.ru, vezhn47@mail.ru***ТАКСАНАМІЧНЫ СКЛАД ЗААБЕНТАСУ Ў АЗЁРАХ ПАЎНОЧНЫ ВОЛАС І ПАЎДНЁВЫ ВОЛАС І ЯГО ЗМЯНЕННЕ
З ГЛЫБІНЁЙ**

Усталяваны відавы склад заабентасу ў азёрах Паўночны Волас і Паўднёвы Волас, якія ўваходзяць у склад Нацыянальнага парку «Браслаўскія азёры». Зарэгістравана 39 відаў і формаў, якія адносяцца да 3 тыпаў: членістаногія, кольчатая чэрві і малюскі. Найбольш сустракаемыя ў абодвух азёрах былі лічынкі хіранамід. Лік таксонаў вышэйшы у возеры Паўднёвы Волас, якое мае вялікую празрыстасць і высокае ўтрыманне кіслароду ў гіпалімініёне. Нягледзячы на наяўнае злучэнне паміж азёрамі бентафаўна супадае толькі на 39,5 %. У складзе заабентасу воз. Паўднёвы Волас зарэгістравана 2 віды рэліктавых ракападобных: бакаплаў Палласа і пантапарэя, а ў воз. Паўночны Волас сустракаецца толькі адзін рэліктавы від (бакаплаў Палласа). Агульная колькасць відаў і склад заабентасу змяняецца з глыбінёй, у абодвух азёрах ідзе рост разнастайнасці ад літаралі да зоны тэмпературнага скачка, дзе назіраецца максімум. У прафундалі воз. Паўночны Волас ідзе паступовае збядненне фаўны, што, верагодна, абумоўлена недахопам кіслароду, а ў воз. Паўднёвы Волас пры спрыяльным кіслародным рэжыме да максімальных глыбіняў колькасць населяемых відаў узрастае.

Ключавыя словы: возера, заабентас, відавы састаў, глыбіня, тэмпература, утрыманне кіслароду

Введение. Озера Южный Волос и Северный Волос входят в Браславскую группу озер Национального парка «Браславские озера» и характеризуются чистотой воды. Наблюдения за зоопланктоном этих водоемов проводятся нами ежегодно с 1972 г. Данные по зообентосу малочисленны и разрознены и в основном связаны с обитанием в них реликтовых видов ракообразных. Хотя озера связаны между собой протокой и рассматриваются некоторыми исследователями как один водоем, однако по основным характеристикам среды обитания для водных животных значительно отличаются.

Пространственная структура видовых популяций является одной из характеристик их экологической ниши. Известно, что в каждом конкретном водоеме и даже местообитании создается ряд абиотических и биотических условий, способных влиять на размещение животных. Особенности некоторых видов является оседлость, а других – активное перемещение в водоеме между различными биотопами в поисках пищи или оптимальных абиотических условий. Кроме того, разные возрастные группы могут иметь различную пространственную структуру в водоеме, т.е. менять свою биотопическую приуроченность в процессе роста и развития и в течение вегетационного сезона.

Цель работы – установить видовой состав зообентоса и его изменение на станциях различной глубины, отличающихся температурой и содержанием растворенного кислорода.

Материалы и методы. Полевой материал был собран 07.08.2018 г. Пробы отобраны дночерпателем Боруцкого с площадью захвата 0,0225 м² и Петерсена – 0,0289 м² по пяти глубинам, начиная с максимальной в каждом из озер и заканчивая прибрежьем. На каждой станции собрано по три пробы.

Разбор проб и измерение животных проводили под бинокулярным микроскопом МБС-10 с увеличением до ×56. Для идентификации животных использовали работы [1–5], входящие в пособия: «Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР: (Планктон и бентос)» и «Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 4.».

Измерение температуры и кислорода в толще воды проводили термооксиметром Hanna HI 9143. Прозрачность воды определяли по белому диску Секки. Статистическую обработку всех полученных фаунистических результатов, построение графиков проводили в пакетах программ Excel 2010 и Statistica 6.0. Сравнение видового состава определяли по формуле:

$$K = \frac{C_x * 100}{A + B - C},$$

где C – количество видов, общих для двух биотопов; A – количество видов одного биотопа; B – количество видов второго биотопа.

Краткая характеристика исследованных водоемов. Северный Волос. При площади 4,21 км² и максимальной глубине 29,2 м озеро относится к числу небольших, но глубоких водоемов со средней глубиной 7,29 м. Литораль узкая, сублиторальный склон хорошо выражен, дно с многочисленными мелями, максимальная глубина в центральной впадине [6]. Притоков мало, есть соединение с оз. Ельня и пролив, соединяющий с оз. Ю. Волос. Дренаруется каналом, соединяющим его с оз. Снуды. Считается слабопроточным водоемом.

Температурная стратификация выражена хорошо. Мощность эпилимниальной зоны может меняться в пределах 9–14 м. Металимнион несколько растянут и составляет 4–4,5 м. Гиполимнион в разные годы наблюдений занимает около половины толщи воды. Температура придонного слоя летом от 6,5 до 7,5 °С. Центральная часть с максимальной глубиной более насыщена кислородом, а в северо-восточном заливе (глубина 18–20 м) кислород исчезает полностью на глубине около 10 м, у дна 16–17 м появляется сероводород. Такие различия кислородного режима объясняются быстрым эвтрофированием водоема под воздействием стоков свиноводческой фермы, которая долгое время располагалась на южном берегу этого (Обабинского) залива. Рост дефицита кислорода в центральной части, по-видимому, также происходил под влиянием этого фактора. Несмотря на это общая минерализация остается невысокой и составляет 180–190 мг/л. Озеро имеет высокую прозрачность с межгодовыми изменениями от 4,5 до 7 м.

Южный Волос. Озеро небольшое с площадью 1,21 км². Средняя глубина 12,5, максимальная достигает 40,4 м (по собственным данным около 42 м). Литоральная зона в целом узкая, только местами в южной части достигает 30–50 м, и уже на глубине около 1 м сменяется крутым сублиторальным склоном [6].

Сток идет в северной части через широкую (около 10–20 м), но мелководную (около 1 м) протоку в оз. С. Волос. Имеет небольшие притоки, пересыхающие летом. В 1980-е годы в озеро был выкопан магистральный мелиоративный канал. Озеро относится к слабопроточным, основа прихода – подземное питание.

Водная масса перемешивается только до глубины 4–5 м из-за защиты от ветров лесным массивом. Относительно других озер отличается высоким содержанием кислорода во всей толще воды. Гиполимнион начинается с глубины 8 м, где температура постоянно низкая (4,0–6,0 °С) при сравнительно высоком содержании кислорода, не ниже 3–4 мг/л. Общая минерализация такая же, как и в соседнем озере (180–200 мг/л). Имеет высокую (5–8 м) прозрачность воды летом, а зимой до 13 м.

Подводные макрофиты из рдестов местами образуют густые заросли на глубинах от 4 до 9 м. Дно материкового склона покрыто харовыми водорослями, элодеей, роголистником до глубины 10–12 м. По гидрохимическим, гидробиологическим показателям и обитанию реликтов озеро относится к мезотрофным с чертами олиготрофии.

Результаты и их обсуждение. Во время наших наблюдений температура воды в оз. С. Волос изменялась от 24,4 у поверхности до 6,7 °С у дна. Эпилимнион четко выражен, занимает верхний пятиметровый слой воды, зона металимниона заканчивалась на 11 м (рис. 1). Прозрачность по белому диску Секки составила 5,5 м.

Содержание кислорода изменялось от 7,9 у поверхности до 0 мг/л у дна. Начиная с 6 м глубины наблюдается резкое снижение концентрации кислорода. Зона оксиклина простирается до 15 м, после этой глубины в толще воды до дна растворенный кислород отсутствует (рис. 2).

В оз. Ю. Волос температура воды изменялась от 23,1 у поверхности до 4,7 °С у дна, была несколько ниже, чем в соседнем озере, особенно в придонном слое, где разница достигала 2 °С. Эпилимнион занимал верхний четырехметровый слой воды, зона металимниона заканчивалась на 11 м (рис. 3). Прозрачность по белому диску Секки составила 7,0 м, на полтора метра больше, чем в оз. С. Волос.

Характер распределения растворенного кислорода в воде значительно отличался от наблюдаемого в оз. С. Волос. Содержание кислорода изменялось от 8,1 у поверхности до 2,5 мг/л у дна. В зоне металимниона наблюдается рост концентрации кислорода до 14,3 мг/л, что характерно и для некоторых других мезотрофных озер Беларуси. Зона оксиклина начинается с 8 и заканчивается на 15 м, после наблюдается постепенное снижение концентрации ко дну (рис. 4).

Таким образом, исследованные озера отличаются по изученным параметрам среды обитания. Наибольшие различия наблюдаются по прозрачности воды и вертикальному распределению содержания кислорода в водной толще.

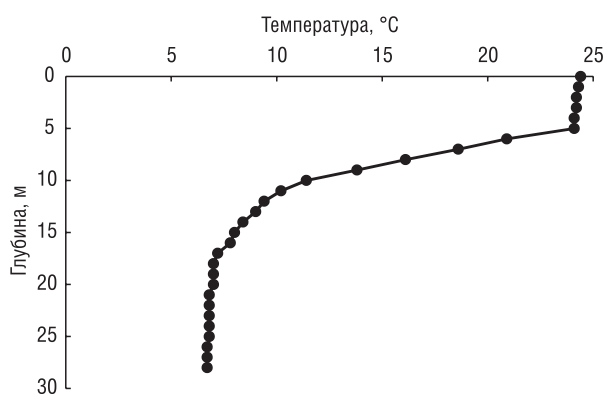


Рис. 1. Изменение температуры в толще воды оз. С. Волос

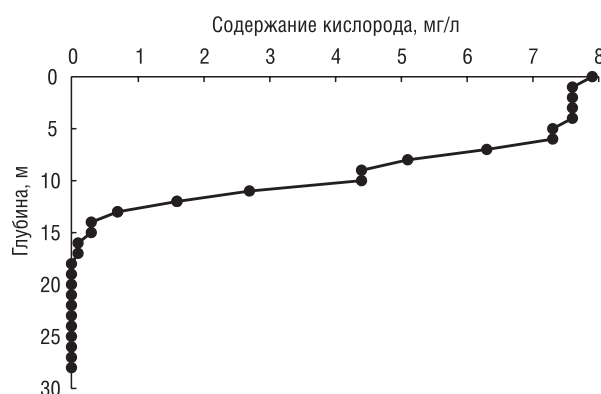


Рис. 2. Изменение содержания кислорода в толще воды оз. С. Волос

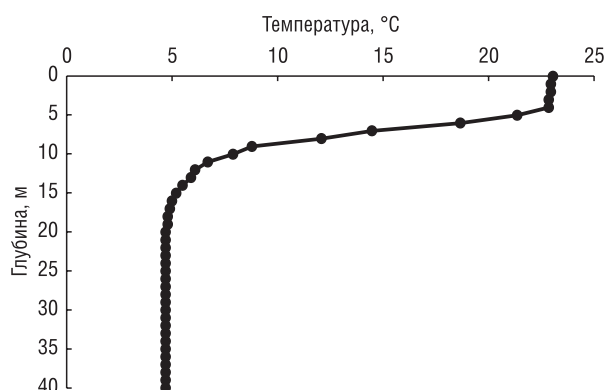


Рис. 3. Изменение температуры (°C) в толще воды оз. Ю. Волос



Рис. 4. Изменение содержания кислорода в толще воды оз. Ю. Волос

Видовой состав озер Южный Волос и Северный Волос. В составе донной фауны обследованных водоемов зарегистрировано 39 видов и форм, относящиеся к 3 типам: членистоногие, кольчатые черви и моллюски, систематическая принадлежность которых представлена в таблице.

Зообентос оз. С. Волос представлен 20 определяемыми видами (не определены до вида представители Сорерода, Olygochaeta, Odonata, куколки Chironominae, Trichoptera). По таксономическому составу зообентос представлен на 58 % из хирономид, 13 % – циклопов, по 5 % – амфипод и моллюсков, по 4 % – кольчатые черви и высшие раки и 10 % – другие таксоны (личинки жуков, куколки, ручейники, личинки стрекоз, мокрецы и пиявки). Если не учитывать придонных крупных видов копепод, относящихся к зоопланктону, то соотношение групп будет следующим: 67 % – хирономиды, 6 % – амфиподы, по 5 % - моллюсков, олигохет, высших раков, пиявок, мокрецов и ручейников, 3 % – стрекозы, куколки хирономид и личинки жуков.

Таксономическая структура зообентоса озер С. Волос и Ю. Волос

Номер таксона	Таксоны	Северный Волос	Южный Волос
	Тип Mollusca Класс Gastropoda Cuvier, 1797 Отряд Caenogastropoda Семейство Viviparidae		
1	<i>Viviparus viviparus</i> Linnaeus, 1758	+	
	Отряд Basommatophora Семейство Planorbidae		
2	<i>Planorbarius corneus</i> Linnaeus, 1758	+	+
	Семейство Lymnaeidae		
3	<i>Lymnaea stagnalis</i> Linnaeus, 1758		+
	Класс Bivalvia Linnaeus, 1758 Отряд: Veneroida Семейство: Dreissenidae		
4	<i>Dreissena polymorpha</i> Pallas, 1771	+	+
	Семейство Sphaeriidae		
5	<i>Pisidium conventus</i> Clessin, 1877		+
	Тип Arthropoda Класс Malacostraca Latreille, 1802 Отряд Amphipoda Семейство Gammaridae		
6	<i>Pallasiopsis quadrispinosa</i> Sars, 1867	+	+
	Семейство Pontoporeiidae		
7	<i>Monoporeia affinis</i> Lindström, 1885		+
	Отряд Isopoda Latreille, 1817 Семейство Asellidae		
8	<i>Asellus aquaticus</i> Linnaeus, 1758	+	+

Номер таксона	Таксоны	Северный Волос	Южный Волос
9	Класс Hexanauplia Oakley, Wolfe, Lindgren & Zaharof, 2013 Подкласс Соперода Milne Edwards, 1840	+	+
	Класс Insecta Linnaeus, 1758 Отряд Coleoptera Linnaeus, 1758 Семейство Haliplidae		
10	<i>Halipilus sp. Latreille, 1802</i>	+	+
11	Отряд Diptera Linnaeus, 1758 Семейство Ceratopogonidae Grassi, 1900	+	
	Семейство Chironomidae Подсемейство Chironominae		
12	<i>Chironomus gr. plumosus</i> Meigen, 1830	+	+
13	<i>Microtendipes pedellus</i> De Geer, 1776	+	+
14	<i>Tanytarsus medius</i> Reiss et Fittkau, 1971	+	+
15	<i>Dicrotendipes nervosus</i> Staeger, 1839	+	+
16	<i>Sergentia gr. longivenstris</i> Kieffer, 1924		+
17	<i>Tanytarsus pseudolestagei</i> Shilova, 1976		+
18	<i>Kiefferulus tendipediformis</i> Goetghebuer, 1921		+
19	<i>Cryptochironomus obreptans</i> Walker, 1856		+
20	<i>Glyptotendipes varipes</i> Goetghebuer, 1927		+
21	<i>Einfeldia pagana</i> Meigen, 1838		+
22	<i>Pseudochironomus prasinatus</i> Staeger, 1839		+
23	<i>Demicroptochironomus vulneratus</i> Zetterstedt, 1838	+	+
24	Подсемейство: Tanypodinae		
	<i>Derotanypus sp.</i>	+	
25	<i>Procladius sp.</i>	+	+
26	Подсемейство: Orthocladinae		
	<i>Synorthocladus semivirines</i> Kieffer, 1909	+	+
27	<i>Psectrocladius bisetus</i> Goetghebuer, 1942	+	
28	<i>Paracladius sp.</i>		+
29	<i>Orthocladus sp.</i>		+
	Подсемейство: Prodiamesinae		
30	<i>Monodiamesa bathyphila</i> Kieffer, 1918	+	+
	Подсемейство: Diamesinae		
31	<i>Protanypus pseudomorio</i> Makarchenko, 1982		+
32	<i>Diamesa sp.</i>		+
33	Отряд Odonata Fabricius, 1792 Семейство Coenagrionidae	+	+
34	Отряд Trichoptera Семейство Brachycentridae	+	
	Семейство Leptoceridae		
35	<i>Leptocerus teneiformis</i> Curtis, 1834	+	
36	<i>Mystacides longicornis</i> Linnaeus, 1758	+	
	Семейство Polycentropodidae		
37	<i>Cyrnus trimaculatus</i> Curtis, 1834	+	
	Семейство Limnephilidae		
38	<i>Limnephilus fuscinervis</i> Zetterstedt, 1840	+	
39	Тип Annelida Класс Clitellata Michaelsen, 1919 Подкласс Oligochaeta sp.	+	+
Всего:		20 (25)	27 (30)

В зообентосе оз. Ю. Волос определено 27 видов (не определены только представители Copepoda, Oligochaeta и куколки Chironominae). Зообентос представлен следующими группами: 46 % – хирономиды, 21 % – моллюски, 14 % – копеподы, 9 % – высшие раки, 5 % – амфиподы, куколки хирономид, личинки жуков, олигохеты. Без учета копепод, которые относятся к зоопланктону, процентное отношение таксонов выглядит следующим образом: 54 % – хирономиды, 25 % – моллюски, 11 % высшие раки, 5 % – амфиподы, олигохеты, личинки жуков и куколки хирономид.

В основной своей массе донная фауна обоих водоемов схожа, однако существуют и небольшие различия. По видовому составу зообентос оз. Ю. Волос богаче, если в оз. С. Волос было определено из 25 таксонов до 20 видов, то в оз. Ю. Волос из 30 – 27. Наибольшим количеством семейств в оз. Ю. Волос представлены хирономиды – 5. В оз. С. Волос – 4 семейства хирономид и 4 семейства ручейников. Ручейники были обнаружены только в оз. С. Волос. Моллюски в оз. Ю. Волос были представлены 4 семействами, а в оз. С. Волос – 3, только в оз. Ю. Волос было семейство *Lymnaeidae*. Большинство семейств являются общими для обоих водоемов, однако ручейники встречались только в оз. С. Волос.

Наиболее широко представленной систематической группой для двух водоемов было семейство *Chironomidae*. В данном семействе доминировало подсемейство *Chironominae*, которое было представлено 12 и 5 видами, для озер Ю. Волос и С. Волос соответственно. Общими видами для озер являются 5 видов: *Chironomus gr. plumosus*, *Microtendipes pedellus*, *Tanytarsus medius*, *Dicortendipes nervosus* и *Demicriptochironomus vulneratus*. Только в оз. Ю. Волос были обнаружены следующие виды: *Sergentia gr. longivenstris*, *Tanytarsus pseudoestagei*, *Kiefferulus tendipediformis*, *Cryptochironomus obreptans*, *Glyptotendipes varipes*, *Einfeldia pagana*, *Pseudochironomus prasinatus*, которые были немногочисленны.

Относительно видового состава моллюсков, то из 4 определенных семейств три являются общими для водоемов, а семейство *Lymnaeidae* (*Lymnaea stagnalis*) было определено только в оз. Ю. Волос. Стоит заметить, что инвазивный представитель семейства *Dreissenidae* (*Dreissena polymorpha*) был представлен в двух исследуемых водоемах [7].

Из реликтовых видов, занесенных в Красную книгу Беларуси, *Pallasiopsis quadrispinosa* найден в обоих озерах. *Monoporeia affinis* обитает только в профундали оз. Ю. Волос при низкой температуре. Известная в оз. Ю. Волос реликтовая мизиды не встречалась в дночерпательных сборах из-за активного избегания таких орудий лова в светлое время суток. Был обнаружен редкий вид моллюсков *Pisidium conventus*, присутствующий в глубоководных сборах [8].

Изменение видового состава зообентоса на разных глубинах озер С. Волос и Ю. Волос. В оз. С. Волос таксономическое разнообразие (от вида и выше) изменялось в зависимости от глубины отбора проб от 7 до 19 м. Максимальное число представителей зообентоса было обнаружено на глубине 5 м, а наименьшее число – на глубине 28 м (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что количество таксонов увеличивается от 1 до глубины 5 м, где было найдено максимальное количество таксонов – 76 %, встреченных в оз. С. Волос. С глубины 5 и до 10 м идет резкое падение доли до 36 %. Начиная с 10 м и до максимальной глубины количество таксонов снижается постепенно, а на максимальной глубине составляет только 28 % от общего их числа. Снижение скоррелировано с температурой и количеством растворенного кислорода.

Необходимо отметить, что в данном водоеме только на глубине 10 м был обнаружен реликтовый вид *Pallasiopsis quadrispinosa*, на остальных станциях данный вид не обнаружен. На всех глубинах основным доминирующим таксоном являлись представители подсемейства *Chironominae* (*Chironomus gr. plumosus*

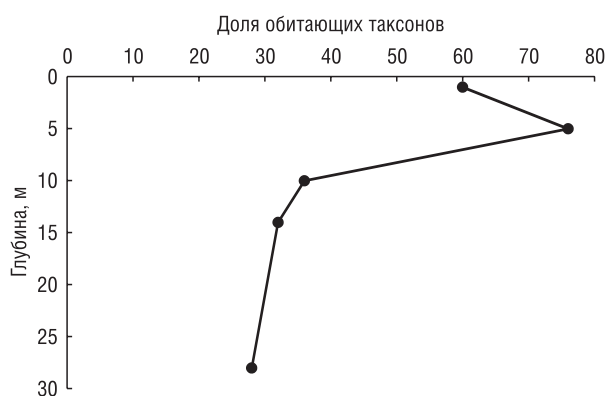


Рис. 5. Изменение таксономического разнообразия зообентоса с глубиной в оз. С. Волос

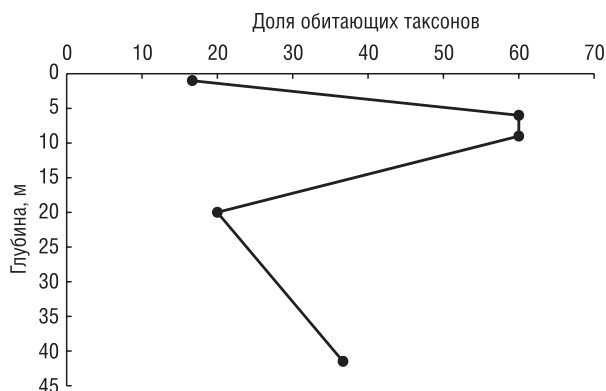


Рис. 6. Изменение таксономического разнообразия зообентоса с глубиной в оз. Ю. Волос

и *Tanytarsus medius*). Процентное соотношение данного подсемейства по отношению к остальным таксонам колебалось от 17,65 до 33,95 %.

В оз. Ю. Волос таксономическое обилие зообентоса на станциях было представлено 13 семействами и изменялось от 6 до 18 таксонов от вида и выше. Максимальное число обнаружено на глубине 9 и 6 м, а минимальное – на глубине 1 м.

Распределение по глубинам в оз. Ю. Волос также было неравномерным (рис. 6). Количество таксонов от глубины 1 до 6 м резко увеличивается и составляет 60 % от общих таксонов, встречаемых в данном водоеме, и на глубине 9 м данный показатель остается неизменным.

Максимум совпадает с зоной термоклина и погруженной высшей водной растительностью (рдест и водный мох). Далее к глубине 20 м наблюдается менее выраженное, чем в соседнем озере, но достаточно резкое снижение разнообразия до 20 %. В отличие от оз. С. Волос к максимальной глубине наблюдается опять рост количества видов.

Необходимо отметить, что если в оз. С. Волос семейство хирономида составляет основу видового разнообразия и преобладает на всех глубинах, то в оз. Ю. Волос это проявляется только на глубине 9 м. По-видимому, это связано с тем, что в оз. Ю. Волос обитают еще три вида реликтовых ракообразных, которые могут влиять на разнообразие зообентоса путем хищничества или конкуренции за пищевые объекты, особенно на станциях с достаточной глубиной при низкой температуре воды. *Pallasiopsis quadrispinosa* в этом озере единично встречается с глубины 9 м, *Monoporeia affinis* имеет максимум на глубине 20 м. Согласно литературным данным, для *Monoporeia affinis* как бентосного вида «одним из наиболее важных факторов для распределения являются эдафические условия» [9]. Основной компонент рациона этих животных – богатые органикой тонкодисперсные илы. В оз. Южный Волос максимальная численность животных ранее была отмечена на глубине 15 м, в зоне материкового склона, где и происходит накопление такого ила глубже зоны подводной растительности, нижняя граница распространения которой была около 11 м. Смещение максимума плотности этого вида в наших сборах до 20 м, возможно, обусловлено тем, что начиная с 1980-х годов за счет заселения водоема моллюском дрейсеней и ее фильтрующей деятельности наблюдается увеличение прозрачности. Вероятно, это привело к смещению зоны растительности и максимума осадконакопления на большую глубину. Известно, что реликтовая мизиды также предпочитает профундаль [9].

Заключение. Таким образом, для озер Северный Волос и Южный Волос определен видовой состав бентосных организмов. В составе донной фауны обследованных водоемов зарегистрировано 39 видов и форм, относящихся к 3 типам: членистоногие, кольчатые черви и моллюски (Arthropoda, Annelida, Mollusca). В составе зообентоса в оз. Ю. Волос было определено 27 видов, в оз. С. Волос – 20. Число таксонов при одинаковом количестве станций было выше в менее трофном оз. Ю. Волос, имеющем большую прозрачность и высокое содержание кислорода в гипolimнионе. Наиболее встречаемыми в обоих озерах были личинки хирономид, в оз. Ю. Волос было обнаружено и определено 19 видов, а в оз. С. Волос только 10 видов.

По индексу сходства Жаккара, который составил 39,47 %, можно констатировать, что несмотря на имеющуюся возможность обмена фауной через протоку, видовой состав мало схож и озера различаются по составу зообентоса.

В составе зообентоса оз. Ю. Волос зарегистрировано 2 вида реликтовых ракообразных: бокоплав Палласа и понтопорей. Несмотря на соединяющую озера протоку и сток из оз. Ю. Волос, что способствует обмену фауной, в оз. С. Волос встречается только один реликтовый вид (бокоплав Палласа). Понтопорей как более оксифильный и стенотермно холодолюбивый вид из-за недостатка кислорода не заселяет профундаль этого водоема.

Общее количество видов и состав зообентоса изменяется с глубиной. Кривые распределения видов по глубинам в исследованных озерах имеют свои особенности. В обоих озерах идет рост разнообразия от литорали к зоне температурного скачка, где наблюдается максимум. Но максимальное количество таксонов приурочено в оз. С. Волос к его началу, а в оз. Ю. Волос наибольшее разнообразие наблюдается на всем его протяжении. В профундали оз. С. Волос идет постепенное обеднение фауны, что, вероятно, обусловлено недостатком кислорода. В оз. Ю. Волос при благоприятном кислородном режиме к максимальным глубинам возрастает количество населяемых таксонов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией гидробиологии, члену-корреспонденту НАН Беларуси В.П. Семенченко за ценные советы и замечания при написании статьи. Работа частично поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (грант №Б18МС-16).

Список использованных источников

1. Качалова, О.Л. Отряд ручейники Trichoptera / О.Л. Качалова, Л.А. Кутикова, Я.И. Старобогатов // Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – С. 477–510.
2. Лукин, Е.И. Класс пиявки Hirudinea / Е.И. Лукин, Л.А. Кутикова, Я.И. Старобогатов // Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – С. 201–212.
3. Макарченко, Е.А. Семейство комары звонцы Chironomidae / Е.А. Макарченко, С.Я. Цалохин // Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 4. – СПб, 1999. – С. 210–296.
4. Попова А.Н. Отряд стрекозы Odonata / А.Н. Попова, Л.А. Кутикова, Я.И. Старобогатов // Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – С. 266–287.
5. World Register of Marine Species taxon tree // WoRMS [Electronic resource]. – Mode of access: [http:// www.marinespecies.org/index.php](http://www.marinespecies.org/index.php). Date of access: 22.02.2014.
6. Блакітная кніга Беларусі: Энцыклапедыя. Рэдкал.: Н.Ф. Дзісько [і інш.]. – Минск: БелЭн, 1994. – 415 с.
7. Черная книга инвазивных видов животных Беларуси / сост.: А.В. Алехнович [и др.]; под общ. ред. В.П. Семенченко. – Минск: Беларус. навука, 2016. – 105 с.
8. Лаенко, Т.М. Фауна водных моллюсков Беларуси / Т.М. Лаенко. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 128 с.
9. Суценья, Л.М. Биология и продукция ледниковых реликтовых ракообразных / Л.М. Суценья, В.П. Семенченко, В.В. Вежновец. – Минск, 1986.

Поступила 11.09.2019

Harry Smit¹, David Tempelman²¹Naturalis Biodiversity Center, P. O. Box 9517, 2300 RA Leiden, Netherlands, e-mail: harry.smit@naturalis.nl²Soembawastraat 25 F, 1095 VV Amsterdam, Netherlands, e-mail: davidtempelman67@gmail.com

A CHECKLIST OF THE WATER MITES FROM BELARUS (ACARI: HYDRACHNIDIA)

A checklist is presented of all water mites species recorded from Belarus. This checklist contains old data from the literature as well as new data from several recent visits of the authors to Belarus. The following 14 water mite species are reported new for the fauna of Belarus: *Acercopsis pistillifer*, *Arrenurus berolinensis*, *Arrenurus latus*, *Arrenurus perforatus*, *Arrenurus tricuspikator*, *Barbaxonella angulata*, *Eylais rimosa*, *Hydrodroma pilosa*, *Limnesia curvipalpis*, *Limnesia undulatooides*, *Mideopsis roztoczensis*, *Mixobates processifer*, *Parathyas pachystoma* and *Piona laminata*. The checklist includes a number of very rare species, seldom found in Europe, i.e. *Atractides pavesii*, *Barbaxonella angulata* and *Arrenurus berolinensis*. Two species, i.e. *Atractides albaruthenicus* and *A. svislucensis* are (near) endemic for Belarus. The checklist tallies 185 species recorded in Belarus, in 19 families and 40 genera. It is expected that this number will increase when more research is done, especially in spring. Many spring species are absent from the end of May onwards. Moreover, more research will increase the number of rare and very rare species.

Keywords: Water Mites, genera, species, families, faunaГарри Смит¹, Дэвид Темпельман²¹Цэнтр біаразнаафарызіа, П. О. Вох 9517, 2300 РА Лейден, Нідэрланды, e-mail: harry.smit@naturalis.nl²Soembawastraat 25 F, 1095 VV Амстэрдам, Нідэрланды e-mail: davidtempelman67@gmail.com

ПЕРЕЧЕНЬ ВОДЯНЫХ КЛЕЩЕЙ БЕЛАРУСИ (ACARI: HYDRACHNIDIA)

Представлен перечень всех видов водяных клещей, зарегистрированных в Беларуси. Этот перечень содержит как литературные данные, так и новые, полученные в результате нескольких недавних визитов авторов в Беларусь. 14 видов водяных клещей выявлены для фауны Беларуси впервые: *Acercopsis pistillifer*, *Arrenurus berolinensis*, *Arrenurus latus*, *Arrenurus perforatus*, *Arrenurus tricuspikator*, *Barbaxonella angulata*, *Eylais rimosa*, *Hydrodroma pilosa*, *Limnesia curvipalpis*, *Limnesia undulatooides*, *Mideopsis roztoczensis*, *Mixobates processifer*, *Parathyas pachystoma* и *Piona laminata*. Перечень включает в себя ряд очень редких видов, нечасто встречающихся в Европе, таких как *Atractides pavesii*, *Barbaxonella angulata* и *Arrenurus berolinensis*. Два вида *Atractides albaruthenicus* и *A. svislucensis* являются почти эндемичными для Беларуси. Всего перечень насчитывает 185 видов, зарегистрированных в Беларуси, входящих в 19 семейств и 40 родов. Можно предположить, что это число увеличится, когда будет проведено больше исследований, особенно в весеннее время. Многие весенние виды отсутствуют в конце мая. Более того, в результате большего числа исследований возрастет количество редких и очень редких видов.

Ключевые слова: водяные клещи, род, семейство, вид, фаунаГары Сміт¹, Дэвід Тэмпельман²¹Цэнтр біаразнастайнасці, П. О. Вох 9517, 2300 РА, Лейдэн, Нідэрланды, e-mail: harry.smit@naturalis.nl²Soembawastraat 25 F, 1095 VV, Амстэрдам, Нідэрланды, e-mail: davidtempelman67@gmail.com

ПЕРАЛІК ВАДЗЯНЫХ КЛЯШЧОЎ БЕЛАРУСІ (ACARI: HYDRACHNIDIA)

У артыкуле паведамляецца пра 14 новых відаў вадзяных кляшчоў для фаўны Беларусі: *Acercopsis pistillifer*, *Arrenurus berolinensis*, *Arrenurus latus*, *Arrenurus perforatus*, *Arrenurus tricuspikator*, *Barbaxonella angulata*, *Eylais rimosa*, *Hydrodroma pilosa*, *Limnesia curvipalpis*, *Limnesia undulatooides*, *Mideopsis roztoczensis*, *Mixobates processifer*, *Parathyas pachystoma* і *Piona laminata*. У пераліку прыводзяцца звесткі аб 185 відах, адзначаных у Беларусі.

Ключавыя словы: вадзяныя кляшчы, род, сямейства, від, фаўна

Introduction. The study of the water mites in Belarus is of recent origin. Koplan-Diks & Stravinskaja (1980) were the first to publish a number of water mites from Belarussian lakes. However, most publications are from Polish acarologists, especially those of Biesiadka and co-workers (see reference list).

This checklist is compiled from the literature and collections by the authors in Berezinsky Biosphere Reserve and Narochansky National Park (2015), the Prypyat River and its surroundings (1998–2000,

2016) and the Belovezhskaya Pushcha National Park (2017). The checklist tallies 185 species. Very likely more species can be found when collecting is done earlier in the year. Many spring species are absent from the end of May onwards.

Methods and materials. All material is lodged in the Naturalis Biodiversity Center (Leiden). The systematics of Di Sabatino et al. (2007), Davids et al. (2010) and Gerecke et al. (2016) is followed. The following abbreviations are used: asl = above sea level; NP = National Park. When only two references were known for a species, additional records are presented.

Systematic part

Family Hydrachnidae

Excluded as species incertae: *Hydrachna inermis* Piersig, 1895.

***Hydrachna comosa* Koenike, 1896**

Biesiadka et al. 1998: 205 [10].

***Hydrachna conjecta* Koenike, 1895**

Biesiadka et al. 2004a: 147 [5].

***Hydrachna crassipalpis* Piersig, 1897**

Biesiadka et al. 1998: 205 [10]. Syn.: *Hydrachna bivirgulata* Piersig, 1897: Biesiadka et al. 2004a: 147 [5].

***Hydrachna cruenta* Müller, 1776**

Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2004a: 147 [5].

***Hydrachna geographica* Müller, 1776**

Biesiadka et al. 2004a: 147 [5].

***Hydrachna globosa* (De Geer, 1778)**

Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 147 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

Syn.: *Hydrachna gallica* Thor, 1916: Biesiadka et al. 2004a: 147 [5].

***Hydrachna goldfeldi* Thor, 1916**

Biesiadka et al. 1998: 205 [10].

***Hydrachna incognita* (Wainstein, 1976)**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]; Davids et al. 2005 [12].

***Hydrachna leegei* Koenike, 1895**

Biesiadka et al. 2004a: 147 [5].

***Hydrachna processifera* Koenike, 1903**

Biesiadka et al. 2003b: 89 [8].

Family Limnocharidae

***Limnocharis aquatica* (Linnaeus, 1758)**

Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 147 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]; Biesiadka & Cichocka 2001: 74 [4].

Family Eylaidae

Excluded as species incertae: *Eylais emarginata* Piersig, 1899 – Davids et al. (2005).

***Eylais bisinuosa* Piersig, 1899**

Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 147 [5]; Biesiadka & Cichocka 2001: 74 [4].

***Eylais extendens* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2004a: 147 [5]. Syn.: ? *Eylais glubokensis* Udalov, 1907: Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]. *Eylais mosquensis* Croneberg, 1899: Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]. *Eylais mulleri* Koenike, 1897: Mukhin & Moroz 1997: 108 [17]. *Eylais rimosa* Piersig, 1899: Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]. *Eylais soari* Piersig, 1899: Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]. *Eylais undulosa* Koenike, 1897: Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Eylais hamata* Koenike, 1897**

Biesiadka et al. 2001b: 106; Biesiadka et al. 2004a: 147 [5].

***Eylais koenikei* Halbert, 1903**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2].

***Eylais mutila* Koenike, 1897**

Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Eylais relicta* Halbert, 1911**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Eylais rimosa* Piersig, 1899**

New for Belarus

New record. 2/2/0, Lake Olshica, Berezinsky Biosphere Reserve, 9-vii-2015, 54° 51.739 N 28° 23.549 E, alt. 160 m asl.

***Eylais setosa* Koenike, 1897**

Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Eylais tantilla* Koenike, 1897**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Eylais triarcuata* Piersig, 1899**

Biesiadka et al. 2003a: 400 [7].

***Eylais tullgreni* Thor, 1899**

Biesiadka et al. 1998: 205; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

New record. 0/3/0, Swamp near Nekaseck, Narochansky NP, 12-vii-2015, 54° 53.397 N 27° 00.145 E, alt. 170 m asl.

Family Hydrodromidae

***Hydrodroma despiciens* (Müller, 1776)**

Koplan-Dix & Stravinskaja 1980: 95 [15]; Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]. *Diplodontus despiciens* Müller, 1776: Mukhin & Moroz 1997: 109 [17].

New records. 1/0, Lake Lyadskoe, Belovezhskaya Pushcha NP, 8-vi-2017, 52° 37.726 N 23° 51.583 E, alt. 155 m asl; 4/0, Canal N of Kliepacy, Belovezhskaya Pushcha NP, 9-vi-2017, 52° 45.006 N 24° 24.027 E, alt. 162 m asl.

Remarks. All previous records were a mixture of *H. despiciens* and *H. pilosa*, the records presented here are the first records of *H. despiciens*.

***Hydrodroma pilosa* Besseling, 1940**

New for Belarus

New records. 2/0, Lake Plavno, Berezinsky Biosphere Reserve, 8-vii-2015, 54° 48.552 N 28° 25.431 E, alt. 164 m asl; 1/0, Lake Manets, Berezinsky Biosphere Reserve, 8-vii-2015, 54° 46.590 N 28° 22.329 E, alt. 165 m a.s.l.; 8/0, Lake Olshica, Berezinsky Biosphere Reserve, 9-vii-2015, 54° 51.739 N 28° 23.549 E, alt. 160 m asl; 1/0, River Berezina, Berezinsky Biosphere Reserve, 9-vii-2015, 54° 46.356 N 28° 12.788 E, alt. 161 m asl; 1/0, Blue Lake, Narochansky NP, 11-vii-2015, 54° 57.907 N 26° 22.634 E, alt. 161 m asl; 0/1, River Naratsjanka, Narochansky NP, 14-vii-2015, 54° 46.280 N 26° 51.436 E, alt. 173 m asl; 1/0, Oxbow pond near bridge road R88, Turov, 5-vi-2016, 52° 04.355 N 27° 49.530 E; 3/0, Branch of Prypyat River, Turov, 5-vi-2016, 52° 04.565 N 27° 43.825 E; 3/0, Lake Zabok, 7-vi-2016, 52° 06.568 N 28° 11.802 E; 1/0, Lake near River Sluch, 10-vi-2016; 52° 14.095 N 27° 33.311 E, alt. 112 m; 6/0, Small lake near Soligorsk, 11-vi-2016, 52° 44.798 N 27° 28.825 E, alt. 144 m asl; 2/0, Fish pond near Voitov Most, Belovezhskaya Pushcha NP, 5-vi-2017, 52° 50.542 N 24° 15.646 E, alt. 164 m asl.

Remark. Not separated from *H. despiciens* in the past, so previous records of the latter species refer to both species.

***Hydrodroma torrenticola* (Walter, 1908)**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

Family Hydryphantidae

Excluded as *species incerta: Hydryphantes bayeri* Písařovic, 1896 – Di Sabatino et al. (2010).

***Hydryphantes crassipalpis* Koenike, 1914**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6].

***Hydryphantes dispar* (Von Schaub, 1888)**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

New records. 1/0, Lake Olshica, Berezinsky Biosphere Reserve, 9-vii-2015, 54° 51.739 N 28° 23.549 E, alt. 160 m asl; 1/0, Lake Lyadskoe, Belovezhskaya Pushcha NP, 8-vi-2017, 52° 37.726 N 23° 51.583 E, alt. 155 m asl.

***Hydryphantes octoporus* Koenike, 1896**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]. Syn.: *Hydryphantes thoni* Piersig, 1900: Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Hydryphantes placationis* Thon, 1899**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Hydryphantes planus* Thon, 1899**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Hydryphantes ruber* (De Geer, 1778)**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Hydryphantes tenuipalpis* Thon, 1899**

Biesiadka et al. 1998: 205 [10].

***Paninus michaeli* Koenike, 1896**

Khmeleva et al. 1994: 80 [14]; Nesterovich 1996: 81 [18].

***Parathyas pachystoma* (Koenike, 1914)**

New for Belarus

New record. Forest pond with *Hottonia*, Belovezhskaya Pushcha NP, 9-vi-2017, 52° 44.588 N 24° 15.718 E, alt. 199 m asl.

***Parathyas rivalis* (Koenike, 1912)**

Khmeleva et al. 1994: 80 [14]; Nesterovich 1996: 81 [18].

***Thyopsis cancellata* (Protz, 1896)**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

Family Spermantidae

***Sperchon clupeifer* Piersig, 1896**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

New record. 1/1/0, Ruzhanka stream, Belovezhskaya Pushcha NP, 6-vi-2017, 52° 53.359 N 24° 52.228 E, alt. 140 asl.

***Sperchon compactilis* Koenike, 1911**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Sperchon glandulosus* Koenike, 1886**

Nesterovich 1996: 81 [18].

***Sperchon papillosus* Thor, 1901**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Sperchon resupinus* Viets, 1922**

Khmeleva et al. 1994: 80 [14]; Nesterovich 1996: 81 [18]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Sperchon setiger* Thor, 1898**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

Sperchon squamosus

Khmeleva et al. 1994: 80 [14]; Nesterovich 1996: 81 [18]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

Sperchon thienemanni

Khmeleva et al. 1994: 80 [14]; Nesterovich 1996: 81 [18]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Sperchonopsis verrucosa* (Protz, 1896)**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

New record. 0/1/0, River Stracha, near Olshevo, Narochansky NP, 11-vii-2015, 54° 57.093 N 26° 22.114 E, alt. 175 m asl.

Family Teutoniidae

***Teutonia cometes* (Koch, 1837)**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

Family Lebertiidae

Excluded as *species incerta*: *Lebertia dresdensis* Viets, 1928; *Lebertia pulchella* Viets, 1925 – Gerecke (2009).***Lebertia crenophila* Viets, 1920**

Khmeleva et al. 1994: 80 [14]; Nesterovich 1996: 81 [18].

***Lebertia dubia* Thor, 1899**

Biesiadka & Cichocka 2001: 74 [4].

***Lebertia fimbriata* Thor, 1899**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

Lebertia glabra* Thor, 1897**Syn.: *Lebertia lineata* Thor, 1906; Nesterovich 1996: 81 [14]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].Lebertia holsatica* Viets, 1920**

Khmeleva et al. 1994: 80 [14]; Nesterovich 1996: 81 [18].

Lebertia inaequalis* (Koch, 1837)**Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]. Syn.: *Lebertia exuta* Koenike, 1908; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].Lebertia insignis* Neuman, 1880**

Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]; Biesiadka & Cichocka 2001: 74 [4].

Lebertia glabra* Thor, 1897**Syn.: *Lebertia lineata* Thor, 1906; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].Lebertia oblonga* Koenike, 1911**Syn.: *Lebertia shadini* Sokolow, 1940; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].***Lebertia oudemansi* Koenike, 1898**Syn.: *Lebertia tschernowskii* Sokolov, 1930; Nesterovich 1996: 81 [18].***Lebertia pilosa* Maglio, 1924**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Lebertia porosa* Thor, 1900**Biesiadka et al. 2001b: 106 [3]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]. Syn.: *Lebertia violacea* Viets, 1921; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

New records. 0/1/0, Lake Myadel, Narochansky NP, 12-vii-2015, 54° 55.688 N 25° 54.259 E, alt. 165 m asl; 6/3/0, Lake Myastro, near Hiriny, 12-vii-2015, 54° 53.185 N 26° 53.900 E, alt. 164 m asl; 6/2/0, Lake Beloe, 10-vi-2016, 52° 22.334 N 26° 38.559 E, alt. 143 m asl.

Remark. *Lebertia porosa* is found usually in lowland streams. Lake Beloe is a nutrient-poor lake.***Lebertia rivulorum* Viets, 1933**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Lebertia sefvei* Walter, 1911**

Khmeleva et al. 1994: 80 [14]; Nesterovich 1996: 81 [18].

Lebertia stigmatifera

Khmeleva et al. 1994: 80 [14]; Nesterovich 1996: 81 [18].

Family Oxidae

***Oxus longisetus* (Berlese, 1885)**

Biesiadka et al. 2002: 34 [6].

***Oxus musculus* (Müller, 1776)**

Koplan-Dix & Stravinskaja 1980: 94 [15]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Oxus nodigerus* Koenike, 1898**

Mukhin & Moroz 1997: 109 [17].

***Oxus ovalis* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Oxus strigatus* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

New record. 1/0, Lake Olshica, Berezinsky Biosphere Reserve, 9-vii-2015, 54° 51.739 N 28° 23.549 E, alt. 160 m asl.

Family Torrenticolidae

***Torrenticola amplexa* (Koenike, 1908)**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka & Cichocka 2001: 74 [4].

New records. 1/1/0, Small stream, Narochansky NP, 11-vii-2015, 54° 57.496 N 26° 22.644 E, alt. 182 m asl; 6/10/1, River Stracha, near Olshevo, Narochansky NP, 11-vii-2015, 54° 57.093 N 26° 22.114 E, alt. 175 m asl.

Family Limnesiidae

***Limnesia connata* Koenike, 1895**

Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Limnesia curvipalpis* Tuzovskij, 1997**

New for Belarus

New records. 0/2/0, Lake Plavno, Berezinsky Biosphere Reserve, 8-vii-2015, 54° 48.552 N 28° 25.431 E, alt. 164 m asl; 1/0/0, Lake Manets, Berezinsky Biosphere Reserve, 8-vii-2015, 54° 46.590 N 28° 22.329 E, alt. 165 m a.s.l.; 0/2/0, Small lake near Soligorsk, 11-vi-2016, 52° 44.798 N 27° 28.825 E, alt. 144 m asl.

***Limnesia fulgida* Koch, 1836**

Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Limnesia koenikei* Piersig, 1894**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka & Cichocka 2001: 74 [4].

***Limnesia maculata* (Müller, 1776)**

Koplan-Dix & Stravinskaja 1980: 95 [15]; Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Limnesia polonica* Schechtel, 1910**

Mukhin & Moroz 1997: 109 [17]; Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Limnesia undulata* (Müller, 1776)**

Koplan-Dix & Stravinskaja 1980: 94 [15]; Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]; Biesiadka & Cichocka 2001: 74 [4].

New records. 3/2/0, Lake Naroch, Narochansky NP, 10-vii-2015, 54° 54.384 N 26° 42.445 E, alt. 169 m asl; 0/1/0, Lake Myadel, Narochansky NP, 12-vii-2015, 54° 55.688 N 25° 54.259 E, alt. 165 m asl; 2/2/0, Oxbow pond near bridge road R88, Turov, 5-vi-2016, 52° 04.355 N 27° 49.530 E; 1/1/0, Small lake SE of Lyaskavichy, S of Prypyat River, 6-vi-2016, 52° 06.568 N 28° 11.802 E.

Remark. In the past not separated from *Limnesia undulatooides*.

***Limnesia undulatooides* Davids, 1997**

New for Belarus

New record. Lake Naroch, Narochansky NP, 10-vii-2015, 54° 54.384 N 26° 42.445 E, alt. 169 m asl.

Family Hygrobatidae

Excluded as *species incerta*: *Hygrobates porrectus* Koenike, 1908 – Gerecke et al.(2016).

***Atractides distans* (Viets, 1914)**

Biesiadka & Cichocka 2001: 74 [4].

New record. 0/2/0, River Naratsjanka, Narochansky NP, 14-vii-2015, 54° 46.280 N 26° 51.436 E, alt. 173 m asl.

***Atractides fonticolus* (Viets, 1920)**

Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

***Atractides albaruthenicus* Cichocka & Biesiadka, 2013**

Cichocka & Biesiadka 2013: 254 [11]. Syn.: *Atractides nodipalpis* – err., non Thor, 1899: Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

New record. 13/18/0, River Pulva, W of Dabrovolia, Belovezhskaya Pushcha NP, 7-vi-2017, 52° 21.948 N 23° 22.345 E, alt. 152 m asl.

Remark. Cichocka & Biesiadka (2013) reported the species from the River Svisloč only, and here a second location is reported.

***Atractides ovalis* Koenike, 1883**

Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka & Cichocka 2001: 74 [4].

New records. 0/1/0, Pripjat lake, 1-vi-1999, 52° 1.466 N, 27° 33.137 E; 0/1/0, Lake Myastro, near Hiriny, 12-vii-2015, 54° 53.185 N 26° 53.900 E, alt. 164 m asl; 1/1/0, River Narevka, 8-vi-2017, 52° 40.523 N 23° 56.305 E, alt. 149 m asl.

***Atractides nodipalpis* (Thor, 1899)**

Biesiadka et al. 2001b: 106 [3].

New records. 0/1/0, River Berezina, Berezinsky Biosphere Reserve, 9-vii-2015, 54° 46.356 N 28° 12.788 E, alt. 161 m asl; 22/22/3, River Stracha, near Olshevo, Narochansky NP, 11-vii-2015, 54° 57.093 N 26° 22.114 E, alt. 175 m asl.

***Atractides pavesii* Maglio, 1905**

Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

***Atractides svislucensis* Cichocka & Biesiadka, 2013**

Cichocka & Biesiadka 2013: 258 [11]. Syn. *Atractides spinipes* – err. non Koch, 1837: Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

***Hygrobates calliger* Piersig, 1896**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

New record. 2/5/0, River Stracha, near Olshevo, Narochansky NP, 11-vii-2015, 54° 57.093 N 26° 22.114 E, alt. 175 m asl.

***Hygrobates fluviatilis* (Ström, 1768)**

Biesiadka et al. 2001b: 106 [3]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Hygrobates longipalpis* (Hermann, 1804)**

Biesiadka et al. 2001b: 106 [3]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]; Biesiadka & Cichocka 2001: 74 [4].

***Hygrobates longiporus* Thor, 1898**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Hygrobates nigromaculatus* Lebert, 1879**

Koplan-Dix & Stravinskaja 1980: 94 [15]; Biesiadka et al. 2001b: 106 [3]; Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Hygrobates norvegicus* (Thor, 1897)**

Khmeleva et al. 1994: 80 [14]; Nesterovich 1996: 81 [18].

***Hygrobates trigonicus* Koenike, 1896**

Biesiadka et al. 2004a: 148 [5].

***Mixobates processifer* (Thor, 1905)**

New for Belarus

New record. 1/0/0, River Stracha, near Olshevo, Narochansky NP, 11-vii-2015, 54° 57.093 N 26° 22.114 E, alt. 175 m asl.

Family Unionicolidae

***Neumania deltooides* (Piersig, 1894)**

Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7].

***Neumania imitata* Koenike, 1908**

Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]; Biesiadka & Cichocka 2001: 75 [4].

- Neumania limosa* (Koch, 1836)**
Nesterovich 1996: 81 [18]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Neumania papillosa* (Soar, 1902)**
Biesiadka et al. 2001b: 106 [3].
- Neumania vernalis* (Müller, 1776)**
Koplan-Dix & Stravinskaja 1980: 95 [15]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Unionicola aculeata* (Koenike, 1890)**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Unionicola crassipes* (Müller, 1776)**
Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Unionicola gracilipalpis* (Viets, 1908)**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Unionicola figuralis* (Koch, 1836)**
Biesiadka et al. 2003a: 400 [7].
- Unionicola inusitata* Koenike, 1914**
Biesiadka et al. 2001b: 106 [3]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Unionicola minor* (Soar, 1900)**
Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]; Biesiadka & Cichocka 2001: 75 [4].
- Unionicola parvipora* Lundblad, 1920**
Biesiadka et al. 1998: 205 [10].
Family Pionidae
- Acercopsis pistillifer* (Koenike, 1908)**
New for Belarus
New record. 0/3/0, Alnus-carr, Belovezhskaya Pushcha NP, 9-vi-2017, 52° 44.660 N 24° 15.613 E, alt. 170 m asl.
- Forelia brevipes* (Neuman, 1880)**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Forelia liliacea* (Müller, 1776)**
Koplan-Dix & Stravinskaja 1980: 95 [15]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7].
- Forelia spatulifera* (Marucci, 1907)**
Biesiadka & Cichocka 2001: 75 [4].
- Forelia variegator* (Koch, 1837)**
Biesiadka et al. 2001b: 106 [3]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Hydrochoreutes krameri* Piersig, 1896**
Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Piona alpicola* (Neuman, 1880)**
Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Piona carnea* (Koch, 1836)**
Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8].
- Piona clavicornis* (Müller, 1776)**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Piona coccinea* (Koch, 1836)**
Koplan-Dix & Stravinskaja 1980: 94 [15]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Piona conglobata* (Koch, 1836)**
Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Piona disparilis* (Koenike, 1895)**
Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Piona dispersa* Sokolow, 1926**
Nesterovich 1996: 81 [18]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2].
- Piona imminuta* (Piersig, 1897)**
Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Piona laminata* (Thor, 1900)**
New for Belarus
New records. 0/1/0, Forest stream with *Calla*, Jekaterina Forest, Prov. Homiel, 8-vi-2016, 52° 00.205 N 27° 51.318 E, alt. 129 m asl; 0/1/0, Hottonia-ditch, Belovezhskaya Pushcha NP, 5-vi-2017, 52° 50.479 N 24° 11.391 E, alt. 147 m asl.
- Piona longipalpis* (Krendowskij, 1878)**
Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Piona neumani* (Koenike, 1883)**
Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Piona nodata* (Müller, 1776)**
Mukhin & Moroz 1997: 109 [17]; Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Piona obturbans* (Piersig, 1896)**
Biesiadka et al. 2003a: 400 [7].
New records. 0/1/0, Small lake near Soligorsk, 11-vi-2016, 52° 44.798 N 27° 28.825 E, alt. 144 m asl; 3/8/0, Hottonia-ditch, Belovezhskaya Pushcha NP, 8-vi-2017, 52° 37.366 N 23° 51.592 E, alt. 178 m asl.

- Piona pusilla* (Neuman, 1875)**
Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Piona rotundoides* (Thor, 1897)**
Koplan-Dix & Stravinskaja 1980: 95 [15].
New records. 0/1/0, Lake Myastro, near Hiriny, 12-vii-2015, 54° 53.185 N 26° 53.900 E, alt. 164 m asl; 0/2/0, Lake Beloe, 10-vi-2016, 52° 22.334 N 26° 38.559 E, alt. 143 m asl.
- Piona stjordalensis* (Thor, 1897)**
Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 (laps.: *P. stjurdalensis*) [9].
- Piona variabilis* (Koch, 1836)**
Mukhin & Moroz 1997: 109 [17]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Pionacercus uncinatus* (Koenike, 1885)**
Biesiadka et al. 1998: 205 [10].
- Pionides ensifer* Koenike, 1895**
Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Pionopsis lutescens* (Hermann, 1804)**
Mukhin & Moroz 1997: 109 [17]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Tiphys bullatus* (Thor, 1899)**
Mukhin & Moroz 1997: 109 [17]; Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Tiphys latipes* (Müller, 1776)**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]. Syn.: *Acercus latipes* (Müller, 1776): Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].
- Tiphys scaurus* (Koenike, 1892)**
Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]. *Acercus scaurus* (Koenike, 1892): Mukhin & Moroz 1997: 109 [17].
- Tiphys torris* (Müller, 1776)**
Biesiadka et al. 2003b: 90 [8].
Family Wettinidae
- Wettina podagrica* (Koch, 1837)**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
Family Aturidae
- Albia stationis* Thon, 1899**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Aturus scaber* Kramer, 1875**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
New record. 0/1/0, River Stracha, near Olshevo, Narochansky NP, 11-vii-2015, 54° 57.093 N 26° 22.114 E, alt. 175 m asl.
- Axonopsis complanata* (Müller, 1776)**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Barbaxonella angulata* (Viets, 1955)**
New for Belarus
New record. 1/1/0, River Stracha, near Olshevo, Narochansky NP, 11-vii-2015, 54° 57.093 N 26° 22.114 E, alt. 175 m asl.
- Brachypoda versicolor* (Müller, 1776)**
Biesiadka et al. 2003a: 400 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Hexaxonopsis serrata* (Walter, 1928)**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Parabrachypoda modesta* (Koenike, 1911)**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
- Parabrachypoda montii* (Maglio, 1924)**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
Family Mideidae
- Midea orbiculata* (Müller, 1776)**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
New record. 0/1/0, Hottonia-ditch, Belovezhskaya Pushcha NP, 8-vi-2017, 52° 37.366 N 23° 51.592 E, alt. 178 m asl.
Family Mideopsidae
- Mideopsis crassipes* Soar, 1904**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]; Biesiadka & Cichocka 2001: 75 [4].
- Mideopsis orbicularis* (Müller, 1776)**
Koplan-Dix & Stravinskaja 1980: 94 [15]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2001b: 106 [3]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]; Biesiadka & Cichocka 2001: 75 [4].
- Mideopsis roztoczensis* Biesiadka & Kowalik, 1979**
New for Belarus
New record. 0/1/0, River Berezina, Berezinsky Biosphere Reserve, 9-vii-2015, 54° 46.356 N 28° 12.788 E, alt. 161 m asl.
- Xystonotus willmanni* Viets, 1920**
Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].
Family Arrenuridae
- Arrenurus affinis* Koenike, 1887**
Biesiadka et al. 2003a: 401 [7].
- Arrenurus albator* (Müller, 1776)**
Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 401 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

***Arrenurus batillifer* Koenike, 1896**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

***Arrenurus berolinensis* Protz, 1896**

New for Belarus

New record. 1/0/0, Swamp near River Narev, Belovezhskaya Pushcha National park, 9-vi-2017, 52° 44.987 N 24° 17.134 E, alt. 159 m asl.

Remarks. *Arrenurus berolinensis* is a very rare species. It was described originally from an area near Berlin (Protz 1896), and subsequently reported from Eastern Prussia, nowadays Kaliningrad (Viets 1911), the Netherland (Smit et al. 2007) and Turkey (Aşçi et al. 2014).

***Arrenurus bicuspikator* Berlese, 1885**

Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 401 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

***Arrenurus bifidicodulus* Piersig, 1897**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

***Arrenurus biscissus* Lebert, 1879**

Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

***Arrenurus bisulcicodulus* Piersig, 1892**

Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

New records. 1/0/0, Sedge pond along Serguch River, Berezinsky Biosphere Reserve, 8-vii-2015, 54° 08.635 N 28° 15.764 E, alt. 171 m asl; 3/0/0, Alnus-carr, Belovezhskaya Pushcha NP, 9-vi-2017, 52° 44.660 N 24° 15.613 E, alt. 170 m asl.

***Arrenurus bruzelii* Koenike, 1885**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 401 [7]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

Remark. All our specimens are coloured reddish-brown, while in western Europe they are green.

***Arrenurus buccinator* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Arrenurus claviger* Koenike, 1885**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Arrenurus compactus* Piersig, 1894**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Arrenurus conicus* Piersig, 1894**

Khmeleva et al. 1994: 80 [14]; Nesterovich 1996: 81 [18].

***Arrenurus crassicaudatus* Kramer, 1875**

Koplan-Dix & Stravinskaja 1980: 94 [15]; Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 401 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Arrenurus cuspidifer* Piersig, 1894**

Biesiadka et al. 2003a: 401 [7].

***Arrenurus cuspidator* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

***Arrenurus cylindratus* Piersig, 1896**

Nesterovich 1996: 81 [18].

***Arrenurus fimbriatus* Koenike, 1885**

Biesiadka et al. 2002: 34 [6].

New record. 1/0/0, Small lake near Soligorsk, 11-vi-2016, 52° 44.798 N 27° 28.825 E, alt. 144 m asl.

***Arrenurus forpicatus* Neuman, 1880**

Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

New record. 1/0/0, Lake Omezja, Narochansky NP, 11-vii-2015, 54° 57.205 N 26° 22.737 E, alt. 164 m asl.

***Arrenurus globator* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003a: 401 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Arrenurus inexploratus* Viets, 1930**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 149 [5].

***Arrenurus integrator* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 150 [5].

***Arrenurus knauthi* Koenike, 1895**

Biesiadka et al. 2004a: 150 [5].

New record. Reedland near Lake Lubanskoje, 11-vi-2016, 52° 52.622 N 28° 00.677 E, alt. 139 m asl.

***Arrenurus latus* Barrois & Moniez, 1887**

New for Belarus

New record. 0/4/0, Lake Plavno, Berezinsky Biosphere Reserve, 8-vii-2015, 54° 48.552 N 28° 25.431 E, alt. 164 m asl; 0/1/0, Lake Zabok, 7-vi-2016, 52° 06.085 N 28° 16.508 E, alt. 114 m asl.

***Arrenurus maculator* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2003b: 90 [8]; Biesiadka et al. 2004a: 150 [5].

***Arrenurus neumani* Piersig, 1895**

Biesiadka et al. 2003a: 401 [7]; Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2004a: 150 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Arrenurus nodosus* Koenike, 1896**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 401 [7].

***Arrenurus papillator* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2004a: 150 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Arrenurus perforatus* George, 1881**

New for Belarus

New record. 0/2/0, Small lake SE of Lyaskavichi, S of Prypyat River, 6-vi-2016, 52° 06.568 N 28° 11.802 E.

***Arrenurus pugionifer* Koenike, 1908**

Biesiadka et al. 2004a: 150 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Arrenurus pustulator* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 401 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 150 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Arrenurus radiatus* Piersig, 1894**

Biesiadka et al. 2004a: 150 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

***Arrenurus sinuator* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2003a: 401 [7]; Biesiadka et al. 2004a: 150 [5]; Biesiadka & Cichocka 2001: 75 [4].

***Arrenurus stecki* Koenike, 1894**

Biesiadka et al. 1998: 205 [10]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6].

New records. 1/0/0, Lake Muertvoe, Narochansky NP, 11-vii-2015, 54° 57.948 N 26° 22.455 E, alt. 161 m asl; 1/0/0, Beaver pond along road H9201, E of Myadzyed, Narochansky NP, 12-vii-2015, 54° 52.755 N 26° 59.133 E, alt. 170 m asl; 0/3/0, Forest stream with *Calla*, Jekaterina Forest, province Homiel, 8-vi-2016, 52° 00.205 N 27° 51.318 E, alt. 129 m asl.

***Arrenurus tetracyphus* Piersig, 1894**

Biesiadka et al. 2003b: 90 [8].

New record. 6/0/0, Pripyat lake, 20-vi-1998, 52° 02.623 N, 27° 24.323 E; 1/0, Pripyat lake, 25-vi-2000, 52° 2.417 N 27° 24.669 E; 1/0, Pripyat lake, 24-vi-2000, 52° 2.624 N, 27° 24.330 E.

***Arrenurus tricuspikator* (Müller, 1776)**

New for Belarus.

New records. 1/0/0, Lake Plavno, Berezinsky Biosphere Reserve, 8-vii-2015, 54° 48.552 N 28° 25.431 E, alt. 164 m asl; 2/2/0, River Buzianka, Berezinsky Biosphere Reserve, 8-vii-2015, 54° 44.344 N 28° 19.999 E, alt. 161 m asl; 1/0/0, Lake Olshica, Berezinsky Biosphere Reserve, 9-vii-2015, 54° 51.739 N 28° 23.549 E, alt. 160 m asl; 1/11/0, Small lake SE of Lysaskavichy, S of Prypyat River, 6-vi-2016, 52° 06.568 N 28° 11.802 E.

***Arrenurus truncatellus* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2004a: 150 [5].

***Arrenurus tubulator* (Müller, 1776)**

Biesiadka et al. 2001a: 111 [2]; Biesiadka et al. 2002: 34 [6]; Biesiadka et al. 2004a: 150 [5]; Biesiadka et al. 2004b: 87 [9]; Biesiadka & Cichocka 2001: 75 [4].

***Arrenurus virens* Neuman, 1880**

Biesiadka et al. 2004b: 87 [9].

New records. 2/0/0, Lake Manets, Berezinsky Biosphere Reserve, 8-vii-2015, 54° 46.590 N 28° 22.329 E, alt. 165 m a.s.l.; 5/3/0, Beaver pond along road H9201, E of Myadzyed, Narochansky NP, 12-vii-2015, 54° 52.755 N 26° 59.133 E, alt. 170 m asl; 1/6/0, Swamp near Nekaseck, Narochansky NP, 12-vii-2015, 54° 53.397 N 27° 00.145 E, alt. 170 m a.s.l.; 1/9/0, Pool near Simonovichskaya Rudnyov, 8-vi-2016, 51° 55.388 N 28° 07.392 E, alt. 129 m asl.

Acknowledgments. We are indebted to Dr Oleg Maslovsky, Anastasia Levkovich, Irina Sysoi and Yuri Podrez (Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk) for the excellent organisation of our excursions in Belarus.

References

1. Aşçi F., Akın A., Boyacı Y. Ö. The first record for watermite *Arrenurus berolinensis* from Turkey (*Acari: Hydrachnidia*) // Journal of Fisheries Sciences, 2014, vol. 8, no. 2), pp. 92–94.
2. Biesiadka E., Tikhotska M., Moroz M. D., Mukhin Y. D. [Ecological and faunistic characteristic of water mites (*Acari: Hydracarina*) of the landscape reserve “Zvanets” // Natural Resources, 20015, no. 4, pp. 109–114 (in Russian).
3. Biesiadka E., Cichocka M., Moroz M. [Preliminary results of the investigation of aquatic mites (*Acari: Hydracarina*) in the Berezinski Biosphere reserve park]. Vyestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Byelarusi. Syeryya Biyalahichnykh Navuk, 20016, no. 4, pp. 105–107 (in Russian).
4. Biesiadka E., Cichocka M. *Hydracarina* – wodopójki. In: Gutowskiego J. M. & Jaroszewicka B., Catalogue of the fauna of Bialowieza Primeval Forest, 20014, pp. 74–75. Instytut Badawczy Leśnictwa, Warszawa.
5. Biesiadka E., Cichocka M., Moroz M. D. Water mites (*Hydrachnidia*) from the Neman River (Belarus), some of its tributaries and riverine reservoirs. Fragmenta Faunistica, 2004a, no. 7(2), pp. 143–164.
6. Biesiadka E., Cichocka M., Moroz M., Muchin J. [Fauna of water mites (*Acari: Hydracarina*) of the biological reserve Sporovskij]. Vestnik Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Seriya 2 Khimiya Biologiya Geografiya, 2002, no. 3, pp. 32–36, 104 (in Russian).
7. Biesiadka E., Cichocka M., Moroz M. Vodnye klešči (*Acari, Hydracarina*) ozer Berezinskogo Biosfernogo Zapovednika. (w:) Ozernye Ekosystemy: Biologiceskie proceessy, antropogennaja transformacija, kacestwo vody. Materialy II Medunarodnoj Naucnoj Konferencii 22-26.IX.2003, Minsk – Naroc, 2003a, pp. 399–402 (in Russian).
8. Biesiadka E., Cichocka M., Moroz M., Muchin J. [New species of water mites fauna (*Acari: Hydracarina*) in Belarus]. Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta, 2003b, s. II, no. 2, pp. 89–91 (in Russian).
9. Biesiadka E., Cichocka M., Moroz M. D. [Water mites (*Acari: Hydracarina*) of the projected reseeves “Bystrica”, “Vileity”, “Dretunski” and : Golubickaja Pushcha”]. Natural Resources, 2004b, no. 2, pp. 85–89 (in Russian).
10. Biesiadka E., Thihomka M., Moroz M. D. [Preliminary studies of water mites of Belarussian Polesie]. Abstracts of the International Scientific Conference “Actual Problems of Investigation, Use and Protection of the Natural Complexes of Polesye”, Minsk, 23––5 September 1998 / The National Academy of Sciences of Belarus, the State Committee on Science and Technology of the Republic of Belarus, the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, the Academy of Agrarian Sciences, the Belarussian State University. Minsk, 1998, pp. 205 (in Russian).

11. *Cichocka M., Biesiadka E.* Two new species of the genus *Atractides* Koch, 1837 (Acari: Hydrachnidia, Hygrobatidae) from Belarus. *Zootaxa*, 2013, vol. 3608, pp. 253–263.
12. *Dauids K., Di Sabatino A., Gerecke R., Gledhill T., Smit H.* On the taxonomy of water mites (Acari: Hydrachnidia) described from the Palaearctic, part 1: Hydrachnidae, Limnocharidae and Eylaidae. *Zootaxa*, 2005, vol. 1061, pp. 36–64.
13. *Gerecke, R.* Revisional studies on the European species of the water mite genus *Lebertia* Neuman, 1880 (Acari: Hydrachnidia: Lebertiidae). *Abhandlungen der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung*, 2009, vol. 566, pp. 1–144.
14. *Khmeleva N., Nesterovich A., Czachorowski S.* The macroinvertebrate fauna of some Byelorussian, Karelian, and Altaian springs and its relation with certain factors. *Acta Hydrobiol.*, 1994, vol. 36 (1), p. 75–90.
15. *Koplan-Diks J. S. & Stravinskaja E. A.* [Anthropogenic impact on small lakes]. Leningrad: Nauka, 1980, 173 pp. (in Russian).
16. *Kowalik W., Biesiadka E., Moroz M. D., Stryjecki R.* Fauna of water mites (Hydrachnidia) in Polish and Belorussian parts of the Polesie Region. *Acta Agrophysica*, 2002, vol. 68, pp. 89–95.
17. *Muhkin Y. F., Moroz M. D.* [Water mites (Hydracarina, Acari) inhabiting the Stviga flood plain land]. *Vestsi Akademii Nauk Byelarusi Seryya Biyalahichnykh Navuk*, 1997, no. 1, pp. 108–109 (in Russian).
18. *Nesterovich A.* Studies of the fauna of Belarusian springs. *Crunoecia*, 1998, vol. 5, pp. 79–85.
19. *Protz A.* Beiträge zur Kenntnis der Wassermilben. *Zoologischer Anzeiger*, 1996, vol. 19, pp. 407–411.
20. *Smit H., Didden K., Wiggers R.* The first record of the watermite *Arrenurus berolinensis* from the Netherlands, with the first description of the female (Acari: Hydrachnidia). *Nederlandse Faunistische Mededelingen*, 2007, vol. 26, pp. 39–42.
21. *Viets K.* *Arrenurus berolinensis* Protz ♂. *Schriften der physikalisch-ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg*, 1911, vol. 52, pp. 235–238.

Поступила 02.10.2018

М. Д. Мороз, В. В. Везновец*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам, Минск, Беларусь,
e-mail: mdmoroz@bk.ru, vezhn47@mail.ru***МАКРОЗООБЕНТОС РЕКИ СТВИГИ В ПРЕДЕЛАХ ЗАКАЗНИКА «ОЛЬМАНСКИЕ БОЛОТА»**

Река Ствига представляет собой уникальный водный объект, поскольку является основной водной артерией заказника республиканского значения «Ольманские болота». Выявлено 72 вида гидробионтов, которые относятся к 3 типам водных беспозвоночных животных: Mollusca – 11, Annelida – 2, Arthropoda – 59 видов. Среди найденных водных беспозвоночных более трети оказались новыми и впервые отмечались не только в р. Ствиге, но и в целом в водоемах заказника «Ольманские болота». Это указывает на то, что фауна водных беспозвоночных, обитающих на территории заказника «Ольманские болота», остается все еще недостаточно изученной. Видовой состав макрозообентосного комплекса р. Стви́ги представлен основными таксономическими группами водных беспозвоночных животных, характерными для речных экосистем Беларуси. Отмечено относительно большое видовое обилие личинок из отрядов Plecoptera, Ephemeroptera и Trichoptera. Это указывает в целом на достаточно высокое качество вод в исследованных створах р. Стви́ги. Среди коллектированных представителей макрозообентоса следует отметить находку следующих редких видов для Беларуси: личинок веснянок *Isoptena serricornis* (Pictet, 1841) и *Taeniopteryx nebulosa* (Linnaeus, 1758), а также чужеродного вида – моллюска *Ferrissia fragilis* (Tryon, 1863).

Ключевые слова: таксономическая структура, макрозообентос, видовой состав, фауна, река, редкие виды

M. D. Moroz, V. V. Vezhnavec*Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, Minsk, Belarus,
e-mail: mdmoroz@bk.ru, vezhn47@mail.ru***MACROZOOBENTHOS OF STVIGA RIVER WITHIN THE BOUNDS OF THE WILDLIFE AREA “OLMANSKIYE BOLOTA”**

The Stviga River represents a unique water object as it is the main waterway of the wildlife area of republican value “Olmanskiye bolota”. 72 types of hydrobionts, which fall into 3 types of water invertebrate animals, are revealed: Mollusca – 11; Annelida – 2, Arthropoda – 59 species. Among the revealed water invertebrates, more than a third are new and are for the first time noted not only in the river Stviga, but also in general in reservoirs of the wildlife area “Olmanskiye bolota”. It indicates that the fauna of the water invertebrates living in the territory of the wildlife area “Olmanskiye bolota” remains still studied insufficiently. The revealed specific structure of the macrozoobenthos complex of the Stviga River is presented by the basic taxonomical groups of water invertebrate animals characteristic of the river ecosystems of Belarus. Rather high specific abundance of larvae from Plecoptera, Ephemeroptera and Trichoptera groups is noted. It indicates in general rather high quality of waters in the studied alignments of the Stviga River. Among the animals of macrozoobenthos representatives, it should be noted the find of the following rare species for Belarus – larvae *Isoptena serricornis* (Pictet, 1841) and *Taeniopteryx nebulosa* (Linnaeus, 1758) and also mollusc – *Ferrissia fragilis* (Tryon, 1863).

Keywords: taxonomical structure, macrozoobenthos, specific structure, fauna, river, rare species

М. Д. Мороз, В. В. Везнавец*Навукова-практычны цэнтр Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі па біярэсурсах, Мінск, Беларусь,
e-mail: mdmoroz@bk.ru, vezhn47@mail.ru***МАКРАЗААБЕНТАС РАКІ СЦВІГІ Ў МЕЖАХ ЗАКАЗНІКА «АЛЬМАНСКІЯ БАЛОТЫ»**

Рака Сцві́га ўяўляе сабой унікальны водны аб'ект, паколькі з'яўляецца асноўнай воднай артэрыяй заказніка рэспубліканскага значэння «Альманскія балоты». Выяўлены 72 віды гідрабіёнтаў, якія адносяцца да 3 тыпаў водных бесхрыбетных жывёл: Mollusca – 11; Annelida – 2, Arthropoda – 59. Сярод выяўленых водных беспазваночных больш як трэць аказаліся новымі, і ўпершыню адзначаны не толькі для р. Сцві́гі, але і ўвогуле для вадаёмаў заказніка «Альманскія балоты». Гэта паказвае, што фаўна водных бесхрыбетных, якая жыве на тэрыторыі заказніка «Альманскія балоты», застаецца ўсё яшчэ недастаткова вивучанай. Выяўлены відавы склад макразаабентаснага комплексу р. Сцві́гі, які прадстаўлены асноўнымі таксанамічнымі групамі водных бесхрыбетных жывёл, характэрны для рачных экасістэм Беларусі. Адзначана адносна высокая відавая разнастайнасць лічынак з атрадаў Plecoptera, Ephemeroptera і Trichoptera. Гэта паказвае ў цэлым на дастаткова высокую якасць вод у даследаваных створах р. Сцві́гі. Сярод сабраных прадстаўнікоў макразаабентасу варта адзначыць знаходкі наступных рэдкіх відаў для Беларусі: лічынак вяснянак *Isoptena serricornis* (Pictet, 1841) і *Taeniopteryx nebulosa* (Linnaeus, 1758), а таксама чужароднага віду – малюска *Ferrissia fragilis* (Tryon, 1863).

Ключавыя словы: таксанамічная структура, макразаабентас, відавы склад, фаўна, рака, рэдкія віды

Введение. Река Ствига представляет собой уникальный водный объект, поскольку является основной водной артерией заказника республиканского значения «Ольманские болота». Заказник «Ольманские болота» имеет статус водно-болотного угодья международного значения, трансграничное Рамсарское угодье и ключевой орнитологической территории, имеет статус территории европейской Изумрудной сети. Заказник представляет собой крупнейший комплекс верховых, низинных и переходных болот в Европе, сохранившийся до наших дней.

Река Ствига протекает по Ровенской области Украины, в Брестской и Гомельской областях (Столинский и Житковичский районы) Беларуси. Является правым притоком р. Припять. Общая длина реки 178 км, из них по территории Украины около 66 км, по Беларуси – 112 км. Основные притоки в Беларуси: ручей Плав, канал Бычок (правые), р. Моства (левый).

Площадь бассейна водосбора 5,3 тыс. км², по территории Беларуси – 4,3 тыс. км². Средний расход воды в устье 21,6 м³/сут. Общее падение воды составляет 68,3 м. Средний наклон водной глади составляет 0,4 ‰.

Долина в верховьях трапециевидная, ширина около 0,5–1 км, ниже не выразительная, сливается с соседней местностью. Пойма двухсторонняя, ширина в верховьях и среднем течении 80–200 м, ниже 0,6–1,2 км.

Русло свободно меандрирует, сильно извилистое, разветвленное, встречаются песчаные острова, которые пропадают в половодье. В верховьях канализировано. Ширина реки в нижнем течении 20–30 м. Берега покрыты смешанными лесами с преобладанием лиственных пород, местность заболочена, с песчаными и торфяными почвами [1].

Цель проведенных исследовательских работ – установление таксономической структуры макрозообентоса, выявление редких и значимых видов водных беспозвоночных животных в р. Ствиге.

Материал и методы исследования. Сборы и наблюдения, послужившие материалом для данного сообщения, были проведены в октябре 2018 г. Отбор количественных проб макрозообентоса проведен стандартным гидробиологическим сачком (25×25 см, 500 мкм) в прибрежной зоне, на глубине 0,5–1,0 м. Методика отбора проб и описание створов выполнено согласно Европейскому протоколу AQEM и стандарту ISO 7828. Кроме того, на каменистых грунтах и в местах развития макрофитов производилась выемка камней и коряг с их последующим осмотром и отбором животных. Отобранные пробы с объектами макрозообентоса зафиксированы 70%-ным этиловым спиртом. Камеральная обработка коллектированных образцов осуществлялась в лабораторных условиях.

За время исследований было собрано и проанализировано 5466 экз. представителей макрозообентосного комплекса, находящихся на личиночной и имагинальной стадиях развития. Исследования были проведены в следующих створах:

- 1 – р. Ствига, урочище Перекалье, координаты: 51°52'8.25"N, 27°28'3.64"E;
- 2 – р. Ствига, урочище Колки, координаты: 51°45'54.74"N, 27°27'10.67"E;
- 3 – р. Ствига, погранпереход, у моста, координаты: 51°41'13.9"N, 27°30'0.76"E.

Результаты и их обсуждение. Проведенные исследования позволили выявить таксономическую структуру сообщества макрозообентоса р. Стви́ги. Она представлена 72 видами и формами макрозообентосного комплекса, которые относятся к 3 типам водных беспозвоночных животных: Mollusca – 11, Annelida – 2, Arthropoda – 59 видов и форм (таблица).

Анализ полученного материала свидетельствует о том, что среди выявленных водных беспозвоночных присутствует ряд видов, которые ранее не были обнаружены в р. Ствиге [2–6]. К ним относятся: моллюски – *Marstoniopsis scholtzi* (A. Schmidt, 1856), *Valvata macrostoma* Mörch, 1864, *Radix auricularia* (Linnaeus, 1758), *Radix balthica* (Linnaeus, 1758), *Physa fontinalis* (Linnaeus, 1761), *Ferrissia fragilis* (Tryon, 1863), *Gyraulus albus* (O. F. Müller, 1774), *Planorbis corneus* O. F. Müller, 1774, *Pisidium subtruncatum* Malm, 1855, *Sphaerium corneum* (Linnaeus 1758) и насекомые – *Isoptena serricornis* (Pictet, 1841), *Taeniopteryx nebulosa* (Linnaeus, 1758), *Proclleon bifidum* Bengtsson, 1912, *Caenis horaria* Linnaeus, 1758, *Hydropsyche pellucidula* (Curtis, 1834), *Polycentropus irroratus* Curtis, 1835, *Mystacides niger* (Linnaeus, 1758), *Oecetis furva* (Rambur, 1842), *Oecetis testacea* (Curtis, 1834), *Chaetopteryx villosa* (Fabricius, 1798), *Ithytrichia lamellaris* Eaton, 1873, *Brachycentrus subnubilus*

Таксономическая структура макрозообентоса р. Ствиги

Номер	Таксон, вид	Створы*, экз.			Всего, экз.
		1	2	3	
ТИП MOLLUSCA					
	Класс Gastropoda				
	Отр. Neotaenioglossa				
	Сем. Amnicolidae				
1	<i>Marstoniopsis scholtzi</i> (A. Schmidt, 1856)	1			1
	Отр. Ectobranchia				
	Сем. Valvatidae				
2	<i>Valvata macrostoma</i> Mörch, 1864			7	7
	Отр. Pulmonata				
	Сем. Lymnaeidae				
3	<i>Radix auricularia</i> (Linnaeus, 1758)		1		1
4	<i>Radix balthica</i> (Linnaeus, 1758)			1	1
	Сем. Physidae				
5	<i>Physa fontinalis</i> (Linnaeus, 1761)		1		1
	Сем. Planorbidae				
6	<i>Ferrissia fragilis</i> (Tryon, 1863)			9	9
7	<i>Gyraulus albus</i> (O. F. Müller, 1774)		68	34	102
8	<i>Planorbis corneus</i> O. F. Müller, 1774	1			1
	Класс Bivalvia				
	Отр. Veneroidea				
	Сем. Sphaeriidae				
9	<i>Pisidium subtruncatum</i> Malm, 1855			2	2
10	<i>Pisidium sp.</i>	2	3	3	8
11	<i>Sphaerium corneum</i> (Linnaeus 1758)	4	6		10
ТИП ANNELIDA					
	Класс Oligochaeta				
	Отр. Haplotaxida				
	Сем. Tubificidae				
1	<i>Stylaria lacustris</i> (Linnaeus, 1767)	4			4
2	<i>Oligochaeta gen. spp.</i>		2	2	4
ТИП ARTHROPODA					
	Класс Crustacea				
	Отр. Isopoda				
	Сем. Asellidae				
1	<i>Asellus aquaticus</i> (Linnaeus, 1758)	7	19	2	28
	Класс Arachnida				
	Отр. Trombidiformes				
2	<i>Hydracarina gen. spp.</i>		1	1	2
	Отр. Aranei				
	Сем. Dictynidae				
3	<i>Argyroneta aquatica</i> (Clerck, 1758)	1	2		3
	Сем. Tetragnathidae				
4	<i>Tetragnatha extensa</i> (Linnaeus, 1758)	4	2	1	7
	Сем. Pisauridae				
5	<i>Dolomedes fimbriatus</i> (Clerck, 1757)		1		1
	Класс Insecta				
	Отр. Collembola				
	Сем. Poduridae				

Продолжение таблицы

Номер	Таксон, вид	Створы*, экз.			Всего, экз.
		1	2	3	
6	<i>Podura aquatica</i> Linnaeus, 1758	1	3	1	5
	Отр. Plecoptera				
	Сем. Chloroperlidae				
7	<i>Isoptena serricornis</i> (Pictet, 1841)		1		1
	Сем. Nemouridae				
8	<i>Nemurella</i> sp.			1	1
	Сем. Taeniopterygidae				
9	<i>Taeniopteryx nebulosa</i> (Linnaeus, 1758)	1		1	2
	Отр. Ephemeroptera				
	Сем. Baetidae				
10	<i>Cloeon simile</i> Eaton, 1870	42	34	28	104
11	<i>Proclleon bifidum</i> Bengtsson, 1912	7	5	2	14
	Сем. Heptageniidae				
12	<i>Heptagenia fuscogrisea</i> (Retzius, 1783)	26	7	18	51
13	<i>Heptagenia</i> sp.	498	186	236	920
	Сем. Leptophlebiidae				
14	<i>Leptophlebia marginata</i> (Linnaeus, 1767)	3	3	2	8
15	<i>Leptophlebia</i> sp.	367	108	198	673
	Сем. Caenidae				
16	<i>Caenis horaria</i> Linnaeus, 1758	7	6	3	16
	Отр. Trichoptera				
	Сем. Hydropsychidae				
17	<i>Hydropsyche pellucidula</i> (Curtis, 1834)	6	5	3	14
18	<i>Hydropsyche</i> sp.		8		8
	Сем. Polycentropodinae				
19	<i>Polycentropus irroratus</i> Curtis, 1835		3		3
	Сем. Leptoceridae				
20	<i>Mystacides niger</i> (Linnaeus, 1758)			5	5
21	<i>Mystacides</i> sp.	3			3
22	<i>Oecetis furva</i> (Rambur, 1842)			1	1
23	<i>Oecetis testacea</i> (Curtis, 1834)	2	8	12	22
	Сем. Limnephilidae				
24	<i>Anabolia</i> sp.		1		1
25	<i>Chaetopteryx villosa</i> (Fabricius, 1798)	69	57	98	224
26	<i>Limnephilus rhombicus</i> (Linnaeus, 1758)		12	3	15
	Сем. Hydroptilidae				
27	<i>Agraylea</i> sp.	2	1		3
28	<i>Hydroptila</i> sp.		7		7
29	<i>Ithytrichia lamellaris</i> Eaton, 1873		1	5	6
30	<i>Oxyethira</i> sp.	721	376	192	1289
	Сем. Brachycentridae				
31	<i>Brachycentrus subnubilus</i> Curtis, 1834			3	3
32	<i>Sericostoma personatum</i> (Kirby & Spence, 1826)			1	1
	Отр. Odonata				
	Сем. Calopterygidae				
33	<i>Calopteryx splendens</i> (Harris, 1782)	3	12	16	31
34	<i>Calopteryx</i> sp.	1	2	3	6
	Сем. Coenagrionidae				
35	<i>Coenagrion pulchellum</i> (Vander Linden, 1825)	1	3		4
36	<i>Coenagrion</i> sp.	4			4

Окончание таблицы

Номер	Таксон, вид	Створы*, экз.			Всего, экз.
		1	2	3	
	Сем. Platycnemididae				
37	<i>Platycnemis pennipes</i> (Pallas, 1771)	5	2	11	18
	Сем. Gomphidae				
38	<i>Gomphus vulgatissimus</i> (Linnaeus, 1758)			1	1
	Сем. Corduliidae				
39	<i>Somatochlora metallica</i> Vander Linden, 1825		1		1
	Отр. Heteroptera				
	Сем. Nepidae				
40	<i>Nepa cinerea</i> Linnaeus, 1758		1		1
41	<i>Ranatra linearis</i> (Linnaeus, 1758)		4		4
	Сем. Aphelocheiridae				
42	<i>Aphelocheirus aestivalis</i> (Fabricius, 1794)			1	1
	Сем. Notonectidae				
43	<i>Notonecta glauca</i> Linnaeus, 1758	1	2	9	12
	Сем. Corixidae				
44	<i>Callicorixa praeusta</i> (Fieber, 1848)			1	1
45	<i>Hesperocorixa sahlbergi</i> (Fieber, 1848)		6	6	12
46	<i>Sigara falleni</i> (Fieber, 1848)	2			2
47	<i>Sigara semistriata</i> (Fieber, 1848)		4	2	6
48	<i>Sigara striata</i> (Linnaeus, 1758)		4	2	6
49	<i>Corixidae gen. spp.</i>	2			2
50	<i>Micronecta sp.</i>	2	14	12	28
	Отр. Coleoptera				
	Сем. Dytiscidae				
51	<i>Laccophilus minutus</i> (Linnaeus, 1758)		1		1
52	<i>Dytiscus circumcinctus</i> Ahrens, 1811		1		1
	Сем. Gyrinidae				
53	<i>Gyrinus marinus</i> Gyllenhal, 1808		1		1
	Сем. Elmidae				
54	<i>Oulimnius tuberculatus</i> (Müller, 1806)	5	5	1	11
	Отр. Diptera				
55	<i>Ceratopogonidae gen. spp.</i>	3	2		5
56	<i>Chironomidae gen. spp.</i>	368	384	294	1046
57	<i>Simuliidae gen. spp.</i>	564	78	24	666
58	<i>Tabanidae gen. spp.</i>		2		2
	Отр. Lepidoptera				
	Сем. Crambidae				
59	<i>Cataclysta lemnata</i> (Linnaeus, 1758)		1		1
	Число видов, таксонов	36	52	44	73
	Число экземпляров	2740	1468	1258	5466

Примечание. Створы: 1 – р. Ствига, урочище Перекалье; 2 – р. Ствига, урочище Колки; 3 – р. Ствига, погранпереход, мост.

Curtis, 1834, *Sericostoma personatum* (Kirby & Spence, 1826), *Platycnemis pennipes* (Pallas, 1771), *Gomphus vulgatissimus* (Linnaeus, 1758), *Somatochlora metallica* Vander Linden, 1825, *Aphelocheirus aestivalis* (Fabricius, 1794), *Oulimnius tuberculatus* (Müller, 1806).

Таким образом 28 из 72 видов, что составляет 38,9 % оказались новыми и впервые зарегистрированными не только в р. Ствиге, но и в целом в водоемах заказника «Ольманские болота». Относительно высокая численность ранее не обнаруженных видов макрозообентосных животных указывает на то, что видовой состав фауны водных беспозвоночных, обитающих на этой

территории, остается все еще изученным недостаточно и требует дополнительных исследований и внимания.

Тем не менее, оценивая выявленный видовой состав макрозообентосных организмов в р. Ствиге, в целом позволяет сделать вывод о том, что он относительно богат и представлен основными таксономическими группами водных беспозвоночных животных, которые характерны для речных экосистем Беларуси [7–12]. На всех изученных створах видовое богатство было достаточно стабильным и находилось в пределах 36–52 видов.

Экологическая предрасположенность выявленного комплекса макрозообентосных организмов в р. Ствиге связана с относительно высоким видовым обилием гидробионтов, характерных для чистых вод – личинок из отрядов Plecoptera, Ephemeroptera и Trichoptera. Их было обнаружено 26 видов, что составляет 36,1 % от общего числа выявленных видов. При этом их относительная численность достигала более 2/3 (62,1 %) от всех коллектированных нами представителей макрозообентосного комплекса. Кроме того, необходимо отметить, что и среди некоторых других таксономических групп (отрядов) также были выявлены виды, проявляющие реофильные свойства и служащие индикаторами чистоты воды.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что достаточно высокая численность группировки видов, обладающих реофильными и оксифильными свойствами, является важной экологической характеристикой р. Стви́ги и указывает на достаточно высокое качество вод и ее чистоту в исследованных створах.

Среди выявленных водных беспозвоночных животных следует отметить находку следующих редких видов для Беларуси – личинок веснянок *Isoptena serricornis* (Pictet, 1841) и *Taeniopteryx nebulosa* (Linnaeus, 1758), а также чужеродного вида – моллюска *Ferrissia fragilis* (Tryon, 1863).

В настоящее время известны только две находки *Isoptena serricornis* (сем. Chloroperlidae) в Беларуси – в р. Оболь (д. Погирщино, Шумилинский р-н, Витебская обл.) и р. Исlochь (д. Михалово, Воложинский р-н, Минская обл.). При этом было коллектировано всего 5 личинок этого вида [13]. *I. serricornis* имеет бореальное распространение, ограниченное Средней и Северной Европой (Швеция, Финляндия, Польша, Литва, север европейской части России) [14, 15]. В Беларуси, очевидно, проходит юго-восточная граница ареала этого вида. Личинки являются хищниками, предпочитают обитать в реках и крупных ручьях с песчаным дном, в котором они роют норы. Вылет имаго происходит в мае–июле [16, 17]. Жизненный цикл однолетний. Вид включен в Красный список Польши (категория охраны LC [18]) и Чехии (категория охраны CR [19]).

Taeniopteryx nebulosa (сем. Taeniopterygidae) является менее редким видом в Беларуси, чем предыдущий, однако ее распространение в стране также требует внимания и уточнения. Ранее, южнее Минской возвышенности этот вид в республике не был отмечен [13]. *T. nebulosa* имеет транспалеарктический ареал с бореальным простираем, обитает в Северной и Средней Европе: Кавказ, Турция, север европейской части России, приполярный Урал, Сибирь (Саяны, Алтай, Забайкалье), российский Дальний Восток (Амурская и Хабаровская обл., Приморский край, Камчатка, Сахалин), Монголия, Корея, Китай, Япония [20–22]. Личинки этого вида живут как в крупных реках, так и в небольших ручьях, а на севере Скандинавии встречаются в озерах. Вид считается холодолюбивым [20], тем удивительнее его находка в Полесье. Жизненный цикл однолетний. Вылет имаго в Скандинавии в марте–июле [17], в Великобритании в феврале–марте [23], на Дальнем Востоке в мае–июне [20]. До настоящего времени в Беларуси личинки *T. nebulosa* были коллектированы только в небольших речных экосистемах и ручьях, которые, как правило, связаны с родниковым питанием водоемов [13]. Вид включен в Красный список Польши (категория охраны LC [18]) и Чехии (категория охраны VU [19]).

Естественным ареалом чужеродного вида моллюска *Ferrissia fragilis* (сем. Planorbidae) является Северная Америка. В последнее время вид распространился в пресноводных экосистемах Европы и Восточной Азии [24]. В Беларуси *Ferrissia fragilis* была ранее найдена только в речных портах – г. Микашевичи (канал) и г. Пинске (р. Пина), в водоеме-охладителе Березовской ГРЭС [25, 26]. Очевидно, возможны два пути проникновения *F. fragilis* на территорию Белорусского Полесья – по р. Днепр с территории Украины или из северной и центральной частей Польши,

где он обнаружен в ряде озер и прудов. Моллюск встречается в водоемах самых различных типов, на разных глубинах от 0,2 до 8,0 м. Однако предпочитает стоячие и слабoproточные воды: озера, медленно текущие реки, старицы. Часто регистрируются в водоемах-охладителях электростанций. В водоемах, как правило, локализуются на погруженной растительности и других подходящих предметах. Максимальная численность молоди приходится на конец лета. Находка *Ferrissia fragilis* в р. Ствиге – это новое местообитание этого чужеродного вида.

Таким образом, можно сделать вывод, что р. Ствига является местом обитания ряда значимых видов для Беларуси. С одной стороны, в ней обитают такие редкие для Беларуси и охраняемые в ряде стран Европы виды веснянок, как *Isoptena serricornis* (Pictet, 1841) и *Taeniopteryx nebulosa* (Linnaeus, 1758), а с другой стороны, чужеродный вид – моллюск *Ferrissia fragilis* (Tryon, 1863).

Заключение. Проведенные исследования позволили выявить таксономическую структуру сообщества макрозообентоса р. Стви́ги. Она представлена 72 видами и формами макрозообентосного комплекса, который относится к 3 типам водных беспозвоночных животных: Mollusca – 11, Annelida – 2, Arthropoda – 59 видов и форм.

Среди коллектированных водных беспозвоночных более трети оказались новыми и впервые зарегистрированными не только в р. Ствиге, но и в целом для территории заказника «Ольманские болота». Это указывает на то, что видовой состав фауны водных беспозвоночных, который обитает на территории заказника «Ольманские болота», остается все еще изученным недостаточно и требует дополнительного дальнейшего внимания.

Тем не менее сделан вывод, что выявленный видовой состав макрозообентосного комплекса р. Стви́ги относительно богат и представлен основными таксономическими группами водных беспозвоночных животных, которые в целом характерны для уже изученных речных экосистем Беларуси.

Отмечено относительно высокое видовое обилие гидробионтов, обитающих в чистых водах – личинок из отрядов Plecoptera, Ephemeroptera и Trichoptera. Это является важной экологической характеристикой и указывает на достаточно высокое качество и чистоту вод в исследованных створах р. Стви́ги.

Среди собранных представителей макрозообентоса следует отметить находку следующих редких для Беларуси и охраняемых в ряде стран Европы видов: личинок веснянок *Isoptena serricornis* (Pictet, 1841) и *Taeniopteryx nebulosa* (Linnaeus, 1758), а также чужеродного – моллюска *Ferrissia fragilis* (Tryon, 1863).

Благодарности. Работа выполнена при поддержке проекта международной технической помощи «Создание условий для совместного управления и устойчивого использования природных ресурсов водно-болотного угодья «Трансграничная Рамсарская территория «Ольманы-Перебродье» (контракт №83 265 666, финансируемый ЕС).

Список использованных источников

1. Блакітная кніга Беларусі: Энцыклапедыя: рэдкал. Н. Ф. Дзісько [і інш.] – Минск: БелЭн, 1994. – 415 с.
2. Мороз, М.Д. Фауна водных жесткокрылых (Coleoptera, Adephaga) заказника «Ольманские болота» / М.Д. Мороз, Е. Бесядка // Европа - наш общий дом. – Минск: Белсэнс, 1999. – С. 208.
3. Мороз, М.Д. Водные жесткокрылые (Insecta: Coleoptera) ландшафтного заказника «Ольманские болота» / М.Д. Мороз, Е. Бесядка // Вестн. БГУ. Сер. 2. – 2005. – №2. – С. 72–76.
4. Мороз, М.Д. Эколого-зоогеографическая характеристика водных жесткокрылых (Coleoptera: Hydrophilidae, Hydraenidae) водно-болотного комплекса «Ольманские болота» / М.Д. Мороз, С.К. Рындевич // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. Біял. навук. – 2000. – №2. – С. 119–122.
5. Мороз, М.Д. Водные насекомые (Insecta: Ephemeroptera, Odonata, Plecoptera, Heteroptera, Trichoptera) проектируемого ландшафтного заказника «Ольманские болота» / М.Д. Мороз, С. Чахоровски, К. Левандовски // Природные ресурсы. – 1999. – №3. – С. 111–117.
6. Aquatic insects (Insecta: Coleoptera, Heteroptera) of forest-bog complex «Olmany Wetlands» / M.D. Moroz [et al.] // Disturbance dynamics in Boreal Forest, Kuhmo, Finland. – Kuhmo, 2000. – P. 77.
7. Мороз, М. Водные насекомые (Insecta: Ephemeroptera, Odonata, Heteroptera, Trichoptera) Березинского биосферного заповедника / М. Мороз, С. Чахоровски, К. Левандовски // Parki Narodowe i Rezerwaty Przyrody. – 2001. – Vol. 20, №4. – P. 75–81.

8. Мороз, М.Д. Водные насекомые реки Западная Двина / М.Д. Мороз // Вестн. Витеб. гос. ун-та. – 2012. – №6 (72). – С. 51–56.
9. Мороз, М.Д. Макрозообентос реки Мяделки (Национальный парк «Нарочанский») / М.Д. Мороз, В.В. Вежновец // Природные ресурсы. – 2013. – №1. – С. 82–86.
10. Мороз, М.Д. Водные насекомые трансграничных водотоков между Белоруссией и Украиной / М.Д. Мороз // Энтомологич. обозрение. – 2013. – Т. 92, №2. – С. 303–318.
11. Мороз, М.Д. Водные беспозвоночных рек Случь и Локнея / М.Д. Мороз, Т.М. Лаенко // Вестн. Витеб. гос. ун-та. – 2013. – №5 (77). – С. 76–82.
12. Мороз, М.Д. Водные насекомые (Insecta) рек Гомельской области / М.Д. Мороз, В.П. Семенченко, В.И. Разлуцкий // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. біял. навук. – 2013. – № 2. – С. 91–97.
13. Мороз, М.Д. Каталог поденок (Ephemeroptera), веснянок (Plecoptera) и ручейников (Trichoptera) Беларуси / М.Д. Мороз, Т.П. Липинская. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 315 с.
14. Жильцова, Л.А. Веснянки (Plecoptera) Европейской части СССР (без Кавказа) / Л.А. Жильцова // Энтомологическое обозрение. – 1966. – Т. 45, №3. – С. 525–549.
15. Казлаускас, Р.С. Отряд поденки Ephemeroptera / Р.С. Казлаускас // Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. – Л.: Гидрометеоздат, 1977. – С. 288–303.
16. Жильцова, Л.А. Фауна веснянок (Plecoptera) Ленинградской области / Л.А. Жильцова // Энтомологич. обозрение. – 2000. – Т. 79, №3. – С. 579–584.
17. Lillehammer, A. Stoneflies (Plecoptera) of Fennoscandia and Denmark / A. Lillehammer // Fauna entomologica Scandinavica. – 1988. – Vol. 21. – 165 pp.
18. Fiałkowski, W. Plecoptera Widelnice / W. Fiałkowski, R. Sowa // Czerwona lista zwierząt ginących i zagrożonych w Polsce. – Krakow, 2002. – S. 122–124.
19. Helešic, J. Plecoptera (pošvatky) / J. Helešic, T. Sodan, J. Špaček // Červený seznam ohrožených druhů České republiky: Bezobratlí. Farač J., Král D., Škorpík M. (eds.). – Praha, 2005. – P. 128–131.
20. Жильцова, Л.А. Аннотированный каталог веснянок (Plecoptera) Дальнего Востока / Л.А. Жильцова, И.М. Леванидова // Биология пресных вод Дальнего Востока. – Владивосток, 1984. – С. 18–45.
21. Тесленко, В.А. Фауна и распределение веснянок (Insecta, Plecoptera) в бассейне реки Зея / В.А. Тесленко // Пресноводные экосистемы бассейна реки Амур. – Владивосток, 2008. – Вып. 5. – С. 151–171.
22. Тесленко, В.А. Веснянки (Insecta, Plecoptera) восточных притоков озера Байкал / В.А. Тесленко, Н.В. Базова, Д.В. Матафонов // Евразият. энтомологич. журн. – 2010. – Т. 9, №3. – С. 331–340.
23. Hynes, H.B. N. A key to the adults and nymphs of the British Stoneflies (Plecoptera) with notes on their ecology and distribution / H.B. N. Hynes // Freshwater biological association. – 1977. – № 17. – 92 pp.
24. Son, M. North American freshwater limpet *Ferrissia fragilis* (Tryon, 1863) (Gastropoda: Planorbidae) – a cryptic invader in the Northern Black Sea Region / M. Son // Aquatic Invasions – 2007. – Vol. 2, № 1. – P. 45–54.
25. Semenchenko, V.P. First record of the invasive North American gastropod *Ferrissia fragilis* (Tryon, 1863) from the Pripyat River basin, Belarus / V.P. Semenchenko, N. Laenko // Aquatic Invasions. – 2008 (a). – Vol. 3, Iss. 1. – P. 80–82.
26. Лаенко, Т.М. Фауна водных моллюсков Беларуси / Т.М. Лаенко. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 128 с.

Поступила 27.02.2019

Е. Г. Тюлькова

Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации, Гомель, Беларусь,
e-mail: tut-3@mail.ru

ДЕЙСТВИЕ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ САЖЕНЦЕВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

Изучение влияния группы летучих органических соединений, представителями которых являются некоторые ароматические вещества, на интенсивность функционирования фотосинтетического аппарата растений, с одной стороны, является актуальным в целях сравнительного анализа степени их токсичности при одиночном и совместном воздействии, с другой – малоизученным по сравнению с воздействием оксидов азота, углерода, серы, аммиака, сероводорода. В этой связи цель работы – изучение характера изменения содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов, а также показателей фотохимической активности фотосинтетического аппарата древесных растений (на примере саженцев липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. и клена остролистного *Acer platanoides* L.) в задаваемых условиях эксперимента при воздействии различных доз *o*-ксилола и бенз(а)пирена. Результаты эксперимента по обработке листовых пластинок саженцев древесных растений городской среды ароматическими углеводородами свидетельствуют о том, что при воздействии *o*-ксилола на листовые пластинки исследуемых древесных саженцев выявлено наибольшее снижение содержания хлорофилла *a* и *b* через одни сутки у липы мелколистной, а у клена остролистного – каротиноидов. Использование бенз(а)пирена обусловило максимальное снижение количества хлорофилла *a* и каротиноидов через трое суток у липы мелколистной, а у клена остролистного – хлорофилла *b* через одни сутки опыта. В целом растворы *o*-ксилола и бенз(а)пирена оказали наибольшее воздействие на изменение содержания пигментов фотосинтеза липы мелколистной и параметров флуоресценции клена остролистного. При этом введение *o*-ксилола обусловило наибольшее снижение величины эффективного квантового выхода и фотохимического тушения флуоресценции через одни сутки у клена остролистного, а бенз(а)пирена – значения нефотохимического тушения флуоресценции.

Ключевые слова: саженцы липы мелколистной *Tilia cordata* Mill., саженцы клена остролистного *Acer platanoides* L., *o*-ксилол, бенз(а)пирен, фотосинтетические пигменты, эффективный квантовый выход, фотохимическое и нефотохимическое тушения

E. G. Tyulkova

Belarusian Trade and Economic University of Consumer Cooperatives, Gomel, Belarus, e-mail: tut-3@mail.ru

THE EFFECT OF AROMATIC HYDROCARBONS ON PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF WOODY PLANTS SAPLINGS

The study of the volatile organic compounds group influence represent some aromatic substances on the intensity of the photosynthetic apparatus plants functioning, on the one hand, is relevant for the purpose of comparative analysis of their toxicity degree at single and combined action, on the other hand understudied compared to the effects of oxides of nitrogen, carbon, sulfur, ammonia, hydrogen sulfide. In this regard, the aim of the work was to study the nature of changes in the content of chlorophylls *a*, *b* and carotenoids, as well as indicators of the woody plants photosynthetic apparatus photochemical activity (at least the seedlings of small-leaved linden *Tilia cordata* Mill. and maple holly *Acer platanoides* L.) under specified experimental conditions under the influence of *o*-xylol and benz(a)pyrene different doses. The results of the experiment on the processing of woody plants seedlings leaf blades in urban environment aromatic hydrocarbons indicate that when exposed to *o*-xylol on the leaf blade studied woody seedlings revealed a decrease in the content of chlorophyll *a* and *b* through one day at small-leaved linden, and maple holly – carotenoids. The use of benz(a)pyrene resulted in a maximum reduction in the number of chlorophyll *a* and carotenoids after three days, the small-leaved linden and maple holly – a chlorophyll *b* through one day experience. In general, solutions of *o*-xylol and benz(a)pyrene had the greatest impact on the change in the content of small-leaved linden photosynthesis pigments and the fluorescence parameters of holly maple. The introduction of *o*-xylol caused the largest decrease in effective quantum output and photochemical quenching of fluorescence after one day at the maple tree, and benz(a)pyrene – values of non-photochemical fluorescence quenching.

Keywords: small-leaved linden *Tilia cordata* Mill. seedlings, maple holly *Acer platanoides* L. seedlings, *o*-xylol, benz(a)pyrene, photosynthetic pigments, effective quantum yield, photochemical quenching, non-photochemical quenching

А. Р. Цюлькова

Беларускі гандлёва-эканамічны ўніверсітэт спажывецкай кааперацыі, Гомель, Беларусь, e-mail: tut-3@mail.ru

ДЗЕЯННЕ АРАМАТЫЧНЫХ ВУГЛЕВАДАРОДАЎ НА ФОТАСІНТЭТЫЧНЫ АПАРАТ САДЖАНЦАЎ ДРАЎНЯНЫХ РАСЛІН

Вывучэнне ўплыву групы лятучых арганічных злучэнняў, прадстаўнікамі якіх з'яўляюцца некаторыя ароматычныя рэчывы, на інтэнсіўнасць функцыянавання фотасінтэтычнага апарату раслін, з аднаго боку, з'яўляецца актуальным у мэтах параўнальнага аналізу ступені іх таксічнасці пры адзіночным і сумесным уздзеянні, з другога боку – малавывучаным пры параўнанні з уздзеяннем аксідаў азоту, вугляроду, серы, аміяку, серавадароду. У гэтай сувязі мэтай працы з'явілася вывучэнне характару змены ўтрымання хларафіла *a*, *b* і караціноідаў, а таксама паказчыкаў фотакхімічнай актыўнасці фотасінтэтычнага апарату драўняных раслін (на прымеры саджанцаў ліпы драбналістай *Tilia cordata* Mill. і клёна вастралістага *Acer platanoides* L.) у зададзеных ўмовах эксперыменту пры ўздзеянні розных доз *o*-ксілола і бенз(а)пірэна. Вынікі эксперыменту па апрацоўцы ліставых пласцінак саджанцаў драўняных раслін гарадскога асяроддзя ароматычнымі вуглевадародамі сведчаць аб тым, што пры ўздзеянні *o*-ксілола на ліставыя пласцінкі доследных драўняных саджанцаў выяўлена найбольшае зніжэнне ўтрымання хларафіла *a* і *b* праз адныя суткі ў ліпы драбналістай, а ў клёна вастралістага – караціноідаў. Выкарыстанне бенз(а)пірэна абумовіла максімальнае зніжэнне колькасці хларафіла *a* і караціноідаў праз тры суткі ў ліпы драбналістай, а ў клёна вастралістага – хларафіла *b* праз адныя суткі вопыту. У цэлым растворы *o*-ксілола і бенз(а)пірэна аказалі найбольшае ўздзеянне на змяненне зместу пігментаў фотасінтэзу ліпы драбналістай і параметраў флуарэсцэнцыі клёна вастралістага. Пры гэтым ўвядзенне *o*-ксілола абумовіла найбольшае зніжэнне велічыні эфектыўнага квантавага выхаду і фотакхімічнага тушэння флуарэсцэнцыі праз адзін дзень у клёна вастралістага, а бенз(а)пірэна – значэння нефотакхімічнага тушэння флуарэсцэнцыі.

Ключавыя словы: саджанцы ліпы драбналістай *Tilia cordata* Mill., саджанцы клёна вастралістага *Acer platanoides* L., *o*-ксілол, бенз(а)пірэн, фотасінтэтычныя пігменты, эфектыўны квантавы выхад, фотакхімічнае і нефотакхімічнае тушэнні

Введение. Известно, что одной из наиболее уязвимых систем растительной клетки при действии различных повреждающих факторов является фотосинтетический аппарат [1–6]. В последние годы в Республике Беларусь наблюдается рост количества стационарных источников и объемов выбросов техногенных элементов и их соединений в атмосферный воздух от стационарных источников по сравнению с мобильными [7]. Для отдельных промышленных предприятий Беларуси характерно наличие в преобладающем количестве в выбросах загрязняющих веществ в атмосферу группы неметановых летучих органических соединений, в результате чего в атмосферу поступают алканы, циклоалканы, непредельные и ароматические углеводороды, спирты, сложные эфиры. Изучение влияния данной группы соединений на интенсивность функционирования фотосинтетического аппарата растений, с одной стороны, является актуальным в целях сравнительного анализа степени их токсичности при одиночном и совместном воздействии [8–15], а с другой – малоизученным по сравнению с воздействием оксидов азота, углерода, серы, аммиака, сероводорода [2, 3, 5, 6, 10]. В этой связи цель работы – изучение характера изменения содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов, а также показателей фотохимической активности фотосинтетического аппарата древесных растений (на примере саженцев липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. и клена остролистного *Acer platanoides* L.) в задаваемых условиях эксперимента при воздействии различных доз *o*-ксілола и бенз(а)пірэна.

Материалы и методы исследования. Выбор саженцев липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. и клена остролистного *Acer platanoides* L. обусловлен тем, что они являются одними из наиболее распространенных представителей древесных растений в городских условиях. Использование *o*-ксілола обусловлено преобладающим количеством этого соединения в выбросах отдельных промышленных предприятий города Гомеля (ОАО «Гомельский завод литья и нормалей») по сравнению с другими загрязняющими веществами. Что касается бенз(а)пірэна, то несмотря на невысокое наличие в выбросах предприятий теплоэнергетики (ТЭЦ-2), его использование в эксперименте связано с высокой токсичностью, способностью в небольших количествах вызывать значительный эффект, недостаточной изученностью эффектов влияния и возможностью проведения сравнительной оценки влияния полициклического ароматического углеводорода и одноядерных ароматических углеводородов (*o*-ксілол) на растительные организмы.

Листовые пластинки древесных саженцев обрабатывали водными растворами углеводов. Размеры используемых доз углеводов рассчитывались исходя из установленных для атмосферного воздуха предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ [16]. В соответствии с нормативами ПДК ксилолов в атмосферном воздухе является 200 мкг/м³; бенз(а)-пирена – 5,0 нг/м³. Для *o*-ксилолола использовали величину максимальной разовой ПДК; для бенз(а)пирена – среднесуточную ПДК [16].

В качестве контроля использовали необработанные растения; экспериментальными явились растения, обработанные водными растворами исследуемых соединений в следующих концентрациях: 0,0002–0,06 мкг/мл *o*-ксилолола; 0,000 005–0,0015 нг/мл бенз(а)пирена.

Обработку листовых пластинок древесных саженцев осуществляли путем опрыскивания водными растворами (по 50 мл водного раствора каждой дозы вводимого соединения). Для определения содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листовых пластинках саженцев древесных растений использовали спектрофотометр Shimadzu UV-2401 PC («Shimadzu», Япония). Содержание пигментов фотосинтеза определяли через одни и трое суток после обработки. Для экстракции фотосинтетических пигментов использовали навески листьев, сырая масса которых составляла 30–40 мг. Экстракцию хлорофиллов и каротиноидов производили 99,5%-ным ацетоном в трех биологических повторностях. Содержание пигментов в экстрактах рассчитывали по уравнениям Ветштейна и Хольма с помощью коэффициентов экстинкции, приведенных в работе [1] для соответствующего растворителя, по формулам:

$$C_a = 9,784D_{662} - 0,99D_{644}, \quad (1)$$

$$C_b = 21,426D_{644} - 4,650D_{662}, \quad (2)$$

$$C_a + C_b = 5,134D_{662} + 20,436D_{644}, \quad (3)$$

$$C_k = 4,695D_{440,5} - 0,268C_{a+b}, \quad (4)$$

где C_a , C_b , C_k – средняя концентрация хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в экстрактах пигментов объектов исследования (мкг/мл); $D_{440,5}$, D_{644} , D_{662} – оптическая плотность при длинах волн 440,5, 644 и 662 нм.

Для пересчета содержания фотосинтетических пигментов на сырую массу использовали массу навесок сырых листьев и объем полученного фильтрата пигментов. Содержание пигментов представлено в мг/г сырой массы.

Для оценки фотохимической активности фотосистемы II использовали метод импульсно-модулированной флуоресцентной спектроскопии (PAM, pulse-amplitude modulated fluorometry), позволяющий проводить прижизненную регистрацию кинетической кривой индукции флуоресценции хлорофилла *a*. Параметры флуоресценции хлорофилла *a* измеряли на флуориметре Dual-PAM 100 («Walz», Германия), согласно методам [17–19]. Листья предварительно адаптировали к темноте в течение 15 мин. Модулированный с низкой частотой (32 Гц) свет (650 нм) очень низкой интенсивности (0,04 мкмоль квант/м²с) возбуждал флуоресценцию, повышая ее минимальный уровень (F_0). Повышение выхода флуоресценции до уровня F_m инициировали включением света (665 нм) высокой интенсивности (3500 мкмоль квант/м²с). Параметры флуоресценции измеряли с использованием актиничного света (120 мкмоль квант/м²с) и рассчитывали по формулам:

$$Y(II) = \frac{F'_m - F}{F'_m}, \quad (5)$$

$$qP = \frac{F'_m - F}{F'_m - F_0}, \quad (6)$$

$$qN = \frac{F_m - F'_m}{F_m - F_0} \quad (7)$$

где F_0 и F'_0 – минимальный уровень флуоресценции хлорофилла *a* в листьях, адаптированных к темноте и свету соответственно; F_m и F'_m – максимальный уровень флуоресценции хлорофилла *a* в листьях, адаптированных к темноте и свету соответственно; F – выход флуоресценции

на фоне действия модулированного и актиничного света; $Y(II)$ – эффективный квантовый выход фотохимических реакций фотосистемы II; qP и qN – фото- и нефотохимические тушения флуоресценции хлорофилла *a* соответственно.

Достоверность различий между содержанием пигментов и параметрами флуоресценции хлорофилла *a* в экспериментальных и контрольных пробах оценивали с помощью дисперсионного анализа. Однофакторный дисперсионный анализ проводился в отношении выборок контрольных и экспериментальных значений содержания пигментов, а также выборок экспериментальных значений содержания пигментов через одни и трое суток после обработки. Математическую обработку цифрового материала выполняли с помощью *Microsoft Excel*.

С целью проведения сравнительной количественной оценки изменений содержания пигментов и параметров флуоресценции хлорофилла *a* древесных саженцев проводили вычисление среднего значения разности изучаемых параметров в начале и конце опыта в экспериментальных образцах при обработке каждым из использованных соединений.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента по обработке углеводородами представлены в табл. 1 и 2.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа свидетельствуют о наличии достоверных различий между выборками контрольных и экспериментальных значений количества пигментов ($F_{\text{фактич}}(1, 6) = 7,85 \div 35,14$ для липы мелколистной *Tilia cordata* Mill.; $F_{\text{фактич}}(1, 6) = 8,22 \div 150,87$ для клена остролистного *Acer platanoides* L.; $F_{\text{критич}}(1, 6) = 5,99$ при $p \leq 0,05$). Исключение составили следующие варианты опыта: у клена остролистного через одни сутки при обработке раствором бенз(а)пирена с концентрацией 0,000 005 нг/мл (каротиноиды) и через трое суток – раствором *o*-ксилола 0,01 мкг/мл (каротиноиды). Таким образом, недостоверные различия между экспериментальными и контрольными пробами были характерны для клена остролистного. Для липы мелколистной недостоверные различия между контролем и экспериментальными пробами отмечены не были.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа выборок, включающих содержание пигментов через одни и трое суток после обработки, также позволили установить достоверность

Т а б л и ц а 1. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента после обработки *o*-ксилолом

Концентрация раствора <i>o</i> -ксилола, мкг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы					
	липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.			клен остролистный <i>Acer platanoides</i> L.		
	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды	хлорофилл <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	каротиноиды
Через одни сутки после обработки						
Контроль	2,44 ± 0,10	0,98 ± 0,05	1,58 ± 0,07	2,79 ± 0,12	1,31 ± 0,05	1,79 ± 0,08
0,0002	1,83 ± 0,05*	0,73 ± 0,04*	1,14 ± 0,05*	2,67 ± 0,10*	1,08 ± 0,02*	1,63 ± 0,05*
0,01	1,81 ± 0,08*	0,73 ± 0,04*	1,12 ± 0,06*	2,62 ± 0,08*	0,96 ± 0,03*	1,26 ± 0,05*
0,02	1,78 ± 0,04*	0,72 ± 0,03*	1,10 ± 0,06*	1,83 ± 0,05*	0,79 ± 0,02*	1,15 ± 0,04*
0,04	1,73 ± 0,06*	0,70 ± 0,02*	1,08 ± 0,04*	1,72 ± 0,04*	0,75 ± 0,04*	1,06 ± 0,03*
0,06	1,65 ± 0,05*	0,71 ± 0,01*	1,05 ± 0,05*	1,51 ± 0,06*	0,62 ± 0,03*	0,96 ± 0,02*
Через трое суток после обработки						
Контроль	3,89 ± 0,10	1,87 ± 0,08	2,47 ± 0,10	2,57 ± 0,10	1,03 ± 0,04	1,86 ± 0,08
0,0002	2,11 ± 0,05*	1,05 ± 0,04*	1,19 ± 0,03*	2,75 ± 0,09*	1,24 ± 0,05*	1,89 ± 0,08*
0,01	2,06 ± 0,06*	0,99 ± 0,04*	1,12 ± 0,04*	2,61 ± 0,08*	1,06 ± 0,04*	1,87 ± 0,07
0,02	2,04 ± 0,08*	0,95 ± 0,03*	1,06 ± 0,04*	2,0 ± 0,07*	0,87 ± 0,03*	1,20 ± 0,05*
0,04	2,01 ± 0,07*	0,85 ± 0,02*	1,01 ± 0,04*	1,73 ± 0,07*	0,73 ± 0,03*	1,07 ± 0,04*
0,06	1,67 ± 0,04*	0,60 ± 0,02*	0,99 ± 0,02*	1,65 ± 0,06*	0,54 ± 0,02*	1,03 ± 0,04*

П р и м е ч а н и е. Здесь и далее в табл. 2–4 достоверные значения исследуемых параметров (при их сравнении с контролем) при $p \leq 0,05$ обозначены *.

Таблица 2. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента после обработки бенз(а)пиреном

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г сырой массы					
	липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.			клен остролистный <i>Acer platanoides</i> L.		
	хлорофилл а	хлорофилл b	каротиноиды	хлорофилл а	хлорофилл b	каротиноиды
Через одни сутки после обработки						
Контроль	2,44 ± 0,10	0,98 ± 0,05	1,58 ± 0,07	2,79 ± 0,12	1,31 ± 0,05	1,79 ± 0,08
0,000005	3,09 ± 0,09*	1,37 ± 0,06*	1,87 ± 0,08*	2,63 ± 0,10*	1,28 ± 0,05*	1,78 ± 0,06
0,00025	2,25 ± 0,08*	0,95 ± 0,04*	1,32 ± 0,06*	2,59 ± 0,09*	1,27 ± 0,04*	1,75 ± 0,07*
0,0005	2,01 ± 0,07*	0,85 ± 0,03*	1,27 ± 0,05*	1,47 ± 0,05*	0,56 ± 0,02*	0,96 ± 0,03*
0,001	1,95 ± 0,05*	0,82 ± 0,02*	1,18 ± 0,05*	1,46 ± 0,04*	0,55 ± 0,02*	0,92 ± 0,03*
0,0015	1,86 ± 0,06*	0,79 ± 0,02*	1,14 ± 0,05*	1,42 ± 0,06*	0,49 ± 0,01*	0,86 ± 0,02*
Через трое суток после обработки						
Контроль	3,89 ± 0,10	1,87 ± 0,08	2,47 ± 0,10	2,57 ± 0,10	1,03 ± 0,04	1,86 ± 0,08
0,000005	2,40 ± 0,08*	1,04 ± 0,04*	1,21 ± 0,05*	2,61 ± 0,09*	1,21 ± 0,04*	2,01 ± 0,08*
0,00025	2,09 ± 0,09*	1,03 ± 0,04*	1,09 ± 0,04*	2,53 ± 0,08*	1,17 ± 0,05*	1,15 ± 0,05*
0,0005	1,99 ± 0,08*	0,89 ± 0,03*	1,08 ± 0,03*	2,0 ± 0,07*	0,81 ± 0,03*	1,01 ± 0,04*
0,001	1,94 ± 0,07*	0,84 ± 0,02*	1,06 ± 0,04*	1,68 ± 0,07*	0,60 ± 0,02*	0,97 ± 0,02*
0,0015	1,93 ± 0,05*	0,78 ± 0,03*	1,02 ± 0,04*	1,43 ± 0,05*	0,58 ± 0,02*	0,89 ± 0,03*

их различий ($F_{\text{фактич}} = 7,51 \pm 184,64$; $F_{\text{критич}}(1, 6) = 5,99$ при $p \leq 0,05$). Исключения наблюдались в следующих случаях: у липы мелколистной при обработке раствором *o*-ксилола с концентрацией 0,01 мкг/мл для каротиноидов и 0,06 мкг/мл для хлорофилла *a*; раствором бенз(а)пирена с концентрацией 0,0005 нг/мл для хлорофилла *a*, 0,001 нг/мл – для хлорофилла *a* и *b*, 0,0015 нг/мл – для хлорофилла *b*. У клена остролистного были отмечены следующие недостоверные отличия между содержанием пигментов через одни и трое суток после обработки: при воздействии раствора *o*-ксилола с концентрацией 0,01 мкг/мл для хлорофилла *a* и 0,04 мкг/мл – для всех пигментов; раствором бенз(а)пирена с концентрацией 0,000005 и 0,0015 нг/мл для хлорофилла *a*.

В целом количество недостоверных различий между экспериментальными пробами через одни и трое суток эксперимента у липы мелколистной и клена остролистного оказалось равным и составило по 20,0 % вариантов сравнений.

Полученные результаты свидетельствуют, что в случае достоверных различий введенное соединение продолжает свое воздействие на содержание фотосинтетических пигментов листьев саженцев в течение трех суток после обработки, а при недостоверных различиях – основное влияние соединения проявляется только в течение первых суток опыта. Далее содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов изменяется, однако эти изменения незначительны и носят недостоверный характер.

Данные табл. 1 и 2 свидетельствуют, что обработка листовых пластинок *o*-ксилолом и бенз(а)пиреном в большинстве случаев явилась причиной снижения содержания фотосинтетических пигментов по сравнению с контрольными значениями. Так, под действием *o*-ксилола наблюдалось снижение содержания всех изученных пигментов в листьях саженцев липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. в 1,37–1,50 раза через одни сутки и в 2,33–3,11 раза через трое суток с учетом сравнений контрольных проб и содержания пигментов при максимальной дозе влияния действующего вещества (табл. 1). При этом в данном случае через трое суток воздействие *o*-ксилола по сравнению с бенз(а)пиреном на листья саженцев было максимальным в наших исследованиях.

У клена остролистного *Acer platanoides* L., имеющего более широкие листовые пластинки, воздействие *o*-ксилола вызвало снижение содержания фотосинтетических пигментов в 1,85–2,09 раза через одни сутки после обработки и в 1,56–1,92 раза – через трое суток эксперимента, т.е. более интенсивно через один сутки и менее значительно после трех суток по сравнению с липой мелколистной. При этом через трое суток после обработки раствором *o*-ксилола с концентрацией

0,0002 и 0,01 мкг/мл содержание пигментов превышало контрольные значения, а снижение их количества наблюдалось лишь при увеличении концентрации растворов (0,02–0,06 мкг/мл).

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), представителем которых является бенз(а)пирен, относятся к группе достаточно распространенных в окружающей среде загрязнителей. Их источником может быть как антропогенная деятельность, так и природные явления. При этом основным техногенным источником ПАУ в окружающей среде является термическое разложение органических веществ при недостатке кислорода в результате неполного сжигания различных материалов, прежде всего древесины и топлива. Растения способны поглощать ПАУ из природной среды в больших количествах.

В наших исследованиях при воздействии бенз(а)пирена у липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. через одни сутки после обработки наблюдалось снижение содержания пигментов в 1,24–1,38 раза по сравнению с контролем, через трое суток – в 2,02–2,41 раза, т.е. по сравнению с *o*-ксилолом через трое суток влияние бенз(а)пирена на листья саженцев липы мелколистной было менее интенсивным (табл. 2).

Клен остролистный *Acer platanoides* L. при воздействии бенз(а)пирена характеризовался более резким снижением содержания пигментов по сравнению с липой мелколистной через одни сутки после обработки: в 1,96–2,67 раза и в 1,77–2,10 раза – через трое суток эксперимента. При этом у липы мелколистной воздействие раствора бенз(а)пирена с концентрацией 0,000005 нг/мл через одни сутки эксперимента не вызывало снижения количества пигментов, а у клена остролистного – через трое суток. Кроме того, у клена остролистного при обработке бенз(а)пиреном 0,00025 нг/мл содержание хлорофилла *b* также превышало контрольную величину.

С целью проведения количественной оценки длительности влияния использованных ароматических углеводородов на содержание пигментов фотосинтеза в листьях саженцев древесных растений нами был проведен расчет различий количества хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов между экспериментальными пробами, измеренными через одни и трое суток после обработки. Для этого из значений содержания пигментов через одни сутки после обработки всеми дозами действующих веществ вычитали количество пигментов через трое суток. Из полученных разностей находили среднее значение.

В результате выявления различий между пробами, измеренными через одни и трое суток после обработки, было отмечено, что влияние *o*-ксилола на хлорофилл *a* и *b* липы мелколистной *Tilia cordata* Mill. проявлялось в виде уменьшения содержания пигментов через одни сутки эксперимента, а в течение последующих трех суток ответная реакция пигментного аппарата выражалась в постепенном увеличении их количества; тогда как количество каротиноидов, наоборот, незначительно снизилось через трое суток опыта (на рис. 1 представлена разница в содержании каждого из пигментов, определенном через одни и трое суток после обработки).

Обработка листовых пластинок саженцев липы мелколистной растворами бенз(а)пирена привела к более резкому снижению содержания всех пигментов фотосинтеза через трое суток эксперимента, тогда как на начальных этапах опыта влияние бенз(а)пирена было менее значительным.

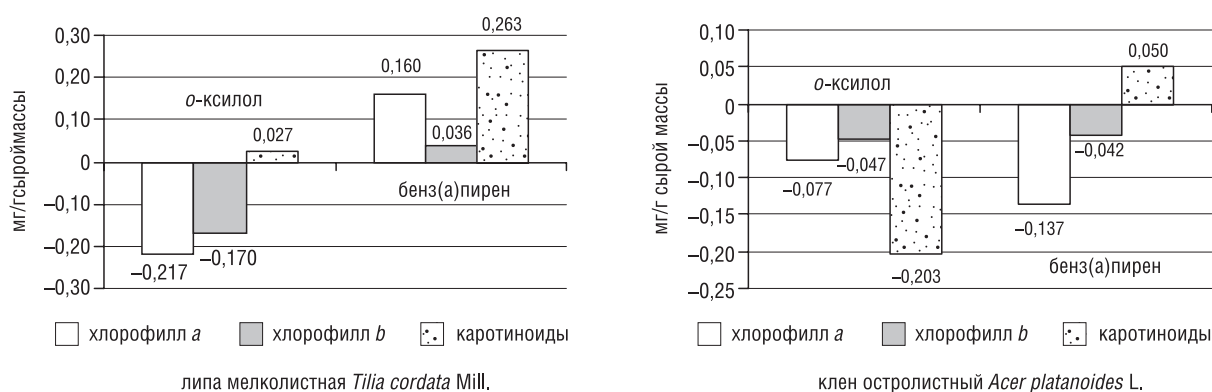


Рис. 1. Изменение содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листьях саженцев древесных растений за период эксперимента

Ответной реакцией клена остролистного на введение растворов о-ксилола явилось снижение содержания всех пигментов фотосинтеза сразу через одни сутки после обработки, а бенз(а)пирена – только количества хлорофилла *a* и *b*, тогда как содержание каротиноидов снизилось только через трое суток после обработки. Таким образом, при воздействии о-ксилола на листовые пластинки исследуемых древесных саженцев выявлено наибольшее снижение содержания хлорофилла *a* и *b* через одни сутки у липы мелколистной, а у клена остролистного – каротиноидов. Использование бенз(а)пирена обусловило максимальное снижение количества хлорофилла *a* и каротиноидов через трое суток у липы мелколистной, а у клена остролистного – хлорофилла *b* через одни сутки опыта. В целом растворы о-ксилола и бенз(а)пирена в течение времени эксперимента оказали наибольшее воздействие на изменение содержания пигментов фотосинтеза липы мелколистной по сравнению с кленом остролистным. В случае с о-ксилолом это проявлялось через одни сутки эксперимента, а с бенз(а)пиреном – через трое суток после обработки, причем влияние бенз(а)пирена было более сильным. Для клена остролистного наиболее сильно действующим веществом явился о-ксилол.

Эффективность функционирования фотосинтетического аппарата в условиях влияния стрессовых факторов характеризуется не только изменением содержания хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов, но и эффективным квантовым выходом, фото- и нефотохимическим тушением флуоресценции (табл. 3 и 4) и рядом других фотохимических параметров (минимальная и максимальная флуоресценция, потенциальный квантовый выход фотохимических реакций, скорость электронного транспорта, количество открытых реакционных центров).

Результаты дисперсионного анализа комплексов, включающих параметры флуоресценции хлорофилла *a* при каждой вводимой дозе углеводов и контроля, позволили установить достоверность их изменений ($F_{\text{фактич}} = 21,18 \div 347,56$ для липы мелколистной; $F_{\text{фактич}} = 10,55 \div 651,27$ для клена остролистного; $F_{\text{критич}}(1, 6) = 5,99$ при $p \leq 0,05$).

Сравнение комплексов дисперсий параметров флуоресценции хлорофилла *a* через одни и трое суток в эксперименте также позволило установить достоверность их изменений с течением времени действия органических соединений без учета контрольных проб ($F_{\text{фактич}} = 7,89 \div 148,15$ для липы мелколистной; $F_{\text{фактич}} = 8,59 \div 389,61$ для клена остролистного; $F_{\text{критич}}(1, 6) = 5,99$ при $p \leq 0,05$).

Данные табл. 3 и 4 свидетельствуют о том, что эффективный квантовый выход $Y(II)$, характеризующий степень деформации реакционных центров и активность фотосинтетического аппара-

Т а б л и ц а 3. Параметры флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента после обработки о-ксилолом

Концентрация раствора о-ксилола, мкг/мл	Параметры флуоресценции хлорофилла <i>a</i>					
	липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.			клен остролистный <i>Acer platanoides</i> L.		
	$Y(II)$	qN	qP	$Y(II)$	qN	qP
Через одни сутки после обработки						
Контроль	0,709 ± 0,025	0,226 ± 0,009	0,898 ± 0,035	0,590 ± 0,025	0,251 ± 0,009	0,817 ± 0,031
0,0002	0,642 ± 0,022*	0,293 ± 0,008*	0,861 ± 0,033*	0,372 ± 0,010*	0,537 ± 0,018*	0,584 ± 0,025*
0,01	0,618 ± 0,011*	0,345 ± 0,007*	0,840 ± 0,032*	0,320 ± 0,008*	0,678 ± 0,027*	0,573 ± 0,024*
0,02	0,520 ± 0,016*	0,425 ± 0,011*	0,735 ± 0,027*	0,267 ± 0,012*	0,770 ± 0,024*	0,490 ± 0,015*
0,04	0,307 ± 0,010*	0,677 ± 0,014*	0,528 ± 0,016*	0,269 ± 0,011*	0,695 ± 0,025*	0,460 ± 0,016*
0,06	0,265 ± 0,012*	0,679 ± 0,024*	0,454 ± 0,013*	0,274 ± 0,007*	0,698 ± 0,026*	0,447 ± 0,018*
Через трое суток после обработки						
Контроль	0,655 ± 0,030	0,416 ± 0,020	0,884 ± 0,034	0,522 ± 0,016	0,298 ± 0,012	0,718 ± 0,026
0,0002	0,650 ± 0,023*	0,270 ± 0,011*	0,864 ± 0,032*	0,590 ± 0,025*	0,317 ± 0,014*	0,805 ± 0,024*
0,01	0,533 ± 0,018*	0,448 ± 0,012*	0,767 ± 0,028*	0,380 ± 0,010*	0,640 ± 0,022*	0,664 ± 0,025*
0,02	0,513 ± 0,014*	0,475 ± 0,015*	0,742 ± 0,024*	0,309 ± 0,009*	0,722 ± 0,026*	0,559 ± 0,021*
0,04	0,277 ± 0,010*	0,662 ± 0,023*	0,481 ± 0,020*	0,275 ± 0,008*	0,715 ± 0,027*	0,478 ± 0,020*
0,06	0,204 ± 0,008*	0,665 ± 0,024*	0,350 ± 0,015*	0,181 ± 0,005*	0,764 ± 0,028*	0,329 ± 0,010*

Т а б л и ц а 4. Параметры флуоресценции хлорофилла а в листьях саженцев древесных растений в условиях эксперимента после обработки бенз(а)пиреном

Концентрация раствора бенз(а)пирена, нг/мл	Параметры флуоресценции хлорофилла а					
	липа мелколистная <i>Tilia cordata</i> Mill.			клен остролистный <i>Acer platanoides</i> L.		
	$Y (II)$	qN	qP	$Y (II)$	qN	qP
Через одни сутки после обработки						
Контроль	0,709 ± 0,025	0,226 ± 0,009	0,898 ± 0,035	0,590 ± 0,025	0,251 ± 0,009	0,817 ± 0,031
0,000005	0,521 ± 0,020*	0,501 ± 0,015*	0,742 ± 0,027*	0,449 ± 0,020*	0,578 ± 0,018*	0,691 ± 0,025*
0,00025	0,439 ± 0,012*	0,532 ± 0,017*	0,665 ± 0,023*	0,453 ± 0,013*	0,531 ± 0,017*	0,685 ± 0,024*
0,0005	0,284 ± 0,010*	0,673 ± 0,024*	0,498 ± 0,015*	0,470 ± 0,014*	0,460 ± 0,013*	0,677 ± 0,026*
0,001	0,257 ± 0,008*	0,708 ± 0,015*	0,442 ± 0,012*	0,384 ± 0,015*	0,597 ± 0,025*	0,623 ± 0,021*
0,0015	0,228 ± 0,005*	0,672 ± 0,024*	0,409 ± 0,015*	0,370 ± 0,018*	0,540 ± 0,018*	0,593 ± 0,025*
Через трое суток после обработки						
Контроль	0,655 ± 0,030	0,416 ± 0,020	0,884 ± 0,034	0,522 ± 0,016	0,298 ± 0,012	0,718 ± 0,026
0,000005	0,568 ± 0,018*	0,391 ± 0,015*	0,846 ± 0,032*	0,455 ± 0,013*	0,569 ± 0,018*	0,689 ± 0,030*
0,00025	0,337 ± 0,015*	0,723 ± 0,026*	0,589 ± 0,019*	0,401 ± 0,015*	0,623 ± 0,021*	0,629 ± 0,024*
0,0005	0,289 ± 0,010*	0,717 ± 0,025*	0,491 ± 0,015*	0,382 ± 0,011*	0,674 ± 0,024*	0,627 ± 0,028*
0,001	0,254 ± 0,008*	0,653 ± 0,023*	0,453 ± 0,013*	0,361 ± 0,017*	0,580 ± 0,018*	0,574 ± 0,015*
0,0015	0,218 ± 0,007*	0,604 ± 0,025*	0,372 ± 0,014*	0,302 ± 0,009*	0,724 ± 0,024*	0,544 ± 0,017*

та в реальных условиях, с учетом сравнений контрольных значений и величин при минимальной и максимальной дозе воздействия *o*-ксилола у липы мелколистной снижался в 1,11–2,68 раза через одни сутки после обработки и в 3,22 раза – через трое суток, при этом при минимальной дозе *o*-ксилола значение $Y (II)$ было практически равным контролю. Растворы бенз(а)пирена вызывали снижение эффективного квантового выхода в 1,36–3,11 раза через одни сутки и в 1,15–3,01 раза – через трое суток, т.е. влияние бенз(а)пирена через одни сутки было более интенсивным.

У клена остролистного снижение эффективного квантового выхода под влиянием *o*-ксилола было менее значительным: через одни сутки в 1,59–2,15 раза и в 2,89 раза – через трое суток; при этом при минимальной дозе *o*-ксилола, аналогично липе мелколистной, величина эффективного квантового выхода превышала контрольное значение. Обработка листовых пластинок бенз(а)пиреном явилась причиной менее значительных изменений значений $Y (II)$ как по сравнению с *o*-ксилолом, так и с липой мелколистной, которые через одни сутки составили 1,32–1,60 раза по сравнению с контролем, а через трое суток в 1,15–1,73 раза.

Нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла qN , которое характеризует расход поглощенной энергии света на тепловое рассеивание, возрастало у исследуемых саженцев практически при всех дозах, причем у липы мелколистной через одни сутки опыта в 1,30–3,01 раза при влиянии *o*-ксилола и в 2,22–2,97 раза – бенз(а)пирена; через трое суток действие используемых соединений ослабевало, причем в случае бенз(а)пирена более заметно, чем при введении *o*-ксилола.

Нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла а у клена остролистного через одни сутки опыта при влиянии *o*-ксилола усиливалось в 2,14–2,78 раза и в 2,15–2,30 раза – бенз(а)пирена; через трое суток действие используемых соединений ослабевало аналогично липе мелколистной, причем в случае бенз(а)пирена более заметно, чем при введении *o*-ксилола за исключением максимальной дозы бенз(а)пирена.

Увеличение тепловых потерь поглощенной световой энергии негативно сказывается на функционировании фотосинтетического аппарата растений и может привести к снижению количества энергии, необходимой для фотохимического преобразования энергии света, что и наблюдалось в наших исследованиях. Так, у исследуемых древесных саженцев происходило уменьшение величин фотохимического тушения флуоресценции хлорофилла qP , за исключением минимальной дозы воздействия *o*-ксилола на листья клена остролистного через трое суток после обработки.

Для количественной оценки длительности влияния использованных ароматических углеводов на параметры флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев древесных растений был проведен расчет различий эффективного квантового выхода, фотохимического и нефотохимического тушения между экспериментальными пробами, измеренными через одни и трое суток после обработки, аналогично расчету различий в количестве пигментов. В результате получено, что после обработки раствором *o*-ксилола листовых пластинок липы мелколистной значения $Y(II)$ и qP снижались более интенсивно через трое суток после воздействия, а клена остролистного – через одни сутки (на рис. 2 представлена разница между значениями каждого из параметров флуоресценции, определенными через одни и трое суток после обработки).

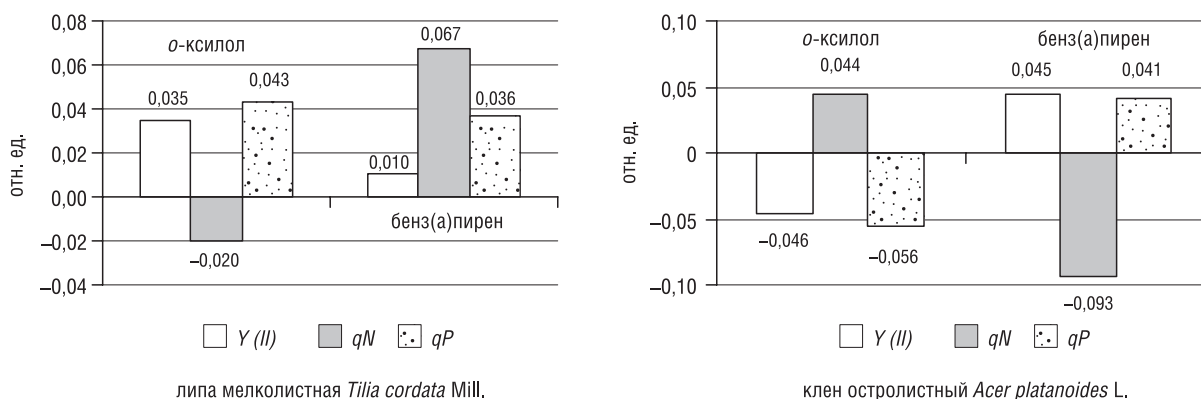


Рис. 2. Изменение параметров флуоресценции хлорофилла *a* в листьях саженцев древесных растений за период эксперимента

Нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла qN в случае использования *o*-ксилола при обработке листьев липы мелколистной возрастало более интенсивно через трое суток опыта, а клена остролистного – через одни сутки.

Растворы бенз(а)пирена через трое суток после обработки липы мелколистной явились причиной снижения значений $Y(II)$, qN и qP , а у клена остролистного – снижения $Y(II)$ и qP и роста qN .

В целом растворы *o*-ксилола и бенз(а)пирена в течение времени эксперимента оказали наибольшее воздействие на изменение параметров флуоресценции в листьях клена остролистного, причем бенз(а)пирен более сильно, чем *o*-ксилол. При этом введение *o*-ксилола обусловило наибольшее снижение величины эффективного квантового выхода и фотохимического тушения флуоресценции через одни сутки у клена остролистного, а бенз(а)пирена – значения нефотохимического тушения флуоресценции.

Выводы. Результаты эксперимента по обработке листовых пластинок саженцев древесных растений городской среды ароматическими углеводородами свидетельствуют, что при воздействии *o*-ксилола на листовые пластинки исследуемых древесных саженцев выявлено наибольшее снижение содержания хлорофилла *a* и *b* через одни сутки у липы мелколистной, а у клена остролистного – каротиноидов. Использование бенз(а)пирена обусловило максимальное снижение количества хлорофилла *a* и каротиноидов через трое суток у липы мелколистной, а у клена остролистного – хлорофилла *b* через одни сутки опыта. В целом растворы *o*-ксилола и бенз(а)пирена в течение эксперимента оказали наибольшее воздействие на изменение содержания пигментов фотосинтеза липы мелколистной.

Кроме того, используемые соединения оказали наиболее интенсивное влияние на изменение параметров флуоресценции клена остролистного, причем бенз(а)пирен более сильно, чем *o*-ксилол.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Кабашникова, Л. Ф.* Фотосинтетический аппарат и потенциал продуктивности хлебных злаков / Л. Ф. Кабашникова. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 327 с.
2. Изучение параметров флуоресценции хлорофилла древесных растений в условиях различной транспортной нагрузки / М. Ю. Алиева [и др.] // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2014. – № 1 (3). – С. 701–704.
3. *Орехов, Д. И.* Изучение параметров флуоресценции хлорофилла в листьях древесных растений, растущих в условиях г. Москвы / Д. И. Орехов, Ю. П. Козлов // Вестник РУДН. – 2010. – № 4. – С. 23–28.
4. *Ланкин, А. В.* Механизмы токсического действия полициклических ароматических углеводородов на фотосинтетический аппарат: автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.01.05 / А. В. Ланкин; ин-т физиологии растений им. К. А. Тимирязева РАН. – М., 2016. – 22 с.
5. *Сергейчик, С. А.* Устойчивость древесных растений в техногенной среде / С. А. Сергейчик. – Минск: Навука и тэхніка, 1994. – 279 с.
6. *Сергейчик, С. А.* Экологическая физиология хвойных пород Беларуси в техногенной среде / С. А. Сергейчик, А. А. Сергейчик, Е. А. Сидорович. – Минск: Беларус. навука, 1998. – 199 с.
7. Охрана окружающей среды: статистический сборник. – Минск: Национальный статистический комитет Респ. Беларусь, 2018. – 228 с.
8. *Чикидова, А. Л.* Полициклические ароматические углеводороды в экосистемах г. Москвы (на примере Восточного административного округа): дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / А. Л. Чикидова; МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 2017. – 141 с.
9. *Масленко, Е. А.* Влияние производных бензола (п-ксилол и ароматические кислоты) и 2-метил-1,3-диоксолана на водоросли и высшие растения: автореф. ... канд. биол. наук : 03.00.16 / Е. А. Масленко; Тюмен. гос. сельскохоз. академия. – Борок, 2006. – 22 с.
10. *Малахова, Е. С.* Газоустойчивость и аккумуляционная способность растений в техногенной среде нефтехимических предприятий Западной Сибири (на примере ОАО «Техуглерод»): автореф. ... канд. биол. наук : 03.00.16 / Е. С. Малахова; Омск. гос. аграр. ун-т. – Омск, 2004. – 19 с.
11. Phytoremediation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene contaminated air by *D. deremensis* and *O. microdasys* plants / M. H. Mosaddegh [et al.] // J. Environ. Health Sci. and Eng. – 2014. – Vol. 12. – P. 113–126.
12. *Сушкова, С. Н.* Оценка содержания бенз(а)пирена в почвах и растениях зоны влияния Новочеркасской ГРЭС: автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.13; 03.02.08 / С. Н. Сушкова; Южн. федеральн. ун-т. – М., 2012. – 26 с.
13. *Wolverton, B. C.* Plants and soil microorganisms: removal of formaldehyde, ethylbenzene and ammonia from the indoor environment / B. C. Wolverton, J. D. Wolverton // Journal of Mississippi Academic Science. – 1993. – Vol. 38(2). – P. 11–15.
14. *Song, J. E.* The impact of plants on the reduction of volatile organic compounds in a small space / J. E. Song, Y. S. Kim, J. Y. Sohn // J. Physiol Anthropol. – 2007. – Vol. 26(6). – P. 599–603.
15. *Yoo, M. H.* Efficacy of indoor plants for the removal of single and mixed volatile organic pollutants and physiological effects of the volatiles on the plants / M. H. Yoo, Y. J. Kwon, K. Son // J. Amer Soc Hort Sci. – 2006. – Vol. 131(4). – P. 452–458.
16. Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь «Об утверждении и введении в действие нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и ориентировочно безопасных уровней воздействия загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных пунктов и мест массового отдыха населения» от 8.11.2016 № 113.
17. *Krause, G. N.* Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. Ann. Rev. / G. N. Krause, E. Wels // Plant Physiol. Plant Mol. Biol. – 1991. – Vol. 42. – P. 313–349.
18. *Rochacek, K.* Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters and some application / K. Rochacek, M. Bartak // Photosynthetica. – 1999. – Vol. 37. – P. 339–363.
19. *Korneev, D. Ju.* Informacionnie vozmozhnosti metoda indukcii fluorescencii (Information capabilities of the fluorescence induction method) / D. Ju. Korneev. – Kiev: Albatros, 2002. – 188 p.

Поступила 30.08.2019

КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ
CLIMATIC RESOURCES
КЛІМАТЫЧНЫЯ РЭСУРСЫ

УДК 551.586

В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: ecology@basnet.by*

**ОЦЕНКА БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА БЕЛАРУСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Рассмотрена возможность получения значений биоклиматического потенциала (БКП) крупного территориального масштаба на основе данных дистанционного зондирования и наземных наблюдений. Для ее решения было предложено два способа: первый основан на использовании данных глобальной системы реанализа ERA-Interim, а второй – на регрессионных зависимостях между БКП, гидротермического коэффициента по Г.Т. Селянинову (ГТК) и вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Оба предложенных способа были реализованы с помощью средств языка программирования Python. Анализ полученных результатов показал, что использование данных реанализа позволяет достаточно точно воспроизвести особенности пространственно-временной изменчивости БКП, но абсолютные значения БКП величины оказываются занижены. В то же время использование регрессионных зависимостей позволяет получить значения БКП, сопоставимые со значениями, вычисленными по данным наблюдений на станциях. Однако пространственное распределение значений БКП при этом имеет ряд особенностей, которые состоят в отсутствии широтной зональности и тесной связи с типом растительного покрова.

Ключевые слова: биоклиматический потенциал, компьютерная модель, растительность, изменения климата

V.F. Loginov, M.A. Khitrykau

Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: ecology@basnet.by

**ESTIMATION OF BIOCLIMATIC POTENTIAL OF BELARUS USING REMOTE SENSING DATA AND COMPUTER
MODELLING**

Possibility of large-scale bioclimatic potential values (BCP) computation on the base of remote sensing data and surface-level observations was considered in this work. In order to solve this problem, two methods were proposed: first method is based on using of ERA-Interim global reanalysis system data, second method is based on regression dependence between BCP, Selyaninov's hydrothermic coefficient (HTC) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Both methods were realized in Python programming language environment. Analysis of the results obtained showed that method based on reanalysis data allows reflect spatiotemporal changes of BCP with sufficient accuracy, but absolute values of BCP according to this method are always lower than actual. At the same time, BCP values calculated according to the second proposed method are very close to values obtained using observation data. The BCP values set, calculated according to the second method, have distinctive traits of spatial distribution: absence of latitudinal zonality and high dependence on vegetation type.

Keywords: bioclimatic potential, computer model, vegetation, climate change

У. Ф. Логінаў, М. А. Хітрыкаў

Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь, e-mail: ecology@basnet.by

**АЦЭНКА БІАКЛІМАТЫЧНАГА ПАТЭНЦЫЯЛУ БЕЛАРУСІ З ВЫКАРЫСТАННЕМ ДАДЗЕННЫХ ДЫСТАНЦЫЙНАГА
ЗАНДЗІРАВАННЯ І КАМП'ЮТАРНАГА МАДЭЛЯВАННЯ**

У дадзенай рабоце разгледжана магчымасць атрымання значэнняў біакліматычнага патэнцыялу (БКП) буйнога тэрытарыяльнага маштабу на аснове дадзеных дыстанцыйнага зандзіравання і наземных назіранняў. Для яе вырашэння былі прапанаваны два спосабы: першы заснаваны на выкарыстанні дадзеных глабальнай сістэмы рэаналізу

ERA-Interim, а други – на рэгрэсійных залежнасцях паміж БКП, гідратэрмічным каэфіцыентам па Г.Т. Селянінаву (ГТК) і вегетацыйным індэксам NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Абодва прапанаваныя спосабы былі рэалізаваныя з дапамогай сродкаў мовы праграмавання Python. Аналіз атрыманых дадзеных паказаў, што выкарыстанне дадзеных рэаналіза дазваляе дастаткова дакладна перадаваць асаблівасці прасторава-часовай зменлівасці БКП, але абсалютныя значэнні БКП атрымліваюцца заніжанымі. У той жа час выкарыстанне рэгрэсійных залежнасцей дазваляе атрымліваць значэнні БКП, супараўнальныя з атрыманымі па дадзеных назіранняў на станцыях. Аднак прасторавае размеркаванне значэнняў БКП мае шэраг асаблівасцей, якія складаюцца ў адсутнасці шыротнай занаўнасці і цеснай сувязі з тыпам расліннага покрыва.

Ключавыя словы: біакліматычны патэнцыял, камп'ютарная мадэль, расліннасць, змены клімату

Введение. Предложенный Д.И. Шашко показатель биоклиматического потенциала (БКП) [1, 2] является одним из наиболее удобных подходов комплексной оценки основных агроклиматических ресурсов, необходимых для роста и развития растений. Однако этот показатель фактически характеризует условия лишь для относительно небольших территорий вокруг метеорологических станций, тогда как получение значений БКП для отдельных хозяйств или районов по всей территории страны более существенно для практического применения, но оно требует других подходов в силу недостаточной плотности сети наблюдений. Решить эту проблему возможно, используя средства компьютерного моделирования и обработки данных, а также данных дистанционного зондирования Земли.

В настоящей работе предложено два подхода, позволяющих получить значения БКП для территорий, расположенных на удалении от метеорологических станций. Первый подход основан на использовании данных глобальных систем реанализа, второй – на использовании регрессионной зависимости значений БКП, вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и гидротермического коэффициента (ГТК) по Г.Т. Селянинову. В этом случае БКП рассматривается как предикат, а ГТК и NDVI как предикторы. Реализация данных подходов в виде простых компьютерных моделей позволит получать значения БКП с пространственным разрешением 3–5 км для всей территории Беларуси, что позволит оценить биоклиматический потенциал на уровне отдельных хозяйств.

Материалы и методы. Методика расчета биоклиматического потенциала (БКП) разрабатывалась Д.И. Шашко в 1960–1980-е годы [1, 2] для оценки обеспечения растений ресурсами тепла и влаги и проведения агроклиматического районирования территории бывшего СССР. БКП – это индекс, представляющий собой произведение двух коэффициентов роста, показывающих обеспеченность ресурсами тепла и влаги. Коэффициент обеспеченности ресурсами влаги (K_p) рассчитывается по следующей эмпирико-статистической зависимости:

$$K_p = 1,5 \lg(20Md) - 0,21 + 0,63Md - Md^2.$$

Здесь Md – это показатель увлажнения, представляющий собой соотношение годовой суммы осадков (ΣP) к годовой сумме среднесуточных значений дефицита влажности воздуха ($\Sigma(E - e)$):

$$Md = \frac{\Sigma P}{\Sigma(E - e)}.$$

Коэффициент обеспеченности ресурсами тепла представляет собой соотношение суммы активных температур выше 10°C в рассматриваемом регионе или пункте наблюдения ($\Sigma T_{>10^\circ\text{C}}$) к одной из базовых сумм температур ($\Sigma T_{\text{баз}}$). Обычно в качестве базовой суммы температур принимают значения 1000°C , что соответствует среднему значению суммы активных температур выше 10°C на границе зоны земледелия на открытом грунте. Таким образом, итоговая формула расчета БКП имеет следующий вид:

$$\text{БКП} = K_p \frac{\Sigma T_{>10^\circ\text{C}}}{\Sigma T_{\text{баз}}}.$$

Однако для практического использования значения индекса БКП не очень удобны ввиду их относительно малой величины. Так, для территории Беларуси их значения варьируются в пределах 2–3 в зависимости от рассматриваемого периода и региона. Поэтому на практике чаще

всего используется показатель биологической продуктивности в баллах (B_k). Он также был предложен Д. И. Шашко [1] и рассчитывается по формуле:

$$B_k = 100 \times K_p \frac{\sum T_{>10^\circ\text{C}}}{1900^\circ\text{C}}$$

Здесь 1900°C – средняя сумма активных температур для Нечерноземной зоны СССР.

**Значения B_k для метеостанций
Беларуси, полученные
Д. И. Шашко [1]**

Метеостанция	Значения B_k
Витебск	118
Борисов	122
Слуцк	127
Пружаны	132
Гомель	137

В рамках данной работы будет соблюдаться оригинальная методика Д. И. Шашко для расчета БКП. В работах [1, 2] автор проводил оценки биоклиматического потенциала на основе данных за период до 1970-х годов включительно, т.е. до начала современного потепления климата (таблица). Использование этого подхода позволит оценить масштаб изменений БКП за период современных изменений климата и провести сравнительную оценку изменений БКП за последние 60 лет.

Для реализации первого предложенного подхода по оценке БКП территории Беларуси были использованы данные глобальной системы реанализа ERA-Interim [3] с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ за период с 1979 по 2016 г. Причины выбора подобного периода заключаются в необходимости обеспечить сравнимость результатов предыдущего анализа изменений БКП территории Беларуси [4–6], а также доступности необходимой метеорологической информации только за период с 1979 г. Как и в предыдущих работах [4, 5], были рассмотрены отдельные подпериоды: период современного потепления климата (1989–2016 гг.); период, предшествовавший началу современного потепления климата (1979–1988 гг.); 1-я фаза периода современного потепления климата (1989–2000 гг.); 2-я фаза периода современного потепления климата (2001–2016 гг.). Выбранная для анализа территория находится в границах 50° – 58° с. ш. и 20° – 35° в. д. Это позволяет оценить БКП территории Беларуси и смежных территорий соседних стран. Для упрощения и ускорения расчетов были использованы месячные данные. В связи с этим в расчетных формулах здесь вместо суммы активных температур выше 10°C используются значения сумм температур за период с мая по сентябрь ($\sum T_{5-9}$).

Система реанализа ERA-Interim, как и другие подобные системы и модели, не предоставляет необходимые для расчета БКП значения дефицита влажности воздуха. Для их расчета использовалась методика ВМО [7], позволяющая получить значения дефицита влажности воздуха, если известны значения температуры, давления и относительной влажности. По формуле

$$E_w = 6,112 \exp \frac{17,62t}{243,12 + t}$$

рассчитываются значения насыщенного давления чистой фазы водяного пара (E_w); t – значения температуры, $^\circ\text{C}$. Значения парциального давления насыщенного пара во влажном воздухе (E) можно найти по формуле:

$$E = f(p)E_w,$$

где $f(p)$ – функция давления (p) вида:

$$f(p) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6}p - 0,074p^{-1}.$$

Далее, зная значения парциального давления насыщенного пара (E) и относительной влажности (f), можно получить значение фактического парциального давления водяного пара (e):

$$e = \frac{fE}{100}.$$

Исходя из этого, можно вычислить значения дефицита влажности воздуха (D):

$$D = E - e.$$

Пространственное разрешение исходных данных довольно грубое, поэтому для того чтобы получить значения БКП для отдельных хозяйств, данные были интерполированы с шагом $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ с помощью метода билинейной интерполяции.

Индексы ГТК и NDVI, являющиеся основой второго предложенного подхода, представляют собой следующее. ГТК – показатель влагообеспеченности, рассчитываемый по формуле:

$$\text{ГТК} = \frac{10R}{\sum T_{>10^\circ\text{C}}},$$

где $\sum T_{>10^\circ\text{C}}$ – сумма активных температур выше 10°C , а R – количество осадков за период со средними температурами выше 10°C . Значение ГТК = 1 соответствует границе между зонами недостаточного и избыточного увлажнения. Средние значения ГТК для Беларуси составляют 1,1–1,4. Индекс NDVI является показателем радиационного типа теплообмена и климатического опустынивания. Он рассчитывается по формуле:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}},$$

здесь *NIR* и *Red* – спектральные отражательные способности подстилающей поверхности в ближнем инфракрасном и красном диапазонах соответственно. Этот индекс принимает значения от 0 до 1. Он имеет высокую корреляцию с количеством зеленой фитомассы и ее продукцией, что позволяет использовать его для оценки состояния сельскохозяйственных культур и растительного покрова в целом. Для территории Беларуси его средние значения находятся в пределах 0,6–0,75, однако они могут меняться в широких пределах на относительно небольшой территории в силу зависимости от ряда физико-географических и антропогенных факторов. Как правило, для территорий с высоким биоразнообразием (лесные и иные необрабатываемые земли) характерны наибольшие значения NDVI и темпы его прироста. Обрабатываемые земли относятся к территориям с пониженным биоразнообразием, поэтому значения NDVI и темпы его прироста ниже средних.

Второй подход основывается на использовании уравнений линейной регрессии. Коэффициенты корреляции линейной (одномерной полиномиальной), а также двух- и трехмерных полиномиальных регрессий БКП, ГТК и NDVI отличаются незначительно, поэтому для упрощения и ускорения расчетов на ЭВМ были использованы уравнения линейной регрессии. Кроме того, коэффициент корреляции между ГТК и NDVI составляет всего 0,15, поэтому ГТК и NDVI могут рассматриваться как независимые переменные в уравнении множественной регрессии. Данный подход был реализован двумя вариантами. Первый основан на использовании уравнений множественной регрессии между упомянутыми характеристиками, второй – на вычислении среднего из значений БКП, полученных на основе уравнений линейной регрессии БКП и ГТК, а также БКП и NDVI.

Применяемые в данной работе значения NDVI получены на основе спутниковых измерений системы MODIS [8]; мы использовали доступный ряд измерений за 2000–2016 гг. Это значит, что в рамках данного анализа рассмотрена лишь 2-я фаза периода современного потепления климата (2001–2016 гг.). Значения ГТК получены на основании сеточного архива метеорологических данных, разработанного в Институте природопользования НАН Беларуси [9]. Поскольку в архиве приведены только среднемесячные значения, ГТК рассчитывался на основании среднемесячных данных за период с мая по сентябрь. Пространственное разрешение полученных значений БКП составляет $3,4 \times 5,7$ км.

Регрессионные зависимости рассчитывали на основе значений БКП, ГТК и NDVI, полученных для отдельных метеорологических станций Беларуси. Для определения зависимостей использовали станции, расположенные в населенных пунктах, где эффект городских островов тепла минимален (т.е. с населением не более 50 тыс. человек). Кроме того, были исключены станции Мстиславль (из-за непродолжительного ряда наблюдений), Нарочь, Чечерск, Любань, Щучин и Дрогичин (пропуск в рядах данных), а также станция Полесская и Березинский заповедник (из-за охлаждающего эффекта болот) – в этих районах значения БКП были занижены.

Множественная регрессионная зависимость между БКП, ГТК и NDVI имеет вид

$$\text{БКП} = 113,2265 + 40,9836\text{ГТК} + 30,8678\text{NDVI}.$$

Отдельные линейные зависимости между БКП, ГТК и NDVI следующие:

$$\text{БКП} = 134,2849 + 41,50979\text{ГТК},$$

$$\text{БКП} = 169,3693 + 15,81856\text{NDVI}.$$

Коэффициент множественной корреляции БКП, ГТК и NDV полученных уравнений регрессии составляет 0,57, а парные коэффициенты корреляции между ГТК и БКП и между NDVI и БКП соответственно 0,53 и 0,33. Статистическая значимость находится на уровне 90 % для первых двух случаев, что позволяет использовать эти зависимости для оценок БКП на экспериментальном уровне.

Данные подходы реализованы в виде скриптов в среде языка программирования Python [10]. При написании программного кода использовали библиотеки NumPy, Matplotlib, Basemap, NetCDF4 и Pandas [11–15].

Результаты исследований. Результаты анализа биоклиматического потенциала территории Беларуси представлены на рис. 1–7. На рис. 1–5 приведены карты распределения значений B_k , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, а на рис. 6–7 – карты, полученные на основании регрессионных зависимостей между БКП, ГТК по Г. Т. Селянинову и NDVI.

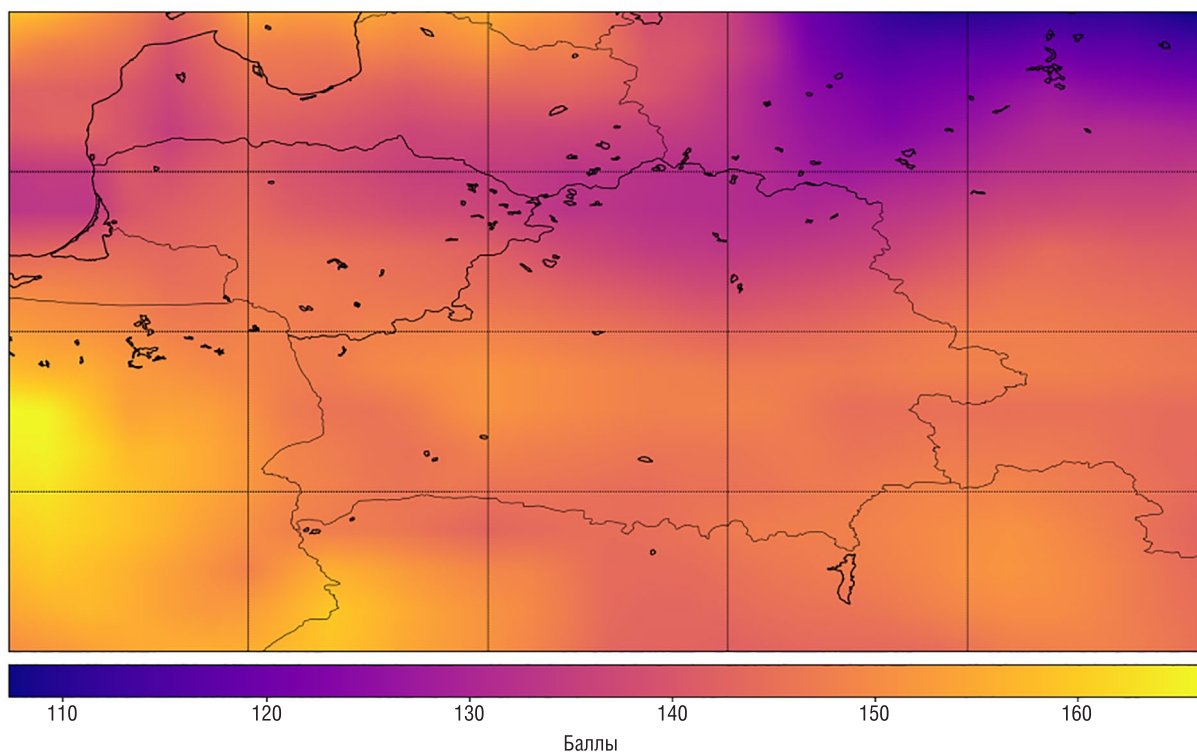


Рис. 1. Значения B_k , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, за весь рассматриваемый период (1979–2016 гг.)

Генеральные особенности пространственного распределения значений B_k за весь рассматриваемый период (рис. 1) аналогичны тем, что были установлены в рамках предыдущих работ [4, 5]. Прослеживается широтная зональность распределения значений B_k , локальные аномалии B_k обусловлены местными особенностями распределения температуры и в большей мере количеством осадков. Однако есть и ключевые различия, состоящие в следующем. Значения B_k , полученные по данным системы реанализа, оказались существенно ниже значений, полученных по данным наблюдений на метеостанциях: величина разности составляет до 25–30

баллов, что делает их ближе к оценкам Д. И. Шашко. Значения B_k , полученные по данным реанализа, выше оценок Д. И. Шашко на 15–20 баллов. Поскольку данные реанализа получены в результате интерполяции, то локальные особенности распределения температуры и количества осадков сглаживаются. Например, на рис. 1 отсутствуют anomalously низкие значения для станции Полесская и anomalously высокие значения для станции Житковичи. Кроме того, интерполяция сглаживает эффект городских островов тепла, из-за которого на значительной части метеостанций Беларуси отмечается превышение значений B_k на 2–3 балла.

На рис. 1 прослеживается ряд крупномасштабных аномалий распределения B_k , которые ранее [5, 6] не отмечались: это минимум значений B_k , расположенный на Валдайской возвышенности и ее юго-западных окрестностях, а также максимумы значений B_k , расположенные в центральной Латвии, в центральной Польше и на северо-востоке Украины. Формирование минимумов значений B_k связано с недостатком тепловых ресурсов в указанном регионе, а формирование максимумов обусловлено высоким количеством осадков. Аномалии в распределении количества осадков также обусловили нарушение широтной зональности в южной части Беларуси: область максимальных значений B_k смещена на север и охватывает Предполесский регион.

Наиболее вероятная причина проявления подобных аномалий распределения значений B_k обусловлена характером использованных при расчете данных реанализа, являющихся результатом интерполяции. Кроме того, для расчетов значений B_k использовали данные не суточного, а месячного разрешения, что делает их недостаточно точными. Строго говоря, оценку тепловых ресурсов для расчета БКП более правильно проводить на основе данных суточного или хотя бы декадного разрешения.

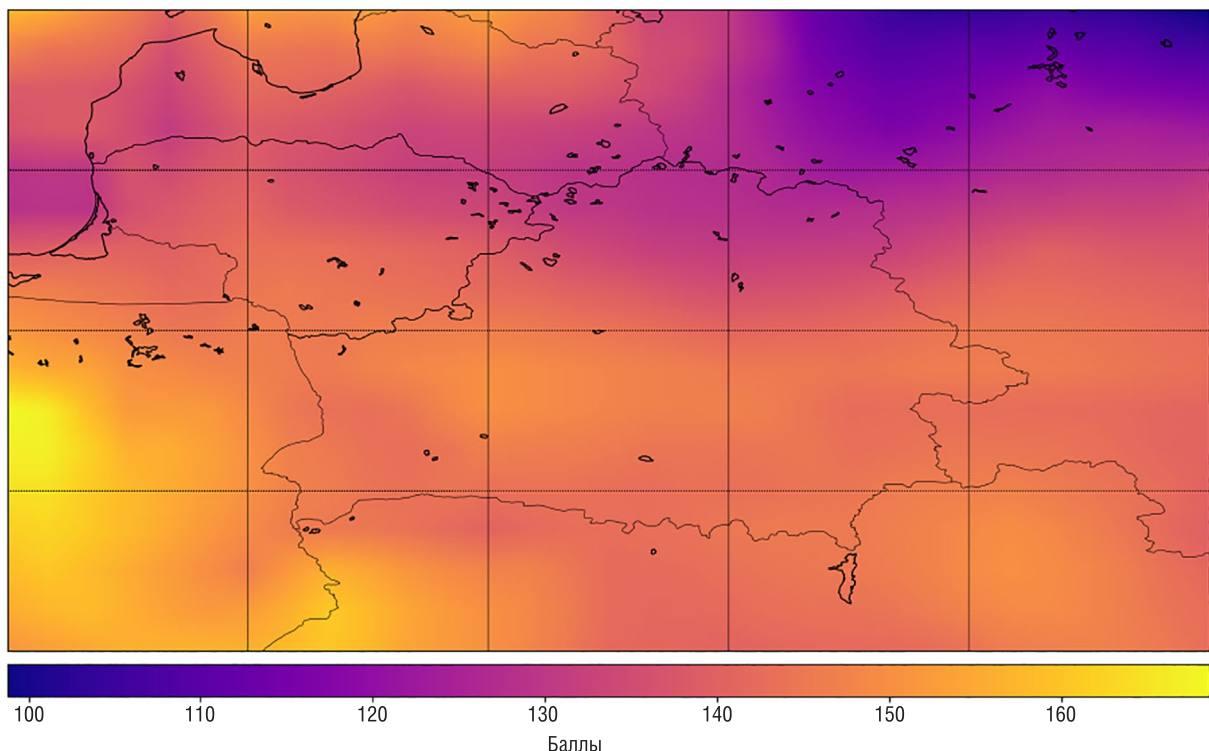


Рис. 2. Значения B_k , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, за период современного потепления климата (1989–2016 гг.)

При сокращении рассматриваемого периода до эпохи современного потепления климата (1989–2016 гг.) характер пространственного распределения значений B_k по территории Беларуси и смежным территориям соседних стран не претерпевает существенных изменений (рис. 2). Однако необходимо отметить, что в отличие от результатов, полученных в работах [4, 5],

данные реанализа показали, что средние значения B_k за период современного потепления климата выше средних значений B_k за весь рассматриваемый период лишь на 2–3 балла. Другой важной особенностью стало усиление минимума значений B_k , охватывающего Валдайскую возвышенность и север Беларуси: значения B_k там не повышались, а в центральной части минимума даже снизились на 4–10 баллов. Это обусловлено тем, что на протяжении всего периода 1989–2016 гг. для данного региона было характерно снижение количества осадков на фоне незначительного прироста количества тепловых ресурсов или же его отсутствия.

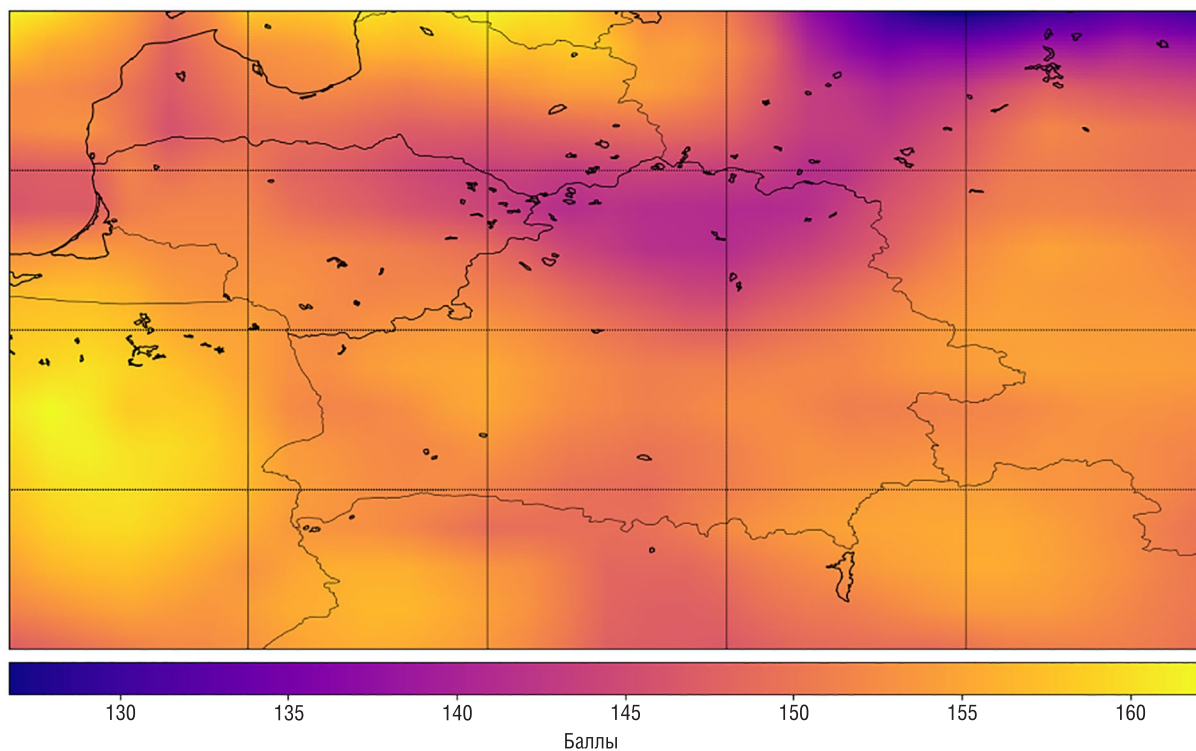


Рис. 3. Значения B_k , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, за весь период, предшествовавший началу современного потепления климата (1979–1988 гг.)

Рассмотрим характер распределения значений B_k за период, предшествовавший началу современного потепления климата (1979–1988 гг.). Это самый короткий из рассматриваемых подпериодов, который, согласно данным HadCRUT4 [16], является, по своей сути, переходным периодом к современной эпохе потепления. Тем не менее период 1979–1988 гг. имеет ряд отличительных особенностей распределения значений B_k .

Как видно из рис. 3, ключевые особенности пространственного распределения значений B_k , отмеченные за весь рассматриваемый период (1979–2016 гг.), сформировались уже в 1979–1988 гг. Для большей части рассматриваемой территории период 1979–1988 гг. характеризовался минимальными значениями B_k . Отличительной чертой данного периода является меньшая контрастность климатических условий: разность между наибольшими и наименьшими значениями B_k по всей рассматриваемой территории составляет всего 35 баллов, в то время как для других периодов она варьируется от 55 до 80 баллов. Из-за этого большинство локальных максимумов и минимумов значений B_k здесь либо размыто, как в южной и центральной Беларуси, либо менее выражено, как на северо-востоке рассматриваемого региона.

Необходимо отметить, что период 1979–1988 гг. характеризуется минимальными расхождениями оценок B_k по данным метеостанций, полученным в работах [4, 5], по сравнению с оценками B_k других подпериодов. Это можно объяснить тем, что при современном потеплении климата акцентировалось влияние местных особенностей распределения температуры и количества осадков на значения B_k (в крупных городах это в первую очередь усиление островов тепла).

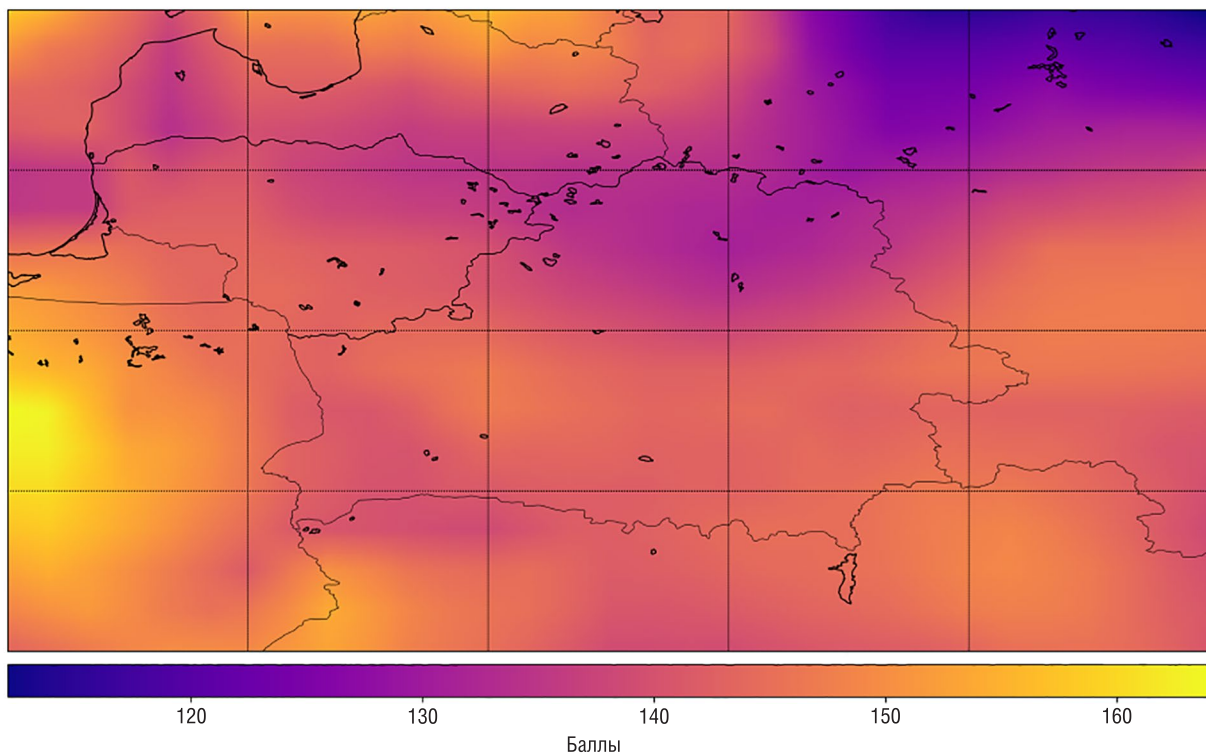


Рис. 4. Значения B_k , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, за первую фазу периода современного потепления климата (1989–2000 гг.)

В течение первой фазы периода современного потепления климата (1989–2000 гг.) происходило усиление контрастности климатических условий, роль местных особенностей распределения температуры и количества осадков на величину B_k существенно увеличилась (рис. 4). Результатом этого стало усиление экстремумов значений B_k . Наиболее выразительно это усиление проявилось на северо-востоке (Валдайская возвышенность) и юго-западе (центральная Польша) рассматриваемого региона. Важной особенностью является слабый рост значений B_k в этот период (примерно 2–5 баллов), в том числе на территории Белорусского Полесья, где, согласно работам [4, 5], в 1989–2000 гг. отмечался наиболее значимый прирост значений B_k . Вероятнее всего, это является следствием сглаживания местных аномалий распределения температуры и количества осадков при интерполировании значений метеорологических параметров при использовании реанализа. На Валдайской возвышенности и прилегающих к ней территориях снижение B_k доходило до 10–12 баллов. Причины этого были указаны ранее.

Характер пространственного распределения значений B_k во время второй фазы периода современного потепления климата (2011–2016 гг.) был аналогичен таковому во время первой фазы потепления. Контрастность климатических условий стала еще выше, поэтому усиление экстремумов значений B_k продолжилось. Прирост значений B_k составил в среднем 10–15 баллов и был связан с увеличением теплообеспеченности, однако он был свойственен преимущественно территориям южнее 54° с. ш. Севернее 54° с. ш. прирост значений B_k был незначителен, иногда даже отмечалось его снижение (Валдайская возвышенность). Это связано со снижением количества осадков в данном регионе. Снижение значений B_k в лесостепной и степной зонах Украины, отмеченное в работе [5], здесь не прослеживается. В результате усиления контрастности в распределении значений B_k для периода 2001–2016 гг. были характерны наибольшие расхождения со значениями B_k по данным наблюдений на метеорологических станциях. На территории Беларуси наибольшие расхождения отмечались в северной части страны: согласно данным реанализа, рост значений B_k там был незначителен, в то время как, согласно данным работ [4, 5], наиболее интенсивный прирост значений B_k свойственен именно северной Беларуси.

В то же время несмотря на расхождения значений B_k , полученных разными способами, значения B_k , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim (рис. 5), достаточно точно воспроизвели ключевую особенность временных изменений B_k : прирост значений за 2001–2016 гг. относительно 1989–2000 гг. был заметно выше, чем прирост значений за 1989–2000 гг. относительно 1979–1988 гг. Это связано с тем, что для второй фазы периода современного потепления климата наиболее существенный прирост количества тепловых ресурсов наблюдался в летнее время.

Рассмотрим значения B_k , полученные на основе зависимостей между БКП, ГТК по Г. Т. Селянинову и вегетационным индексом NDVI.

Как видно из рис. 6, характер распределения значений B_k , полученный на основе регрессионных зависимостей между биоклиматическим потенциалом и индексам ГТК и NDVI, существенно отличается от характера распределения значений B_k , рассчитанных по методике Д. И. Шашко на основе данных метеорологических станций и данных реанализа. Пространственная структура этих значений B_k имеет иные генеральные особенности: в ней не прослеживается широтная зональность, а ее изменениям свойственен резкий и неоднородный характер.

Если сравнить распределение полученных значений B_k с распределением значений ГТК [17] и NDVI [8] по территории Беларуси, то можно выявить следующие особенности. Общие тенденции пространственного распределения значений B_k , полученные на основе регрессионной зависимости, «унаследовали» от распределения ГТК по территории Беларуси. Им свойственно уменьшение B_k при продвижении с северо-запада на юго-восток; область максимальных значений охватывает Новогрудскую и Ошмянскую возвышенности, а область минимальных значений – юго-восток Гомельской области. Изменения NDVI объясняют изменчивость значений B_k на локальном уровне. Наиболее важным фактором, определяющим величину NDVI, является соотношение площадей лесных и обрабатываемых земель: чем выше лесистость территории, тем выше будут значения NDVI. Характер растительного покрова также может резко меняться в зависимости от физико-географических факторов и это отображается в характере распределе-

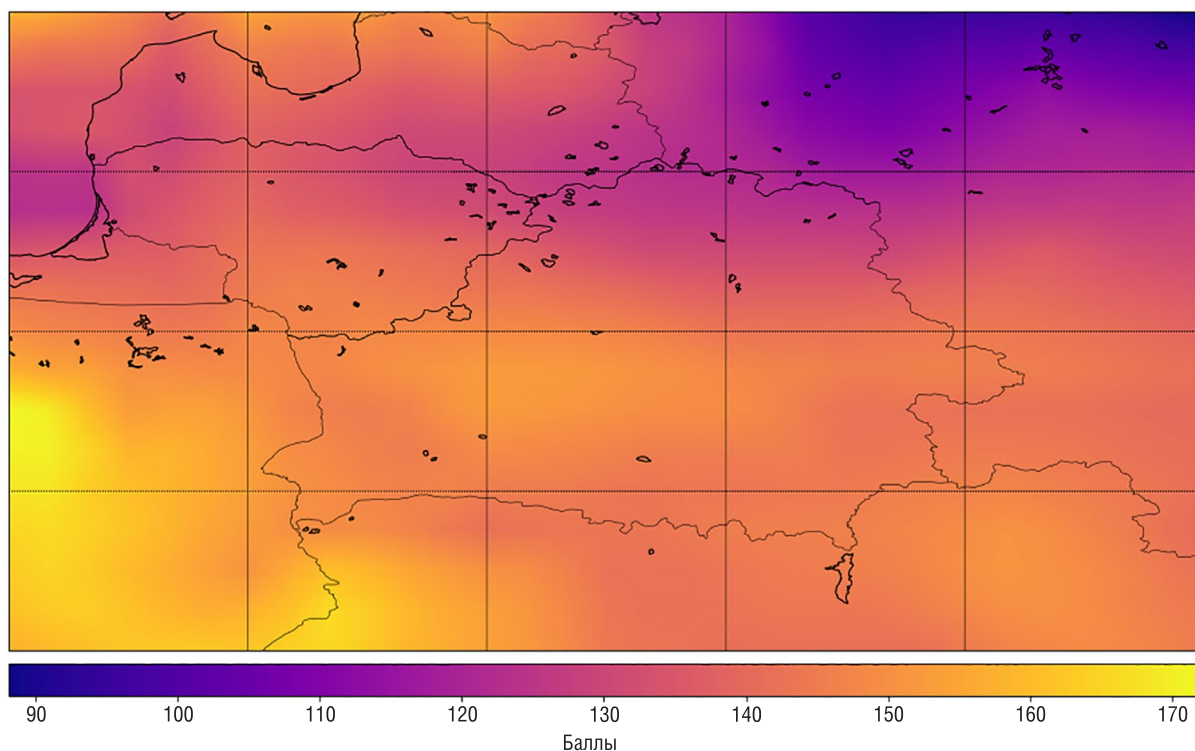


Рис. 5. Значения B_k , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, за вторую фазу периода современного потепления климата (2001–2016 гг.)

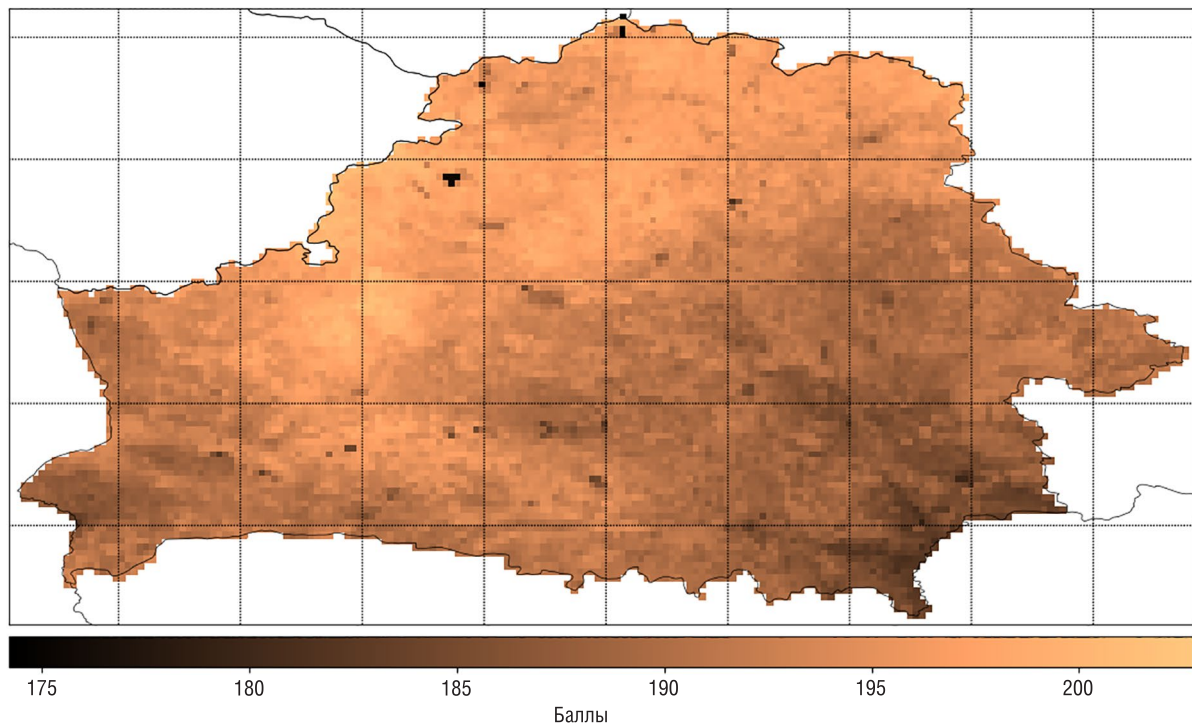


Рис. 6. Значения B_k , полученные с помощью уравнения множественной регрессии БКП, ГТК и NDVI за период 2001–2016 гг.

ния B_k . Так, на данной карте (рис. 6) можно выделить крупнейшие возвышенности Белорусской гряды (Минскую, Новогрудскую и Ошмянскую) и долины рек Днепра и Припяти на территории Гомельской области. Кроме того, на ней четко прослеживаются небольшие минимумы значений B_k , соответствующие крупнейшим городам Беларуси, что обусловлено пониженными значениями NDVI на урбанизированных территориях. Интересно также отметить, что на этой карте заметно выделяется зона радиоактивного загрязнения ЧАЭС, охватывающая юг Могилевской и северо-восток Гомельской области. Это связано с тем, что из-за вывода сельскохозяйственных земель из оборота существенно выросла лесистость и, как следствие, возросли средние значения NDVI и B_k .

Положительный эффект повышения температуры, количества осадков и концентрации углекислого газа в атмосфере для территорий с пониженным биоразнообразием (в том числе сельскохозяйственных земель) менее значителен, поэтому прирост значений NDVI там невелик. Таким образом, прирост значений B_k на сельскохозяйственных землях меньше, чем прирост значений B_k на лесных землях за аналогичный период времени.

Необходимо отметить следующую особенность. Величина NDVI существенно зависит от характера выпадающих осадков: если большая часть осадков имеет ливневой характер, то большая их часть будет уходить на поверхностный сток и в результате растения могут испытывать дефицит влаги, что приводит к снижению значений NDVI. Эта особенность может стать причиной серьезного снижения значений B_k по сравнению со значениями, рассчитанными непосредственно по методике Д.И. Шашко. Ярким примером является станция Брагин: значения B_k за 2001–2015 гг., рассчитанные по методике Д.И. Шашко, для этой станции сопоставимы со значениями B_k для станции Новогрудок, однако значения B_k , рассчитанные на основе регрессионной зависимости между БКП, ГТК и NDVI, для этой станции на ~25 баллов ниже, чем значения B_k для станции Новогрудок, рассчитанные по аналогичной методике. Это связано с тем, что на станции Брагин в 2001–2015 гг. существенно возросло количество осадков, однако они имели преимущественно ливневой характер [18], поэтому значения NDVI и, следовательно, B_k выросли незначительно.

Несмотря на существенную разницу в характере пространственного распределения, полученные значения баллов B_k близки к тем, что были рассчитаны на основе данных наблюдений на метеорологических станциях [4, 5]. В среднем значения B_k , полученные на основе регрессионной зависимости БКП, ГТК и NDVI, на 5–7 баллов выше значений B_k , полученных по данным наблюдений на метеостанциях (рис. 7).

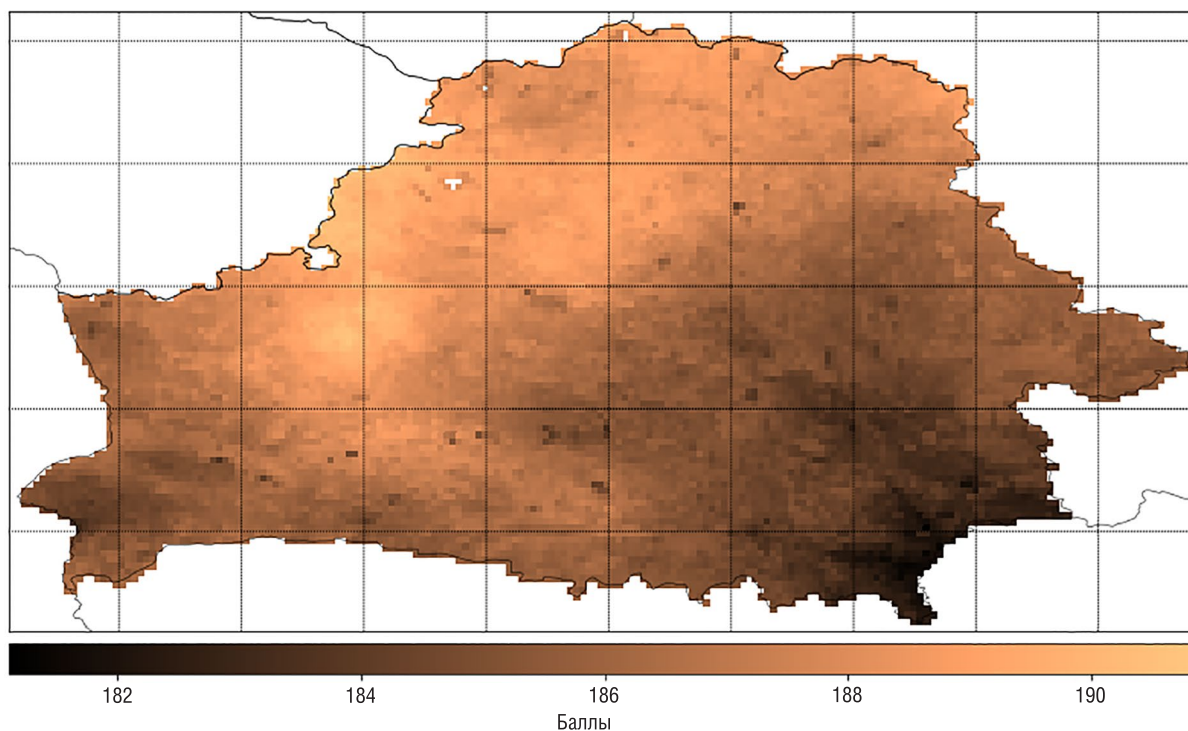


Рис. 7. Значения B_k , полученные на основании усредненных значений линейных регрессионных зависимостей между БКП и ГТК, а также БКП и NDVI за 2001–2016 гг.

Характер пространственного распределения значений B_k , полученных путем второй реализации, т. е. на основании усредненных линейных зависимостей между БКП и ГТК, а также БКП и NDVI, аналогичен распределению значений B_k , полученных на основании множественной регрессии между БКП, ГТК и NDVI (первой реализации). Единственное отличие заключается в том, что значения B_k , полученные с помощью данной реализации, испытывают меньшую пространственную изменчивость: разница между максимумом и минимумом составляет 10 баллов по сравнению с разницей в 25 для первой реализации, а также практически полностью совпадают со значениями, полученными на основе методики Д. И. Шашко [4, 5]. Таким образом, для практического применения вторая реализация, основанная на использовании усредненных значений линейных регрессионных зависимостей между БКП и ГТК, а также БКП и NDVI, будет наиболее оптимальна.

Выводы. Значения биоклиматического потенциала, выраженного в баллах биологической продуктивности (B_k), полученные на основе данных глобальной системы реанализа ERA-Interim, с достаточной точностью воспроизвели определенные ранее [4, 5] ключевые особенности пространственного распределения ее средней величины и временной изменчивости на большей части рассматриваемой территории. Кроме того, значения B_k , полученные этим способом, не были искажены климатическим эффектом городов. Однако в то же время абсолютные значения B_k , полученные данным способом, существенно расходились со значениями, полученными по данным наблюдений на метеорологических станциях, и из-за разной скорости роста значений B_k в этих группах разность между ними увеличивалась на протяжении всего рассматриваемого периода. Значения B_k , полученные данным способом, более близки к оцен-

кам Д. И. Шашко [1]. Значения B_k , полученные на основе регрессионных зависимостей между БКП, ГТК по Г. Т. Селянинову и NDVI, сопоставимы со значениями B_k , полученными по данным наблюдений на станциях, однако их пространственное распределение было совершенно иным. Для значений B_k , полученных на основе регрессионных зависимостей между БКП, ГТК и NDVI, отмечаются иные генеральные особенности пространственного распределения, а его характер необычайно пестр. В нем прослеживаются особенности пространственного распределения ГТК и NDVI, параметров-предикторов регрессионной зависимости.

Таким образом, для практического использования при вычислении значений БКП крупного пространственного разрешения более целесообразно использовать второй подход, основанный на регрессионной зависимости между БКП, ГТК и NDVI. Введение вегетационного индекса NDVI в расчетную схему позволяет дать реальную комплексную оценку благоприятности климатических условий для роста и развития растений в целом.

Список использованных источников

1. Шашко, Д. И. Агроклиматические ресурсы СССР / Д. И. Шашко. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 248 с.
2. Шашко, Д. И. Агроклиматическое районирование СССР / Д. И. Шашко. – М.: Колос, 1967. – 335 с.
3. ERA-Interim Global Reanalysis System [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>. Date of access: 09.04.2019.
4. Логинов В. Ф. Пространственно-временные изменения биоклиматического потенциала территории Беларуси / В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков. // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2017. – № 1. – С. 42–57.
5. Хитриков, М. А. Характеристика изменений биоклиматического потенциала Беларуси и сопредельных территорий Литвы и Украины за период 1977–2015 гг. / М. А. Хитриков // Природопользование. – 2018. – № 1. – С. 135–149.
6. Логинов, В. Ф. Прогноз изменения биоклиматического потенциала территории Беларуси на период 2016–2035 гг. / В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков. // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2018. – № 1. – С. 51–64.
7. World meteorological organization, Guide to meteorological instruments and methods of observations, 7th edition, Geneva, WMO, 2008, 716 p.
8. MODIS Vegetation Index Products (NDVI and EVI) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>. Date of access: 15.04.2019.
9. Лысенко С. А. Сеточный архив метеорологических данных для республики Беларусь и возможности его применения для исследования пространственно-временных особенностей изменений климата / С. А. Лысенко, В. Д. Чернышев, В. В. Коляда // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 17–27.
10. Python Programming Language [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.python.org>. Date of access: 05.03.2019.
11. NumPy package for scientific computing [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.numpy.org>. Date of access: 11.03.2019.
12. Matplotlib Python plotting library [Electronic resource]. – Mode of access: <https://matplotlib.org>. Date of access: 15.03.2019.
13. Matplotlib Basemap Toolkit [Electronic resource]. – Mode of access: <https://matplotlib.org/basemap/>. Date of access: 20.03.2019.
14. netCDF4 module for Python documentation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://unidata.github.io/netcdf4-python/netCDF4/index.html>. Date of access: 12.03.2019.
15. Pandas Data Analysis Library [Electronic resource]. – Mode of access: <https://pandas.pydata.org>. Date of access: 28.03.2019.
16. HadCRUT4 Global Temperature Dataset [Electronic resource]. – Mode of access: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>. Date of access: 30.04.2019.
17. Нацыянальны атлас Рэспублікі Беларусь / Белкартаграфія ; пад рэд М. У. Мясніковіча. – Мінск : Белкартаграфія, 2002. – 292 с.
18. Атлас опасных метеорологических явлений на территории Беларуси : учеб. пособие / В. Ф. Логинов [и др.]. – М.: Мещерский филиал ВНИИГМ им. А. Н. Костякова, 2018. – 58 с.

Поступила 02.07.2019

В. В. Божкова¹, Л. М. Болотько¹, А. М. Людчик¹, П. Н. Павленко², С. Д. Умрейко¹

¹Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ, Минск, Беларусь, e-mail: hamster3991@mail.ru, nomrec@bsu.by, liudchikam@tut.by, umreiko@tut.by

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: pavlenko_pn@mail.ru

КЛИМАТИЧЕСКАЯ НОРМА ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В ЧИСТОЙ АТМОСФЕРЕ БЕЛАРУСИ

На основании наблюдений за концентрациями приземного озона и антропогенных загрязнителей воздуха в городах определена климатическая норма приземного озона в условиях свободной от антропогенных загрязнений «чистой» атмосферы и среднего климата Беларуси. Предполагается, что именно такая норма должна служить «точкой отсчета» для учета влияния метеорологических и антропогенных факторов на приземный озон, а также оценки его долговременных изменений (тренда) в пределах небольшой по территории страны. Задача решается с помощью полученной ранее зависимости концентрации озона от метеорологических условий и концентраций антропогенных загрязнителей, контролируемых на пунктах мониторинга атмосферного воздуха, расположенных в областных центрах. Детально описаны методика расчетов и используемые приближения. Полученные результаты сравниваются с наблюдениями в Березинском биосферном заповеднике.

Ключевые слова: приземный озон, антропогенное загрязнение воздуха, климатическая норма, уравнение регрессии

V. V. Bozhkova¹, L. M. Bolotsko¹, A. M. Liudchik¹, P. N. Pavlenko², S. D. Umreiko¹

¹National Ozone Monitoring Research Centre of Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: hamster3991@mail.ru, nomrec@bsu.by, liudchikam@tut.by, umreiko@tut.by

²Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: pavlenko_pn@mail.ru

CLIMATIC NORM OF SURFACE OZONE IN CLEAR ATMOSPHERE OF BELARUS

Based on observations of concentrations of surface ozone and anthropogenic air pollutants in cities, the climatic normal of surface ozone was determined under conditions of Belarusian typical climate and "clear" atmosphere free from anthropogenic pollution. One has assumed that such a norm should serve as the "reference point" to take account of the influence of meteorological and anthropogenic factors on surface ozone and to assess its long-term changes (trend) over the country with a relatively small territory. The problem is addressed by using the previously revealed dependence of ozone concentration on meteorological conditions and on concentrations of anthropogenic pollutants being measured at the sites for monitoring atmospheric air located in the regional centers. The computation technique and approximations employed are both described in detail. The obtained results are compared to the observations conducted at the Berezinsky Biosphere Reserve.

Keywords: surface ozone, anthropogenic air pollution, climatic normal, regression equation

В. У. Бажкова¹, Л. М. Балацько¹, А. М. Людчык¹, П. М. Паўленка², С. Дз. Умрэйка¹

¹Нацыянальны навукова-даследчы цэнтр маніторынгу азонасферы БДУ, Мінск, Беларусь, e-mail: hamster3991@mail.ru, nomrec@bsu.by, liudchikam@tut.by, umreiko@tut.by

²Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь, e-mail: pavlenko_pn@mail.ru

КЛІМАТЫЧНАЯ НОРМА ПРЫЗЕМНАГА АЗОНУ ў ЧЫСТАЙ АТМОСФЕРЫ БЕЛАРУСІ

На падставе назіранняў за канцэнтрацыямі прыземнага азону і антрапагенных забруджвальнікаў паветра ў гарадах вызначаная кліматычная норма прыземнага азону ва ўмовах свабоднай ад антрапагенных забруджванняў «чыстай» атмасферы і сярэдняга клімату Беларусі. Мяркуецца, што менавіта гэтая норма можа служыць зыходным пунктам для ўліку ўплыву метэаралагічных і антрапагенных фактараў на прыземны озон, а таксама ацэнкі яго доўгачасовых змяненняў (трэнду) у межах невялікай па тэрыторыі краіны. Задача вырашаецца з дапамогай атрыманай раней залежнасці канцэнтрацыі азону ад метэаралагічных умоў ды канцэнтрацыяў антрапагенных забруджвальнікаў, якія кантралююцца на станцыях маніторынгу атмасфернага паветра ў абласных гарадах. Дэталёва апісаная методыка разлікаў і выкарыстання прыбліжэнняў. Атрыманая вынікі параўноўваюцца з вынікамі назіранняў у Бярэзінскім біясферным заповедніку.

Ключавыя словы: прыземны озон, антрапагеннае забруджванне паветра, кліматычная норма, ураўненне рэгрэсіі

Введение. Приземный озон является весьма опасным вторичным загрязнителем воздуха, оказывающим угнетающее воздействие на растительность и живые организмы. Его присутствие в приземном слое воздуха обусловлено фотохимическими реакциями с участием первич-

ных естественных и антропогенных загрязнителей атмосферы, а также вертикальным обменом воздухом за счет термической конвекции и турбулентного перемешивания с более высокими слоями тропосферы, содержащими озон стратосферного происхождения. Основным источником озона у поверхности земли является реакция фотохимического разложения диоксида азота и последующее соединение высвобожденного атома кислорода с молекулой кислорода [1–3]. В отсутствие оксидов азота генерация озона у поверхности земли невозможна и его наличие тогда можно объяснить только процессами переноса и вертикального обмена. На самом деле оксиды азота естественного и антропогенного происхождения всегда присутствуют в приземном воздухе, поэтому процессы генерации и разрушения озона при наличии солнечного излучения происходят повсеместно и это является одной из основных причин выраженного сезонного и суточного хода концентрации приземного озона.

Концентрация озона в месте наблюдений сильно зависит от наличия прекурсоров озона – загрязнителей атмосферы, взаимодействующих с озоном и способных стимулировать его генерацию. В связи с этим общепринятой является классификация пунктов наблюдений в зависимости от места их расположения: удаленные, сельские, пригородные и городские [4].

В то же время исследователи согласны с тем, что наблюдаемая разница в концентрациях озона на пунктах наблюдений разных типов (иногда расположенных достаточно близко друг к другу) обусловлена исключительно различиями в составе первичных загрязнителей и степени загрязнения воздуха [1, 5]. В связи с этим заслуживает внимания гипотеза об однородности поля приземного озона в пределах одной воздушной массы [7–9]. Местные различия в метеоусловиях и специфика естественных и антропогенных загрязнений, взаимодействующих с озоном, «модулируют» это поле, являясь причиной локальных флуктуаций концентрации озона относительно ее естественного суточного хода и основанием для упомянутой выше классификации пунктов наблюдений.

Сказанное согласуется с результатами исследований, представленных в [1, 10]: наблюдаемая концентрация «окислителя» $O_x = O_3 + NO_2$ включает в себя региональную и локальную компоненты, причем первая составляющая практически совпадает с региональным фоновым уровнем концентрации приземного озона (типичным для конкретной воздушной массы), а вторая составляющая коррелирует с уровнем локального загрязнения воздуха первичными загрязнителями, чаще всего антропогенного происхождения. Для региональной составляющей характерны такие особенности, как сезонный и суточный ход, очень похожие на наблюдаемые в местностях с низким уровнем антропогенного загрязнения воздуха. На протяжении всего года существует также сезонная и суточная изменчивость локальной составляющей, что отражает влияние на нее фотохимической активности солнечного излучения и изменчивости концентраций прекурсоров [1].

Согласно гипотезе [7–9], концентрации озона в пределах небольшой по сравнению с размерами воздушных масс территории страны должны чаще всего (за исключением случаев прохождения атмосферных фронтов) быть близкими, если из измеренных значений исключить влияние различающихся метеорологических условий и уровней антропогенного загрязнения воздуха в местах наблюдений. В частности, для Беларуси скорректированные на случай одинаковых метеоусловий – усредненные по территории климатических норм метеопараметров – значения концентрации озона в свободной от влияющих на озон локальных антропогенных загрязнений атмосфере должны быть репрезентативными для всей территории страны, по крайней мере в периоды, когда она находится под воздействием одной воздушной массы.

В связи с этим имеет смысл ввести в употребление и использовать на практике термин «климатическая норма приземного озона для чистой атмосферы и среднего климата Беларуси». Именно такая норма должна служить «точкой отсчета» для учета влияния метеорологических и антропогенных факторов на приземный озон, а также оценки его долговременных изменений (тренда).

Задача определения климатической нормы приземного озона в «чистой» атмосфере Беларуси могла бы быть легко решена при наличии достаточно длинных рядов измерений на разветвленной сети пунктов наблюдений, расположенных в сельской местности. Измерения

в таких условиях наиболее близко соответствуют предложенному определению. Оставалось бы только скорректировать их на случай «нормальных» метеорологических условий, отвечающих среднему климату страны.

Проблема, однако, заключается в том, что в настоящее время только один пункт, находящийся в Березинском биосферном заповеднике, может быть отнесен к категории сельских. К тому же ряды наблюдений в заповеднике пока весьма коротки и содержат значительные пропуски в качественных данных. Следует также отметить, что даже при наличии сети пунктов в сельской местности и достаточно длинных рядов наблюдений остается нерешенной задача учета различающихся в разных пунктах метеорологических условий, влияющих на измеряемые концентрации озона [5, 11, 12]. Возможно, такие различия чаще всего оказываются незначительными, однако концепция «чистой» нормы озона предполагает, что эта норма определяется для некоторых осредненных метеорологических условий, отличие которых от реально наблюдаемых в момент измерений может быть весьма существенным. Иными словами, в любом случае необходима коррекция результатов измерений концентрации озона с учетом отклонения реальных метеоусловий в пункте наблюдений от заданных средних.

В представленной публикации задача определения «чистой» климатической нормы приземного озона в Беларуси решается посредством коррекции данных наблюдений за озоном и антропогенными загрязнителями воздуха в областных городах Беларуси. Это весьма оригинальный подход к определению нормы озона в «чистой» атмосфере на основании измерений в заведомо «грязном» воздухе. Он стал возможен после решения задачи об отклонении наблюдаемой концентрации озона от его климатической нормы в зависимости от метеорологических условий и антропогенного загрязнения воздуха [8, 9]. Поскольку используемая в расчетах отклонений норма озона в «чистой» атмосфере заранее неизвестна, задача решается методом последовательных приближений. Полученные результаты сравниваются с данными наблюдений в Березинском биосферном заповеднике.

Обоснование подхода. Прежде всего следует четко определить используемый термин «чистая атмосфера». Выше говорилось об осредненных по территории страны метеорологических параметрах. Однако детальные (с учетом суточного хода) климатические нормы метеопараметров, отвечающие средним метеорологическим условиям на территории Беларуси, не известны, хотя их возможно получить. С другой стороны, совершенно не принципиально, какой конкретно заранее заданной погоде будет отвечать полученная «чистая» норма озона, если есть возможность учесть влияние реальных метеорологических условий и концентраций антропогенных загрязнений для оценки ожидаемой в данном месте концентрации озона. В данном исследовании в качестве «средних» с некоторыми изменениями использованы полученные в [13–15] климатические нормы метеопараметров для находящегося в центре страны г. Минска.

Понятие «чистой» атмосферы не подразумевает полное отсутствие прекурсоров озона. В частности, генерация приземного озона, инициированная солнечным излучением, происходит только в присутствии оксидов азота. И их концентрации всегда отличны от нуля даже в удаленных от промышленных центров районах. Оксиды азота в сельской местности могут иметь естественное или антропогенное происхождение, а также приноситься с воздушными массами из загрязненных районов. Однако их концентрации, как правило, значительно ниже, чем в городах. В связи с этим полагается, что в условиях «чистой» атмосферы концентрации угарного газа и антропогенных летучих органических соединений, регистрируемых на пунктах мониторинга атмосферного воздуха [9], равны нулю, а концентрации NO и NO₂ равны многолетним среднегодовым значениям для Березинского заповедника 2,2 и 1,85 ppb соответственно. Летучие органические соединения естественного происхождения, присутствующие в разной степени повсеместно и неконтролируемые на пунктах мониторинга, также включаются в определение «чистой» атмосферы.

К настоящему времени имеются достаточно длинные ряды наблюдений за приземным озоном в областных городах Беларуси. Понятно, что измерения в городах в значительной степени искажены по сравнению с «чистой» атмосферой присутствием в воздухе антропогенных

загрязнений, способных взаимодействовать с озоном и изменять его концентрацию. Поэтому непосредственно использовать городские измерения для определения климатической нормы приземного озона в «чистой» атмосфере не представляется возможным. Однако эти измерения можно «исправить» с помощью полученной в [8, 9] зависимости концентрации озона от метеоусловий и антропогенных загрязнений.

Если бы названная зависимость была известна точно, то можно было бы точно рассчитать вклады в измеренные концентрации озона за счет отклонения метеоусловий от заданных средних значений и отличных от нуля концентраций антропогенных загрязнений. Иными словами, измеренные концентрации озона без затруднений можно было бы скорректировать на случай «нормальных» метеоусловий и «чистой» атмосферы. На самом деле следует принимать во внимание следующие обстоятельства, усложняющие решение задачи.

Уравнение регрессии, используемое для определения зависимости наблюдаемой концентрации озона от метеоусловий и антропогенных загрязнений, лишь приближенно воспроизводит данные наблюдений [8, 9], и это может служить источником ошибок при расчете климатической нормы озона в «чистой» атмосфере. Кроме того, определение параметров регрессии предполагает знание климатической нормы озона, относительно которой рассчитывается отклонение от нормы. Однако климатическая норма озона в «чистой» атмосфере для средней погоды заранее неизвестна. В связи с этим решение задачи усложняется и приходится применить метод последовательных приближений.

На первой итерации используется климатическая норма приземного озона, базирующаяся на результатах экспериментальных наблюдений в областных городах и, следовательно, подверженная влиянию антропогенных загрязнений. С помощью уравнения регрессии, определенного на основании названной нормы, рассчитывается приближенное значение отклонения каждого измеренного значения концентрации озона от нормы и вычитается из результата измерений. Далее полученная разность складывается с рассчитанным по уравнению регрессии ожидаемым отклонением от используемой нормы озона, когда значения объясняющих переменных отвечают условиям «чистой» атмосферы. В результате измеренное значение корректируется на случай «чистой» атмосферы. Предложенная методика частично компенсирует несовершенство уравнения регрессии за счет вычитания результатов расчета двух отклонений друг из друга.

Исправленный таким образом ряд измерений используется для расчета первого приближения к климатической норме озона в «чистой» атмосфере. Далее рассчитываются новые коэффициенты уравнения регрессии, оценивающего отклонения измерений концентрации озона от новой нормы. Следующая итерация базируется на полученной норме озона и новых коэффициентах регрессии. Процедура повторяется до достижения самосогласования: новый расчет «чистой» климатической нормы озона не отличается от предыдущего. Вычисления по предложенной схеме показывают, что для получения окончательного результата требуется менее 10 итераций.

Уравнение регрессии. Несколько лет назад была предложена и опробована статистическая методика учета влияния метеоусловий и антропогенных загрязнителей воздуха на концентрацию приземного озона. Проведенные расчеты основывались на данных наблюдений пунктов мониторинга атмосферного воздуха в четырех районах г. Минска, различающихся по степени антропогенного загрязнения. Методика базируется на вполне обоснованных предположениях, допускающих дальнейшее уточнение, и сводится к определению коэффициентов уравнения регрессии, связывающего величину отклонения концентрации приземного озона от ее климатической нормы со значениями метеопараметров и концентрациями антропогенных загрязнителей воздуха. Расчеты показали удовлетворительное соответствие с результатами наблюдений. В дальнейшем методика совершенствовалась, а ряды данных расширялись, что способствовало уточнению описания названной зависимости. Детальное обоснование методики приведено в работах [8, 9]. Здесь дается краткое ее описание, дополненное несколькими существенными замечаниями по поводу ее применимости.

Исходя из самых общих соображений, концентрацию приземного озона можно представить в виде нелинейной функции от всей совокупности факторов, оказывающих влияние на озон. Время (если отвлечься от весьма коротких периодов, необходимых для установления химического равновесия между реагентами) не входит в эту функцию в явном виде, а изменение концентрации озона со временем обусловлено только зависимостью от него переменных функции. К сожалению, ни сама функция, ни полный набор определяющих концентрацию озона переменных неизвестны. Представим эту функцию в виде разложения в ряд Тэйлора:

$$O_3(x) = O_3(X) + \sum_i c_i (x_i - X_i) + (1/2) \sum_{i,j} c_{ij} (x_i - X_i)(x_j - X_j) + \dots \quad (1)$$

где $\{x\}$ – совокупность переменных, являющихся количественными оценками различных факторов, которые влияют на озон, $\{X\}$ – совокупность значений переменных, соответствующих точке в многомерном пространстве переменных, около которой осуществляется разложение. Коэффициенты c – частные производные от функции по соответствующим переменным:

$$c_i = (\partial O_3 / \partial x_i) \Big|_X, \quad c_{ij} = (\partial^2 O_3 / \partial x_i \partial x_j) \Big|_X.$$

Сразу следует сделать замечание по поводу справедливости уравнения (1). В число переменных, входящих в (1), включены скорость ветра и интенсивность вертикального обмена. Обе переменные осуществляют связь с состоянием (составом) атмосферы, находящейся на некотором расстоянии от места наблюдений. Очевидно, что предложенное описание зависимости концентрации приземного озона от названных переменных является некорректным. Действительно, следовало бы использовать в качестве исходного уравнение движения жидкости с учетом адвективных составляющих полной производной по времени от концентрации приземного озона. Однако это существенно усложняет решение основной задачи из-за необходимости учета пространственного распределения переменных и его динамики. В такой ситуации задача перестает быть локальной и требует привлечения значительно большего объема данных.

Возможность обойти указанное препятствие появляется в случае существенного ограничения применимости уравнения (1). В частности, проводимое исследование ограничивается рассмотрением ситуации в крупных городах, в которых концентрация озона обычно меньше, чем в сельской местности. Это позволяет предположить, что горизонтальный перенос ветром просто увеличивает концентрацию приземного озона в городе и может быть приближенно описан в рамках уравнения (1), не привлекая данных о полях приземного озона в окрестности городов. Если бы в анализ включались данные из удаленных от городов пунктов наблюдений, очевидно, такой подход оказался бы неприемлемым. Аналогично предполагается, что вертикальный обмен воздухом увеличивает концентрацию приземного озона за счет притока воздуха из более высоких слоев с более высокой концентрацией озона. Такое предположение оказывается не всегда верным. К тому же точно неизвестна концентрация озона «наверху», хотя она подвержена довольно слабым изменениям. Следовательно, используемое предположение также является весьма грубым. Введенные предположения и ограничения являются «платой» за возможность «локализовать» проблему в одной точке пространства без учета окружающего поля озона и таким образом оправдать возможность использования выражения (1) для описания концентрации приземного озона в зависимости от метеорологических условий и концентраций прекурсоров озона в месте наблюдений.

Чем меньше «расстояние» между точками $\{x\}$ и $\{X\}$, тем короче может быть длина разложения (1) для удовлетворительного приближения функции $O_3(x)$. В качестве координат такой «точки отсчета» удобно выбрать значения, отвечающие климатическим нормам переменных $\{x\}$, около которых флуктуируют реальные значения переменных. Можно показать, что в этом случае значение $O_3[X(t)]$ отличается от климатической нормы озона $\bar{O}_3(t)$ на величину второго порядка малости [9].

В случае выбора в качестве параметров $\{X\}$ климатических норм соответствующих переменных в первом приближении можно ограничиться учетом членов разложения до второго порядка включительно. Это действительно первое приближение, поскольку бесспорно наличие

взаимовлияния между отдельными переменными x_i и нелинейной зависимости концентрации приземного озона от этих переменных.

Заменяя неизвестную функцию $O_3[X(t)]$ в (1) на климатическую норму приземного озона $\bar{O}_3(t)$, для отклонения концентрации озона от нормы можно записать:

$$\Delta O_3[x(t)] = O_3[x(t)] - \bar{O}_3(t) = \sum_i c_i (x_i - X_i) + (1/2) \sum_{i,j} c_{ij} (x_i - X_i)(x_j - X_j) + \varepsilon_2(t), \quad (2)$$

где $\varepsilon_2(t)$ – поправки второго порядка малости из-за неравенства $O_3[X(t)]$ и $\bar{O}_3(t)$ и из-за игнорирования членов разложения более высоких порядков.

В дальнейшем значения производных, входящих в разложение (2), оцениваются посредством статистического анализа результатов наблюдений за концентрацией приземного озона, погодой и уровнем загрязнения воздуха в различных городах Беларуси. Для аппроксимации разложения (2) используется уравнение множественной линейной регрессии:

$$\Delta O_3 = a_0 z_0 + \sum_{i=1}^M a_i z_i, \quad (3)$$

где ΔO_3 – отклонение концентрации приземного озона от климатической нормы; a_i – коэффициенты регрессии; z_i – объясняющие переменные; $M+1$ – полное число переменных. Коэффициент a_0 введен для приближенной компенсации отклонения $O_3[X(t)]$ от $\bar{O}_3(t)$, а также осредненного влияния неучтенных факторов. Соответствующая этому коэффициенту переменная введена ради унификации алгоритма расчета и на самом деле является постоянной: $z_0 \equiv 1$.

В качестве основных переменных в регрессионную модель включены регистрируемые на пунктах мониторинга атмосферного воздуха концентрации оксидов азота, углерода, летучих органических соединений (бензола, толуола, ксилола) и некоторые метеорологические параметры. Часть метеопараметров в настоящее время не регистрируется на метеостанциях Беларуси. К ним относятся вертикальная устойчивость атмосферы в пограничном слое и фотохимическая активность солнечного излучения. Для оценки вертикальной устойчивости использованы прогностические расчеты, а фотохимическая активность излучения оценивается полуэмпирически с учетом значений некоторых измеренных метеорологических параметров [9].

Полный список основных объясняющих переменных включает: температуру и абсолютную влажность воздуха; фотохимическую активность солнечной радиации; скорость ветра; вертикальную устойчивость атмосферы; концентрацию CO, NO₂, NO; общую концентрацию антропогенных летучих органических соединений (сумму контролируемых на пунктах наблюдений концентраций бензола, толуола, ксилола). Это еще одно приближение, поскольку эффективность влияния на озон индивидуальна для каждого из веществ и корректнее было бы складывать их концентрации с соответствующими весовыми множителями [3], однако такие данные в настоящее время отсутствуют.

В уравнении регрессии в качестве основных объясняющих переменных фигурируют не сами названные выше параметры, а их отклонения от климатических норм, определенных для г. Минска. Для контролируемых на пунктах мониторинга атмосферного воздуха антропогенных загрязнений в качестве их нормы используются нулевые значения концентраций.

Безусловно, имеются и другие факторы, оказывающие влияние на концентрацию приземного озона. В частности, известны такие реагирующие с озоном загрязнители, как метан, формальдегид, изопрены, терпены и др. [16]. Однако в настоящее время экспериментальные данные о концентрациях таких загрязнителей воздуха отсутствуют, поэтому список ограничен приведенным выше набором.

Для получения оценок величин производных второго порядка, входящих в разложение (2), в список объясняющих переменных уравнения регрессии включаются дополнительно парные произведения и квадраты перечисленных выше основных переменных. Как отмечалось ранее, члены разложения второго порядка описывают реально существующие физические эффекты (например, влияние температуры на скорость разрушения озона при взаимодействии с оксидами азота, зависимость эффективности взаимодействия озона с прекурсорами от уровня солнечной радиации и т.п.). Ясно, что для обеспечения адекватности регрессионной модели

присутствие указанных дополнительных переменных обязательно. Авторы включили в список объясняющих переменных также произведения трех и даже четырех некоторых основных объясняющих переменных, чтобы полнее учесть существенную нелинейность зависимости концентрации приземного озона от основных переменных.

Коэффициенты уравнения регрессии в общем случае зависят от сезона и времени суток. Однако можно предположить, что основная часть сезонной и суточной изменчивости приземного озона удовлетворительно описывается поведением его климатической нормы, и считать коэффициенты a , постоянными. Допустимость такого предположения проверена посредством численного эксперимента.

Использовались все доступные данные измерений только для г. Минска и определенная ранее климатическая норма приземного озона [17, 18]. Оценивалось изменение величины объясненной уравнением регрессии дисперсии при сокращении периода наблюдений с целого года до двух сезонов, наиболее важных с точки зрения потенциальной опасности высоких концентраций приземного озона – весны и лета. В случае явной зависимости коэффициентов регрессии от сезона можно ожидать заметного увеличения объясненной дисперсии при сокращении рассматриваемого периода, а также изменения значений коэффициентов уравнения регрессии. Проведенные расчеты показали, что выигрыша в объясненной дисперсии при ограничении анализа только весенне-летним периодом не происходит. Также не обнаружена заслуживающая внимания зависимость коэффициентов уравнения регрессии от сезона. Проверить предположение о стабильности коэффициентов регрессии на протяжении суток значительно сложнее, и такая проверка не проводилась.

«Чистая» норма озона. Ранее отмечено, что климатическая норма приземного озона в «чистой» атмосфере определяется для минской нормы погоды. Это не совсем так. Причина заключается в «локализации» зависимости концентрации озона от метеопараметров, а именно, скорости ветра. При обосновании уравнения регрессии было использовано предположение, что сильный ветер увеличивает концентрацию озона в городах за счет переноса воздуха из районов, незагрязненных антропогенными выбросами. Для этих районов обычно характерны более высокие концентрации озона. Это предположение действительно подтверждается расчетами при использовании «городских» данных: коэффициент корреляции озона с отклонением скорости ветра от минской нормы получается положительным, хотя и совсем незначительным. Однако в «чистой» атмосфере следует ожидать независимости озона от скорости ветра, поскольку воздух, приходящий с ветром, такой же, как и в месте наблюдений. Следовательно, абсолютно некорректно использовать отличную от нуля минскую климатическую норму скорости ветра в качестве параметра при расчете концентрации озона в «чистой» атмосфере на основании уравнения регрессии для городских условий: в «городском» уравнении ветер увеличивает концентрацию озона. Рационально в этом случае положить скорость ветра равной нулю. В отличие от ветра, эффективность влияния на приземный озон вертикального перемешивания воздуха слабо зависит от места наблюдений.

Для расчета коэффициентов уравнения регрессии и климатической нормы приземного озона в «чистой» атмосфере над территорией Беларуси использованы отнесенные к метеорологическим срокам 55615 наблюдений за концентрацией озона и антропогенными загрязнителями во всех областных центрах страны в период 2012–2018 гг. (не со всех пунктов наблюдений получены данные за весь указанный период). Для этого данные ежечасных измерений концентраций усреднялись около метеорологических сроков.

Климатическая норма приземного озона представляется в виде разложения в ряд Фурье [16]:

$$\bar{O}_3(t) = \sum_{j=1}^Q q_j f_j(t), \quad (3)$$

где $f_j(t) = \varphi_{p(j)}(T, t) \varphi_{r(j)}(H, t)$, $Q = (2M+1)(2N+1)$, t – время от начала года, а значения индексов p и r определяются по формулам: $r = (j-1)/(2N+1) + 1$, $p = j - (2N+1)(r-1)$.

В выражении для индекса r подразумевается целая часть дроби. Параметры T и H равны длительности года и суток, M и N задают длину разложения для описания сезонной и суточной изменчивости нормы соответственно. Функция $\varphi_m(X, t)$ определяется следующим образом:

$$\varphi_m(X, t) = \begin{cases} \sin(2\pi st / X), & \text{если индекс } m \text{ четный,} \\ \cos(2\pi st / X), & \text{если индекс } m \text{ нечетный,} \\ s = \text{целая часть } (m/2). \end{cases}$$

Коэффициенты разложения определяются посредством минимизации среднеквадратичного отклонения нормы от всей совокупности данных наблюдений на пунктах мониторинга атмосферного воздуха. Ввиду ограниченности рядов измерений многолетний тренд нормы озона не оценивался в отличие от [9], где такую возможность для определения «грязной» климатической нормы приземного озона в г. Минске обеспечивали учет более ранних наблюдений за озоном, не сопровождавшихся измерениями антропогенных загрязнений, и привлечение дополнительных данных с прибалтийской станции Преяла.

В таблице приводятся значения полученных коэффициентов разложения климатической нормы приземного озона для «чистой» атмосферы на территории Беларуси. Параметры разложения: $M=3, N=3$. Слева от численных значений указаны порядковые номера коэффициентов разложения (индекс j в выражении (3)).

Коэффициенты q_j разложения (3)

1	29,217	2	5,852	3	-6,871	4	0,509	5	-1,116	6	-1,285	7	1,030
8	-4,557	9	-0,557	10	3,875	11	-0,471	12	0,339	13	0,455	14	-0,436
15	-4,277	16	-0,169	17	2,682	18	0,144	19	0,155	20	0,250	21	-0,487
22	0,863	23	0,021	24	-0,111	25	0,391	26	-0,655	27	-0,047	28	0,414
29	0,442	30	-0,246	31	0,209	32	0,158	33	-0,191	34	0,079	35	0,019
36	0,311	37	0,154	38	-0,836	39	-0,015	40	0,026	41	-0,220	42	0,226
43	0,074	44	-0,054	45	0,027	46	-0,058	47	-0,241	48	-0,035	49	0,020

На рис. 1 показано сравнение рассчитанных значений климатических норм среднесуточных концентраций приземного озона в городах («грязная» норма) и в условиях «чистой» атмосферы («чистая» норма). Результаты вполне ожидаемы, поскольку регистрируемые значения параметров антропогенного загрязнения городского воздуха в Беларуси соответствуют сценарию подавления генерации озона [2]. На этом же рисунке показаны среднемесячные значения концентрации озона в Березинском заповеднике, определенные по данным наблюдений в 2017–2018 гг. Заметные отличия от «чистой» нормы в первой половине года, возможно, обусловлены неполным списком антропогенных загрязнений, учтывавшихся при расчете «чистой» нормы. Большой интерес вызывает июльский провал концентрации озона в заповеднике, повторяющийся в течение двух лет подряд. Если это явление окажется стабильным и в последующие годы, то следует искать ему объяснение.

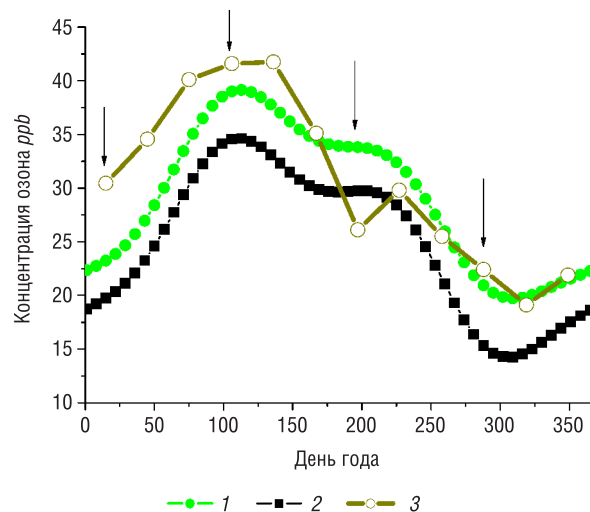


Рис. 1. Годовой ход фонтовых (региональных) среднесуточных концентраций приземного озона над Беларусью («чистая» норма, 1) в сравнении с ходом в областных центрах («грязная» норма, 2) и среднемесячные значения в Березинском заповеднике по данным наблюдений в 2017–2018 гг. (3). Стрелками отмечены дни, соответствующие середине сезонов

Суточный ход «чистой» и «грязной» норм 15 января, 15 апреля, 15 июля и 15 октября, приведен на рис. 2. Как видно из рисунка, «чистая» норма приближается к «грязной» в ночное время суток. Это особенно характерно для осенне-зимнего периода. Уменьшается также глубина утреннего и вечернего провалов в суточном ходе концентрации озона, вызванных увеличением степени антропогенного загрязнения городского воздуха в это время. Это вполне естественно для случая «чистой» атмосферы и подтверждает качественно верный характер полученного решения. На этом же рисунке приведен суточный ход приземного озона в Березинском заповеднике, усредненный по сезонам 2017–2018 гг.

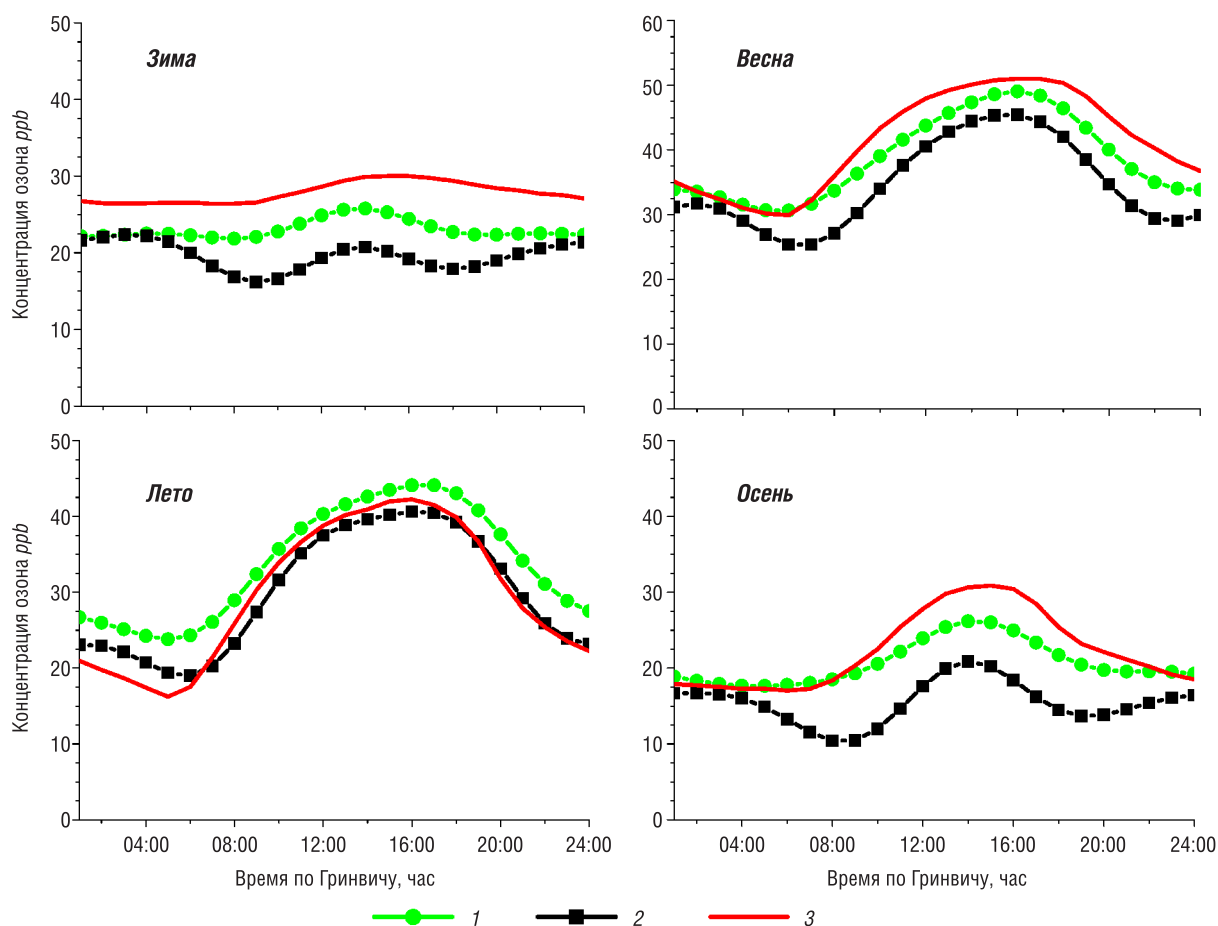


Рис. 2. Суточный ход климатической нормы приземного озона в середине каждого сезона: 1 – «чистая» норма, 2 – «грязная» норма, 3 – суточный ход приземного озона в Березинском заповеднике, усредненный по сезонам 2017–2018 гг.

Заключение. На основании наблюдений в областных городах Беларуси получена климатическая норма приземного озона в «чистой» атмосфере, свободной от антропогенных загрязнений, контролируемых системой мониторинга атмосферного воздуха. Для этого с помощью полученной ранее зависимости концентрации приземного озона от антропогенных загрязнений было исключено их влияние на результаты измерений. Результаты измерений были также скорректированы с учетом отличия реальных метеоусловий от среднего климата Беларуси. Полученная норма сравнивается с наблюдениями в Березинском биосферном заповеднике.

С одной стороны, расчет климатической нормы озона в «чистой» атмосфере на основании измерений в «грязных» городах сопряжен с ошибками, вызванными погрешностями при нахождении зависимости концентрации приземного озона от метеоусловий и антропогенных загрязнений, а также неполнотой списка учитываемых антропогенных загрязнителей. С другой стороны, наблюдения в Березинском заповеднике не в полной мере отвечают оговоренным условиям

«чистой» атмосферы. Ожидать полного совпадения результатов, полученных на основании измерений в разных местах и по-разному обработанных, очевидно, не приходится. Тем не менее, их сравнение свидетельствует о непротиворечивости использованной методики.

Список использованных источников

1. Clapp, L. J. Analysis of the Relationship between Ambient Levels of O₃, NO₂ and NO as a Function of NO_x in the UK / L. J. Clapp, M. E. Jenkin // *Atmospheric Environment*. – 2001. – Vol. 35. – P. 6391–6405. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00378-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00378-8)
2. Sillman, S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments / S. Sillman // *Atmospheric Environment*. – 1999. – Vol. 33. – P. 1821–1845.
3. Kleinman, L. I. The dependence of tropospheric ozone production rate on ozone precursors / L. I. Kleinman // *Atmospheric Environment*. – 2005. – Vol. 39. – P. 575–586.
4. Directive 2002/3/EC of the European Parliament and of the Council of 12 February 2002 relating to ozone in ambient air // *Official Journal of the European Communities*. – 9.3.2002. – P. L67/14–L67/30.
5. The impact of weather and atmospheric circulation on O₃ and PM₁₀ levels at a rural mid-latitude site / M. Demuzere [et al.] // *Atmos. Chem. Phys.* – 2009. – Vol. 9. – P. 2695–2714.
6. Lyapina, O. Cluster analysis of European surface ozone observations for evaluation of MACC reanalysis data / O. Lyapina, M. G. Schultz, A. Hense // *Atmos. Chem. Phys.* – 2016. – Vol. 16. – P. 6863–6881. doi:10.5194/acp-16-6863-2016
7. Role of Ozone Deposition in the Occurrence of the Spring Maximum / A. Liudchik [et al.] // *Atmosphere-Ocean*. – 2015. – Vol. 53. – N 1. – P. 42–49. doi: 10.1080/07055900.2013.853284.
8. Флуктуации поля концентрации приземного озона, обусловленные меняющимися метеорологическими условиями и степенью загрязнения воздуха / Л. М. Болотко [и др.] // *Экологический вестник*. – 2016. – № 3. – С. 45–52.
9. Статистическая оценка антропогенного воздействия на приземный озон / А. М. Людчик [и др.] // *Природные ресурсы*. – 2015. – № 1. – С. 95–105.
10. Analysis of the Relationship between O₃, NO and NO₂ in Tianjin, China / S. Han [et al.] // *Aerosol and Air Quality Research*. 2011. – Vol. 11. – P. 128–139. doi: 10.4209/aaqr.2010.07.0055
11. Latini, G. Influence of meteorological parameters on urban and suburban air pollution / G. Latini, R. Cocci Grifoni, G. Passerini // *Air Pollution*. – 2002. – Vol. X. – P. 753–762.
12. Dawson, J. P. Sensitivity of ozone to summertime climate in the eastern USA: A modeling case study / J. P. Dawson, P. J. Adams, S. N. Pandis // *Atmospheric Environment*. – 2007. – Vol. 41. – P. 1494–1511. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.10.033
13. Людчик, А. М. Динамические климатические нормы и многолетние тренды метеопараметров для г. Минска / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин, Е. В. Комаровская // *Природные ресурсы*. – 2016. – № 1. – С. 64–71.
14. Людчик, А. М. Региональные особенности климата Беларуси и их изменение в последние десятилетия. I: температура и скорость ветра / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин, В. Я. Венчиков // *Природные ресурсы*. – 2017. – № 1. – С. 75–82.
15. Людчик, А. М. Региональные особенности климата Беларуси и их изменение в последние десятилетия. II: Влажность воздуха и облачность / А. М. Людчик, С. Д. Умрейко // *Природные ресурсы*. – 2017. – № 2. – С. 83–89.
16. Variability in surface ozone background over the United States: Implications for air quality policy / A. Fiore [et al.] // *Journal of geophysical research: Atmospheres*. – 2003. – Vol. 108. – No. D24. – P. 4787. doi: 10.1029/2003JD003855
17. Людчик, А. М. Многолетний тренд приземного озона / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин // *Природные ресурсы*. – 2014. – № 1. – С. 97–105.
18. Людчик, А. М. Климатология приземного озона в г. Минске / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин // *Природные ресурсы*. – 2014. – № 2. – С. 112–118.

Поступила 30.07.2019

В. Ф. Логинов, В. И. Мельник*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: v.melnik2016@mail.ru***ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ОСАДКОВ В БЕЛОРУССКОМ ПОЛЕСЬЕ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД**

Проведенные ранее исследования особенностей изменения количества осадков на территории Белорусского Полесья показали, что в период потепления (1989–2015 гг.) наблюдается тенденция увеличения количества осадков в восточной части Полесья (Гомельская область) по сравнению с западной (Брестская область) и по сравнению с климатической нормой (1961–1990 гг.). Установленные различия трудно объяснить влиянием физико-географических особенностей (широта, долгота, высота над уровнем моря) территории и требуют более глубоких оценок. Представлены результаты анализа количества осадков и тесноты связи (коэффициенты корреляции) количества осадков по станциям Гомельской области и станции Овруч (Украина) для различных периодов с различными типами атмосферной циркуляции в Северном полушарии по Б.Л. Дзердзеевскому. Исследовано влияние Словечанско-Овручского кряжа и лесных массивов на количество осадков на близлежащих станциях Лельчицы, Житковичи, Василевичи. Даны предварительные оценки изменения количества осадков на территории Гомельской области при прохождении южных циклонов. Показано, что увеличение количества осадков в Гомельской области в период потепления 1989–2013 гг. (по сравнению с Брестской областью) в большей степени обусловлено изменениями атмосферной циркуляции, а также большими площадями леса в Гомельской области.

Ключевые слова: Белорусское Полесье, изменение климата, осадки, колебания циркуляции атмосферы

V. F. Loginov, V. I. Melnik*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: v.melnik 2016@mail.ru***FEATURES OF CHANGES IN PRECIPITATION IN BELARUSIAN POLESIA IN MODERN PERIOD**

Earlier studies of changes in precipitation on the territory of Belarusian Polesia showed that during the warming period (1989–2015), there is a tendency to increase in precipitation in the eastern part of Polesia (Gomel Region) compared to the western part (Brest Region) and compared to the climatic norm (1961–1990). The established differences are difficult to explain by the influence of physiographic features (latitude, longitude, elevation above the sea level) of the territory and require deeper assessments. Research results according to precipitation and close ties in the area of settlements of Gomel Region and Ovruch station (Ukraine) for different periods with different types of atmospheric circulation in the Northern Hemisphere according to B. L. Dzerdzeevsky are presented. The influence of Slovechansko-Ovruchsky ridge and woodlands on the amount of precipitation at the nearby Lelchitsy, Zhitkovichi, Vasilevichi stations was investigated. The preliminary estimates of changes in precipitation in Gomel Region during the passage of southern cyclones are given. It is shown that the increase in precipitation in Gomel Region during the warming period of 1989–2013. (compared to Brest Region) is largely due to changes in the atmospheric circulation, as well as the large areas of forest in Gomel Region.

Keywords: Belarusian Polesia, climate change, precipitation, atmospheric circulation fluctuations

У. Ф. Логи́наў, В. І. Мельнік*Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь, e-mail: v.melnik 2016@mail.ru***АСАБЛІВАСЦІ ЗМЯНЕННЯ АПАДКАЎ У БЕЛОРУССКІМ ПАЛЕССІ Ў СУЧАСНЫ ПЕРЫЯД**

Праведзеныя раней даследаванні асаблівасцей змены колькасці ападкаў на тэрыторыі Беларускага Палесся паказалі, што ў перыяд пацяплення (1989–2015 гг.) назіраецца тэндэнцыя павелічэння колькасці ападкаў ва ўсходняй частцы Палесся (Гомельская вобласць) у параўнанні з заходняй (Брэсцкая вобласць) і ў параўнанні з кліматычнай нормай (1961–1990). Устаноўленыя адрозненні цяжка растлумачыць уплывам фізіка-геаграфічных асаблівасцей (шырата, даўгата, вышыня над узроўнем мора) тэрыторыі і патрабуюць больш глыбокіх адзнак. Прадстаўлены вынікі аналізу колькасці ападкаў і теснаты сувязі колькасці ападкаў па станцыях Гомельскай вобласці і станцыі Оўруч (Украіна) для розных перыядаў з рознымі тыпамі атмасфернай цыркуляцыі ў Паўночным паўшар'і па Б.Л. Дзердзеяўскаму. Даследаваны ўплыў Славечанска-Оўручскага кряжа і лясных масіваў на колькасць ападкаў на бліжэйшых станцыях: Лельчыцы, Жыткавічы, Васілевічы. Прыведзены папярэднія ацэнкі змены колькасці ападкаў на тэрыторыі Гомельскай вобласці пры праходжанні паўднёвых цыклонаў. Паказана, што павелічэнне колькасці ападкаў у Гомельскай вобласці ў перыяд пацяплення 1989–2015 гг. (у параўнанні з Брэсцкай вобласцю) у большай ступені абумоўлена зменамі атмасфернай цыркуляцыі, а таксама большымі плошчамі лесу ў Гомельскай вобласці.

Ключавыя словы: Беларускае Палессе, змяненне клімату, ападкі, ваганні цыркуляцыі атмасферы

Введение. При исследовании особенностей изменения количества осадков на территории Белорусского Полесья в различные периоды: до мелиорации, период активной (интенсивной) мелиорации и современный период потепления, было установлено, что в период потепления 1989–2015 гг., наблюдается тенденция увеличения количества осадков в восточной части Полесья (Гомельская область) по сравнению с западной (Брестская область) и по сравнению с климатической нормой (1961–1990) [1]. Установленные различия трудно объяснить влиянием физико-географических особенностей (широта, долгота, высота над уровнем моря) территории. Гомельская область имеет большую континентальность и количество осадков может здесь скорее уменьшаться. В то же время следует отметить некоторое увеличение лесистости в Гомельской области за последние десятилетия. Это приводит к увеличению шероховатости поверхности, а также к некоторому увеличению аэрозолей биогенного происхождения, что теоретически может привести к увеличению дополнительных ядер конденсации. Более вероятной причиной увеличения осадков в Гомельской области является изменение атмосферной циркуляции. Подтверждением этому являются выводы в работе [2], где указаны периоды, когда в восточной части Беларуси выпадало больше осадков, чем в западной и это объяснялось изменением форм атмосферной циркуляции.

Следует отметить, что исследования по оценке изменения количества осадков на территории Беларуси в зависимости от траекторий и количества южных циклонов практически отсутствуют. Основная трудность заключается в подборке таких синхронизированных данных, как направление и время движения циклонов, количество выпадающих осадков и др. по конкретным станциям. В работе [3] приведено количество южных циклонов, проходящих на территорию Беларуси за 1971–1981 гг., и определены основные пути их перемещения. При этом отмечено, что максимальное количество южных циклонов на территории Беларуси за указанный период наблюдалось в 1980 и 1981 гг., (соответственно 24 и 35). Указано, что южные циклоны приносят ежегодно 25–30 % годового количества осадков на территорию Беларуси. Особенно много южных циклонов проходило в Полесском регионе летом в 1980–1981 гг. Об этом свидетельствует увеличение количества осадков, особенно в июне–июле [2]. В работе [4] приведена сравнительная характеристика повторяемости циклонов различных траекторий над территорией Беларуси по данным трех видов реанализа (NCEP, Era-Interim, 20cR2) в зимний период 1949–2012 гг., где авторы пришли к выводу, что повторяемость южных циклонов за этот период снизилась. При этом отсутствие значимых трендов зимних осадков в сторону понижения на юге, которые можно было бы ожидать в связи со снижением количества южных циклонов, авторы объясняют компенсацией влаги из-за роста количества северных циклонов. Выполненные в последние годы в Белгидромете исследования особенностей перемещения южных циклонов по территории Республики Беларусь в современный климатический период (1995–2015 гг.) показали увеличение их количества. Причем количество циклонов с 2004 по 2013 г. почти в 2 раза превысило их количество, чем за 1995–2003 гг. При этом количество западных и ныряющих циклонов за этот период существенно не изменилось. Анализ внутригодовой повторяемости южных циклонов показал, что начиная с февраля–марта количество южных циклонов возрастало, достигая максимума в теплый период года с апреля по октябрь. Начало холодного периода (ноябрь) характеризовалось резким уменьшением повторяемости южных циклонов. Кроме того, в этой работе приведено распределение южных циклонов по сезонам года, а также наиболее повторяемые пути циклонов на территории Беларуси [5]. В работе [6] изменение осадков за весь период метеорологических наблюдений на Белорусском Полесье оценены в основном по данным станции Василевичи в связи с изменением циркуляционных эпох в Северном полушарии, разработанных Б. Л. Дзердзеевским [7]. Как известно, за период наличия карт погоды этого полушария (с 1899 г.) выделены три циркуляционные эпохи: две меридиональные (до 1915 г. и с 1957 г. по настоящее время) и одна зональная (1916–1956 гг.). Первая меридиональная циркуляционная эпоха в Северном полушарии – эпоха похолодания – проявилась на Белорусском Полесье в контрастности погодно-климатических условий: в чередовании засух и наводнений, аномальных летней жары и зимних холодов. При этом количество осадков увеличилось к концу

этой эпохи. Самыми влажными на Полесье оказались 1902–1916 гг.: в среднем за год выпадало 762 мм осадков с рекордным количеством в 1906 г. (1115 мм). С зональной циркуляцией воздушных масс (1916–1956 гг.), при которой в умеренных широтах циклоны перемещались с запада на восток, связано увеличение осадков на Полесье. По результатам инструментальных наблюдений на метеостанции Василевичи за 1925–1940 гг. в среднем за год выпадало 679 мм осадков. За вторую меридиональную эпоху (с 1957 г. по настоящее время) количество осадков составило в среднем 643 мм; при этом за период потепления 1989–2016 гг. наблюдается тенденция их увеличения до 677 мм. В настоящей работе получены новые данные по изменению осадков в Белорусском Полесье на примере Гомельской области за различные периоды с использованием данных различных типов атмосферной циркуляции в Северном полушарии по Б. Л. Дзердзеевскому.

Материалы и методы исследования. Для оценки изменения количества осадков в Гомельской области использованы данные наблюдений по станциям Житковичи, Лельчицы, Василевичи, Овруч (Украина) за различные периоды наблюдений: до потепления, начиная с 1950 г., и в период потепления 1989–2015 гг. (см. раздел «Результаты исследования и их анализ»), а также результаты исследований по изменению осадков на территории Белорусского Полесья [1]. Подсчитаны коэффициенты корреляции на указанных станциях за различные периоды для оценки синхронизации годового хода осадков. Для оценки изменения тесноты связи (коэффициенты корреляции) количества осадков между станциями за различные периоды использованы данные многолетних колебаний продолжительности различных групп атмосферной циркуляции в Северном полушарии по Б. Л. Дзердзеевскому [7] и данным ежедневного календаря последовательной смены элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) [8]. Используются данные по количеству южных циклонов [3, 5] для оценок изменения количества осадков на территории Гомельской области в различные периоды. Для оценок влияния Словечанско-Овручского кряжа, расположенного практически на границе Украины и Беларуси, на количество осадков на близлежащих станциях Лельчицы, Житковичи, Василевичи использованы многолетние ряды наблюдений за осадками на указанных станциях и станции Овруч (Украина), а также формулы расчета изменения количества осадков с высотой, изложенные в работах [10,11].

Результаты исследований и их анализ. Проанализированы выпавшие осадки по станциям Житковичи, Лельчицы, Василевичи, Овруч за различные периоды, а также подсчитаны коэффициенты корреляции на указанных станциях за эти периоды. Отдельно сравнивались осадки в периоды с различным количеством южных циклонов, проходивших через территорию Беларуси.

Для анализа различий осадков были использованы данные за следующие периоды: 1950–1988 гг. – период до потепления. Наиболее длинный ряд осадков взят с 1950 г., поскольку до 1950 г. на указанных станциях отмечались отдельные пропуски; 1989–2013 гг. – период потепления, учитывая, что на станции Лельчицы наблюдения за осадками были прекращены в 2014 г. Различие количества осадков за указанные периоды позволяет судить об их изменении до потепления и после.

Климатическая норма вычислена за период с 1960 по 1961 г.

1963–1983 гг. – период незначительных изменений суммарной продолжительности меридиональных южной и северной групп циркуляции в Северном полушарии по Б. Л. Дзердзеевскому; 1995–2013 гг. – период потепления, за который было подсчитано количество южных циклонов по территории Беларуси [5]; был условно разделен на два подпериода: 1995–2003 гг., когда среднее количество южных циклонов составляло ≤ 6 , и 2004–2013 гг. (рост количества циклонов) – при среднем количестве южных циклонов ≥ 11 ; 1971–2015 гг. – период, использовавшийся для оценки количества осадков при различном количестве южных циклонов (меньше 11 за год и 11 и более за год). Данные по количеству циклонов взяты из работ [3, 5]. Основные данные результатов приведены в табл. 1–2 и на рисунке.

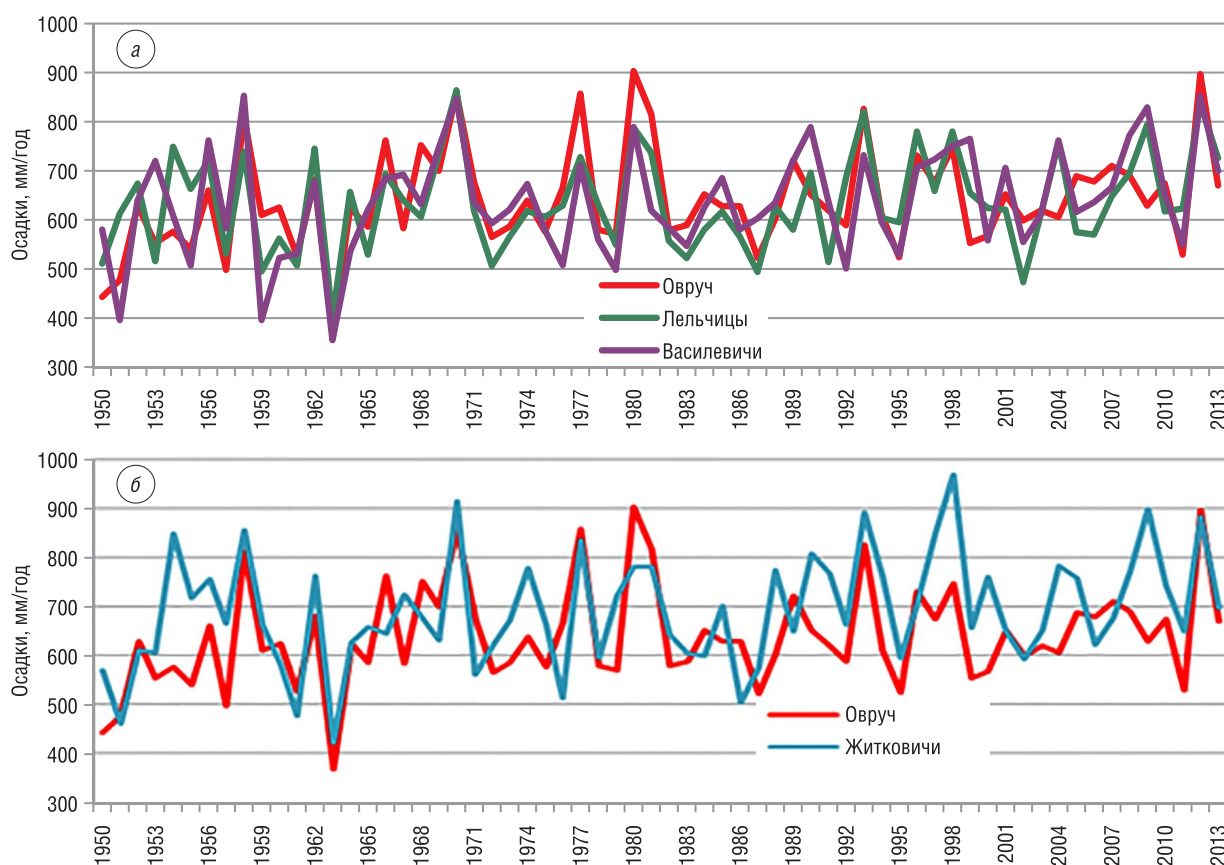
Т а б л и ц а 1. Количество осадков на станциях за различные периоды

Период, гг.	Количество осадков, мм			Разность осадков, мм		
	Житковичи	Лельчицы	Овруч	Житковичи-Лельчицы	Житковичи-Овруч	Лельчицы-Овруч
1950–1988	662	618	628	44	34	-10
1989–2013	738	676	658	62	80	22
1961–1990	664	619	638	45	26	-19
1963–1983	670	627	659	43	11	-32
1995–2003	714	644	630	70	84	14
2004–2013	748	684	677	64	71	7
1971–2015, $n < 11$	675	630*	616	45	59	14
1971–2015, $n \geq 11$	739	667*	696	72	43	-29

* Лельчицы – данные за 1971–2013 гг.

Т а б л и ц а 2. Количество осадков и теснота связи осадков на станциях за различные периоды

Период, гг.	Количество осадков, мм				Значения коэффициента корреляции				
	Житковичи	Лельчицы	Овруч	Василевичи	Житковичи-Лельчицы	Житковичи-Овруч	Лельчицы-Овруч	Василевичи-Лельчицы	Василевичи-Овруч
1950–1988	662	618	628	614	0,710	0,630	0,763	0,676	0,697
1989–2013	738	676	658	677	0,674	0,546	0,548	0,665	0,594
1961–1990	664	619	638	629	0,736	0,645	0,852	0,770	0,739
1963–1983	670	627	659	620	0,709	0,709	0,890	0,824	0,792
1995–2003	714	644	630	656	0,677	0,677	0,699	0,685	0,611
2004–2013	748	684	677	703	0,786	0,425	0,379	0,808	0,534



Динамика изменения осадков по станциям за 1950–2013 гг.: а – Овруч–Лельчицы–Василевичи, б – Овруч–Житковичи

Для наглядности динамика изменений количества осадков приведена на рисунке. На графике прослеживается нарушение синхронизации годового хода осадков в начале 1950-х годов по станциям Лельчицы–Василевичи и улучшение синхронизации годового хода осадков по этим станциям в период 2004–2015 гг. (рисунок, а). В начале 50-х годов и в период потепления в конце 90-х годов прошлого столетия по станциям Овруч–Лельчицы, Овруч–Житковичи, Овруч–Василевичи наблюдается нарушение синхронизации годового хода осадков (рисунок).

По данным табл. 1, 2 и рисунка можно сделать следующие выводы.

В периоды с большим количеством южных циклонов выпадает большее количество осадков. В среднем увеличение количества осадков по выбранным станциям за периоды 1995–2003 и 2004–2013 гг., а также период 1971–2015 гг. составило 6–8 %.

Наиболее высокие коэффициенты корреляции между количеством осадков на всех исследуемых станциях наблюдались в периоды 1963–1983 и 1961–1990 гг. при относительно устойчивой меридиональных северной и южной групп циркуляции по Б. Л. Дзердзеевскому.

В период потепления, несмотря на увеличение количества осадков на всех станциях, теснота связей осадков уменьшилась на станции Овруч и соседних станциях (особенно за период 2004–2013 гг.) и увеличилась на станциях Житковичи и Лельчицы и особенно на станциях Василевичи и Лельчицы, что косвенно говорит о наметившихся тенденциях в изменении атмосферной циркуляции.

Количество осадков и теснота связи количества осадков по указанным выше станциям Гомельской области и станции Овруч за различные периоды групп атмосферной циркуляции в Северном полушарии по Б. Л. Дзердзеевскому приведены в табл. 3. Отдельно рассмотрены изменения осадков в зональную эпоху по отдельным станциям за периоды 1935–1956 и 1946–1956 гг., а также периоды внутри меридиональной южной эпохи. В этой же таблице приведены данные об изменении осадков и тесноте связи за периоды экстремальных значений ЭЦМ циркуляционных эпох (1960–1969 и 1988–1997), а также за десятилетие с 1998 по 2008 г.

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, позволяет сделать следующие выводы.

При зональной эпохе циркуляции в 1946–1956 гг. теснота связи изменения количества осадков была примерно одинакова на всех станциях за исключением станций Василевичи–Лельчицы. Коэффициент корреляции между осадками за 1935–1956 гг. по указанным станциям оказался минимальным за весь период наблюдений.

При переходе на меридиональную южную эпоху с увеличением продолжительности меридиональных северных и меридиональных южных групп циркуляции (1957–1969) синхронность выпадения осадков между всеми станциями значительно улучшилась, что подтверждается достаточно высокими коэффициентами корреляции.

Т а б л и ц а 3. Количество осадков и теснота связи между осадками за различные периоды групп циркуляции Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому

Период, гг.	Количество осадков, мм				Значения коэффициента корреляции				
	Житковичи	Лельчицы	Овруч	Василевичи	Житковичи–Лельчицы	Житковичи–Овруч	Лельчицы–Овруч	Василевичи–Лельчицы	Василевичи–Овруч
1946–1956	650	621	566	589	0,597	0,596	0,612	0,401	0,658
1935–1956	643	606	*	621	0,564			0,176	
1957–1969	645	603	625	638	0,723	0,720	0,824	0,856	0,750
1960–1969	621	607	621	600	0,792	0,717	0,793	0,847	0,794
1970–1980	697	646	680	638	0,675	0,651	0,912	0,843	0,839
1981–1997	699	626	645	636	0,634	0,573	0,749	0,456	0,588
1988–1997	747	656	655	657	0,398	0,547	0,653	0,368	0,730
1998–2013	735	663	657	686	0,807	0,525	0,493	0,842	0,530
2009–2013	774	720	680	717					

* Отсутствие наблюдений.

Повышение продолжительности зональных процессов в 1970–1980 гг. на фоне незначительных изменений меридиональных южной и северной групп циркуляции привело к усилению синхронности выпадения осадков на станциях Лельчицы–Овруч и Василевичи–Овруч.

При росте меридиональных южных процессов и уменьшении годовой продолжительности меридиональной северной группы циркуляции (1981–1997) на фоне уменьшения зональных групп циркуляции происходит снижение осадков на станциях (кроме МС Житковичи) и соответственно уменьшение тесноты связи между количеством осадков на исследуемых станциях.

При росте меридиональной северной группы циркуляции и уменьшении южной (1998–2008, 1998–2013) происходит увеличение количества осадков. Увеличивается теснота связи между осадками в широтном направлении и уменьшается теснота связи в меридиональном направлении.

Интересно отметить, что в четырех годах (1915, 1933, 1969, 1993) из пяти (указанные годы и 2000 г.) при максимальных суммарных значениях меридиональной южной и меридиональной северной групп циркуляции на всех станциях наблюдалось существенное увеличение годового количества осадков. В среднем за 2009–2013 гг. годовая продолжительность меридиональной северной группы циркуляции составила 252 дня против 209 за период 1998–2008 гг. Средняя годовая продолжительность меридиональной южной группы циркуляции за 2009–2013 гг. составила 76 дней, что почти в 1,5 раза ниже (105) чем в предыдущем периоде (1998–2008) [8]. Среднее количество осадков за 1960–1969 гг. на станциях Житковичи и Овруч оказалось одинаковым и составило 621 мм при достаточно высоких коэффициентах корреляции между осадками на всех станциях (при одновременном увеличении продолжительности меридиональных северных и южных процессов циркуляции за этот период).

Особенности выпадения осадков с высотой местности. Известно, что количество выпадающих осадков возрастает с увеличением высоты местности при прочих равных условиях [9]. Исследования, проведенные И.И. Колосковым, показали, что в горах Кавказа, Закавказья и Дальнего Востока количество выпадающих осадков возрастает на ~20 % (по отношению к количеству осадков на уровне моря) с увеличением высоты на каждые 100 м. Для Крыма он определил это увеличение в 14–15 %; Шуберт для Силезии нашел его равным 12 %. Попытка установить зависимость количества выпадающих осадков на Украине от высоты местности над уровнем моря была сделана в 1950-е годы И.Е. Бучинским [10]. Была получена прямолинейная зависимость осадков от абсолютной высоты местности, при этом высота местности увеличивала годовую сумму осадков на 25–27 % на каждые 100 м, или в среднем на 26 %. После приведения годовых сумм осадков к уровню моря И.Е. Бучинским была получена формула для расчета определения показателя увеличения количества осадков с высотой. Кроме того, было установлено, что, помимо высоты, значительную роль в распределении осадков играют такие факторы, как местоположение станции по отношению к ветрам, приносящим осадки, и формы рельефа [10].

Для территории Беларуси количественные показатели связи между количеством осадков и географическим положением и рельефом на 50 метеостанциях Беларуси получены в работе [11]. Сведения по осадкам за год и вегетационный период (апрель–октябрь) были увязаны с высотой метеостанции и ее географическими координатами. Обработка результатов исследований показала, что наибольшее влияние на количество осадков оказывают высота и широта, тогда как влияние долготы местности оказалось статистически недостоверным. Анализ характера связей указанных факторов с осадками выявил наличие распределения данных, близкого к нормальному, что позволило авторам построить линейную регрессионную зависимость количества осадков от высоты и широты местности в итоговых уравнениях. Дисперсионный анализ показал, что полученные уравнения описывают около половины (49 и 47 %) всего варьирования зависимых переменных, т. е. вторая половина изменчивости объясняется другими, неучтенными в модели данными, поэтому пользоваться ими можно с некоторой осторожностью. В работе [12] отмечено, что коэффициенты сумм атмосферных осадков с широтой, долготой и высотой не обнаруживают подобно температуре воздуха какой-либо регулярности в годовом ходе как по величине, так и по знаку и не поддаются содержательной интерпретации. Наличие гипсометрических

данных и координат позволило авторам с помощью программы Arcgis построить изолинии теоретического распределения осадков по территории Беларуси за год и вегетационный период [11]. Достоверность выявленных закономерностей была проверена по отношению к средним многолетним величинам выпадения атмосферных осадков. Уровень корреляции с осадками последних двух десятилетий составил 0,93 (год) и 0,9 (вегетационный период). Анализ полученных карт свидетельствует о том, что самым увлажненным местом Беларуси является наиболее высокая часть Минской возвышенности, где среднегодовое количество осадков приближается к 780 мм. Сравнительно высокое количество осадков выпадает не только на Минской, Ошмянской и Новогрудской возвышенностях, но и на более низких – Оршанской и Городокской. Пониженным их количеством отличаются Полесье, Полоцкая и Неманская низменности. В то же время сравнивая полученные расчетные данные, нельзя объяснить их существенные отличия от фактических данных и их изменений в течение десятилетий на ряде станций (Житковичи, Полеская, Езерище и др.). Прослеживающая связь количества выпадающих осадков с рельефом местности нарушается на юге республики, где наблюдается их возрастание в левобережной значительно залесенной части долины Припяти, проявляющееся особенно четко в теплый период года.

Нами была проверена гипотеза о возможном влиянии Словечанско-Овручского кряжа, расположенного практически на границе Украины и Беларуси в пределах Житомирской области, на количество выпадающих осадков на станции Лельчицы, Житковичи, Василевичи, особенно при прохождении южных циклонов. Как известно, Словечанско-Овручский кряж представляет собой холмистую гряду, вытянутую с запада на восток примерно на 50 км и имеющую ширину от 5 км на востоке до 15–20 км на западе. Относительное возвышение над окружающей местностью составляет 50–60 м. Южные склоны кряжа крутые, северные — более пологие. Поверхность кряжа холмистая, рассеченная оврагами с глубиной до 20–25 м. Для сравнения была выбрана станция Овруч, расположенная на возвышенности на высоте 170 м и отстоящая от станций Лельчицы, Житковичи и Василевичи (с высотами соответственно 141, 136, 139 м) на расстоянии по прямой до указанных станций соответственно 60, 119 и 110 км. Результаты по осадкам за различные периоды приведены в табл. 1–3. Дополнительные расчеты сравнения фактических данных количества осадков и рассчитанных с помощью формул, приведенных в [10, 11], на станциях Овруч и Лельчицы для отдельных периодов (1961–1990, 1963–1983) показали хорошую сходимость. Причем и по формулам, и фактическим данным количество осадков на станции Овруч за указанные периоды примерно на 20 мм превышало количество осадков на МС Лельчицы, что объясняется увеличением количества осадков с высотой. При отсутствии такого влияния количество осадков на станции Овруч должно было быть меньше в силу ее более южного расположения. Отдельные периоды (1989–2013), когда количество выпавших осадков на станциях Василевичи, Лельчицы превышали осадки на станции Овруч, возможно связаны с уменьшением повторяемости южной циркуляции (табл. 3). В этом случае Словечанско-Овручский кряж мог увеличивать количество осадков на станциях Лельчицы, Василевичи (с наветренной стороны). Для более детального исследования возможного влияния Словечанско-Овручского кряжа на количество осадков были взяты 1980-й, 1981-й и 2012-й годы, когда количество выпавших осадков на станции Овруч превышало количество осадков на станциях Василевичи, Житковичи, Лельчицы, а число случаев южных циклонов на территории Беларуси было максимальным (соответственно 24, 35 и 13). Если исходить из классификации циркуляции атмосферы по Б. Л. Дзердзеевскому, то в 1980–1981 гг. отклонения продолжительности зональных (особенно нарушения зональности) меридиональных северной и южной групп циркуляции от их средних значений были минимальными и оказались почти на одном уровне. Результаты анализа осадков приведены в табл. 4.

Предполагалось, что в этих конкретных случаях Словечанско-Овручский кряж, как возвышенность, увеличивает количество осадков с высотой (Овруч). Были проанализированы суточные данные осадков по станциям Василевичи и Лельчицы (суточные данные по станции Овруч отсутствовали) за летние месяцы в конкретные даты, когда согласно синоптической ситуации осадки были вызваны прохождением южных циклонов. При этом не удалось выявить закономерности во времени выпадения осадков и их количестве на указанных станциях в конкретные даты. Не было

обнаружено и синхронности в направлении ветра в дни с максимальным количеством выпадающих осадков на станциях. На указанных станциях в этот период наблюдались ветры различных направлений от северных до западных с небольшим преобладанием юго-восточных направлений, что в целом обуславливало увеличение осадков на станции Овруч в связи с прохождением южных циклонов.

Т а б л и ц а 4. Сведения о количестве осадков в отдельные годы с наибольшим количеством южных циклонов

Год	Количество южных циклонов	Количество осадков, мм за год и теплый период			
		Житковичи	Лельчицы	Овруч	Василевичи
1980	24	781/570	788/600	903/695	789/615
1981	35	781/500	737/509	816/563	619/390
2012	13	883/607	837/631	897/616	852/544

Влияние подстилающей поверхности на количество осадков. Исследования, выполненные в [1], показали особенности изменения количества осадков на территории Белорусского Полесья от характера подстилающей поверхности и подтвердили увеличение количества осадков с увеличением лесистости. Как известно, основной причиной изменения количества осадков при этом является выявленные изменения коэффициента турбулентности над участками с резко меняющейся шероховатостью. При переходе с поля на массив лесных полос наблюдалось резкое возрастание коэффициента турбулентности почти до уровня 0,5–1 км, что может вызвать увеличение осадков до 5–10 %. [13]. Наиболее интересная работа в отношении выявления влияния лесистости территории на осадки была проведена Г.П. Калининым, при выполнении которой были приняты все меры для исключения возможного влияния систематических ошибок наблюдений над осадками, а также исключения влияния микроклиматических факторов [14]. Получены зависимости между количеством осадков и длиной контура леса за период (май–октябрь) для территории Подмосковья; влияние лесистости увеличивает количество осадков на 9 % за указанный период. В холодную часть года связь осадков с увеличением лесистости получается более слабой. В целом для года колебания количества осадков под влиянием лесистости на рассмотренной территории составляют 7–8 % годовой суммы. В условиях Воронежской области различия в осадках теплой части года между лесистыми и безлесными районами достигают 10–15 % суммы осадков [14].

Проведенные исследования в Беларуси показали, что на формирование ливневых дождей лесные массивы также оказывают влияние [15]. Лесные массивы, как возвышенные участки, способствуют повышению турбулентности. В районах, где лесистость превышает 45 % территории, число дней с ливневыми дождями, как правило, около 95,1 или более; на западе и северо-западе Беларуси, где лесистость меньше, число таких дней менее 80,3. Поскольку значительное количество южных станций Белорусского Полесья (Житковичи, Лельчицы, Мозырь) имеют большую лесистость, повышение количества дней с ливневыми осадками на этих станциях авторы связывают с увеличением водности облаков в районе расположения станций [15]. Изучение количества гроз на территории Беларуси за период 1988–2008 гг. показало, что наибольшее количество гроз зафиксировано на станции Житковичи, что, как уже было сказано, может быть вызвано повышенной турбулентностью в данном районе и соответственно приводит к увеличению количества осадков. А.И. Кайгородов, отмечая в весенне-летние месяцы увеличение осадков в долине Припяти, объясняет его подъемом приходящих воздушных масс по так называемой «поверхности подъема». Последняя образуется в связи с прослеживаемым южнее в этот период отрогом Азорского антициклона. Не последнюю роль играет и подпитка приходящих воздушных масс влагой, испаряющейся с поверхности болот [9]. Следует отметить, что испарение с оз. Червоное (площадью 44 км²), расположенное на расстоянии менее 20 км к северо-востоку от г. Житковичи, и череда озер, расположенных в районе д. Переровский Млынок в 19 км на юго-восток от г. Житковичи, где в припойменной и пойменной зонах Припяти находятся 74 безымянных и старичных озера, а также каскад озер в 14 км северо-западнее г. Житковичи, крупнейшее из которых оз. Белое (площадью 1,56 км²), в совокупности с лесистостью в Житковичском районе (55 %) в теплый период года увеличивает турбулентность атмосферы и количество гроз и соответственно приводит к повышению количества осадков по сравнению с соседними станциями.

Выводы. 1. В периоды с большим количеством южных циклонов выпадает большее количество осадков. В среднем это увеличение по выбранным станциям составило 6–8 % .

2. Словечанско-Овручский кряж, как возвышенность, в большинстве случаев увеличивает количество осадков с высотой (Овруч) по сравнению с близлежащими станциями (Лельчицы, Василевичи) при прохождении южных циклонов. Лесные массивы, как и возвышенные участки, способствуют повышению турбулентности и увеличению количества осадков.

3. Количество осадков и теснота связи между осадками на станциях в большей степени определяется особенностями атмосферной циркуляции. Наиболее высокие коэффициенты корреляции между количеством осадков на всех исследуемых станциях наблюдались в периоды (1963–1983 и 1961–1990) при относительно устойчивой меридиональных северной и южной групп циркуляции по Б. Л. Дзердзеевскому.

4. При росте меридиональной южной группы циркуляции и уменьшении меридиональной северной группы циркуляции (1981–1997) происходит уменьшение осадков на станциях и уменьшение тесноты связи между осадками. При росте меридиональной северной группы циркуляции и уменьшении южной (1988–2008) происходит увеличение количества осадков. Увеличивается теснота связи между осадками в широтном направлении и уменьшается теснота связи в меридиональном направлении. Причем более высокие значения количества осадков и увеличение тесноты связи осадков в широтном направлении в 1998–2013 гг. наблюдались при незначительном изменении меридиональной северной группы циркуляции и существенном уменьшении меридиональной южной группы циркуляции в период с 2009 по 2013 г.

5. Увеличение количества осадков в Гомельской области в период потепления 1989–2013 гг. (по сравнению с Брестской областью) в большей степени обусловлено изменениями меридиональной северной и меридиональной южной групп атмосферной циркуляции, а также большей площадью лесных массивов в Гомельской области.

Список использованных источников

1. Оценка влияния урбанизации и мелиорации на климатические, водные, земельные и лесные ресурсы Беларуси. «Оценка пространственно-временных особенностей роли мелиорации земель в современных изменениях климата и продуктивности экосистем Беларуси с использованием статистических методов и математического моделирования» / Отчет по НИР (промежуточный), № госрегистр. 20160128.- ГПНИ Природопользование и экология, 2016–2020, подпрогр. 1 «Природные ресурсы и экологическая безопасность» задание № 1.06. – Минск, 2018. – 163 с.
2. Изменения климата и их последствия: науч. изд. / В. Ф. Логинов [и др.]; под общ. ред. В. Ф. Логинова; Ин-т пробл. исполъз. природ. ресурсов и экологии НАН Беларуси. – Минск: ОДО «Тонлик», 2003. – С. 100–102.
3. *Лепешко, В. Н.* Климатические ресурсы Беларуси и рациональное их использование / В. Н. Лепешко. – Минск: Университетское, 1986. – С. 114–117.
4. Повторяемость циклонов различных направлений и формирование условий возникновения наводнений на реках Беларуси / И. С. Партасенок [и др.] // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: сб. науч. ст.: Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 6–8 апр. 2016 г.; в 2 ч. – Брест, 2016. – Ч.1. – С. 235–243.
5. *Сумак, Е. Н.* Особенности перемещения циклонов над Беларусью в современный климатический период / Е. Н. Сумак, И. Г. Семенова // Природные ресурсы. – 2017. – № 2. – С. 101–109.
6. *Киселев, В. Н.* Климатические условия периода мелиорированного освоения Белорусского Полесья / В. Н. Киселев, Е. В. Матюшевская // Мелиорация. – 2015. – № 1. – С. 73.
7. *Кононова, Н. К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому / Н. К. Кононова; отв. ред. А. Б. Шмакин; Рос. акад. Наук, Ин-т географии. – М.: Воентехиниздат, 2009. – С. 103–109.
8. Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI веке [Электронный ресурс]. – режим доступа: www.atmospheric-circulation.ru.
9. Климат Беларуси; под ред. В. Ф. Логинова. – Минск: Ин-т геологич. наук АН Беларуси, 1996. – 234 с.
10. *Бучинский, И. Е.* К вопросу влияния высоты местности на температуру и осадки / И. Е. Бучинский // Метеорология и гидрология. – 1950. – № 1. – С. 21–25.
11. Увлажненность территории Беларуси / Н. В. Клебанович [и др.] // Вестн. БГУ. Сер. 2. – 2011. – № 1. – С. 77–81.
12. *Коляда, В. В.* Связи климатических показателей с географическими координатами метеостанций в условиях Беларуси / В. В. Коляда // Природопользование. – 2012. – Вып. 21. С. 40–49.
13. *Воронцов, П. А.* Аэрологические исследования. Исследования пограничного слоя атмосферы / П. А. Воронцов, Е. С. Селезнева: Главная Геофизическая Обсерватория. Л.: Гидрометеиздат, 1976. – С. 223–224.
14. Изменение климата в связи с планом преобразования природы засушливых районов СССР; под ред. Х. П. Погосьяна. Л.: Гидрометиздат, 1952. – С. 91–92.
15. *Логинов, В. Ф.* Опасные метеорологические явления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока. – Минск: Беларусь. наука, 2010. – С. 28–42.

Поступила 30.07.2019

**ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ,
ЭКОЛОГОБЕЗОПАСНЫЕ И РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**NATUREMANAGEMENT,
ECOLOGICALLY SAFE AND RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES**

**ПРЫРОДАКАРЫСТААННЕ,
ЭКОЛАГАБЯСПЕЧНЫЯ І РЭСУРСАЗБЕРАГАЛЬНЫЯ ТЭХНАЛОГІІ**

УДК 581.14: (632.51+633/635)

Н. А. Ламан, В. Н. Прохоров

*Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь, e-mail:prohoroff1960@mail.ru*

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ БОРЩЕВИКА СОСНОВСКОГО
(*HERACLEUM SOSNOWSKYI* MANDEN.) ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЛОДОРОДНОГО СЛОЯ
ПОЧВЫ СО СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК**

Инвазивные чужеродные виды, к которым относится обширный и быстро увеличивающийся круг организмов, представляют собой одну из наиболее серьезных, стремительно растущих и с трудом поддающихся устранению угроз для биоразнообразия, экологической и продовольственной безопасности, защиты здоровья и жизни человека. В настоящее время в Беларуси наиболее злостным инвазивным видом является борщевик Сосновского (*Heracleum Sosnowskyi* Manden.). Непреднамеренное распространение этого вида связано во многих случаях с использованием для закладки и ремонта газонов плодородного слоя почвы, снимаемого со строительных площадок, который заражен его семенами. В этой связи остро стоит вопрос о предварительной оценке таких грунтов. На основании многолетнего практического опыта обсуждаются возможные пути решения этой проблемы.

Ключевые слова: инвазивные виды, борщевик Сосновского, плодородный слой почвы, засоренный семенами борщевика Сосновского

N. A. Laman, V. N. Prokhorov

*V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail:prohoroff1960@mail.ru*

**DISTRIBUTION OF SOSNOWSKY'S HOGWEED (*HERACLEUM SOSNOWSKYI* MANDEN.) WHEN USING FERTILE
SOIL LAYER FROM BUILDING SITES**

Invasive alien species, which include a vast and rapidly expanding range of organisms, represent one of the most serious, rapidly growing and difficult to eliminate threats to biodiversity, ecological and food security, protection of health and livelihood. Currently, the most aggressive invasive species in Belarus is the hogweed Sosnovsky (*Heracleum Sosnowskyi* Manden.), The expansion of which is observed in Belarus. The inadvertent spread of this species is associated in many cases with the use of a fertile layer infected with its seeds removed from construction sites. In this regard, there is an urgent need for a preliminary assessment of such soils. Based on many years of practical experience, possible solutions to this problem are discussed.

Keywords: invasive species, Sosnovsky hogweed, fertile soil layer, littered with seeds of Sosnovsky hogweed

М. А. Ламан, В. М. Прохараў

Інстытут эксперыментальнай батанікі імя В. Ф. Купрэвіча Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь,
e-mail: prohoroff1960@mail.ru

РАСПАЎСЮДЖВАННЕ БАРШЧЭЎНІКА САСНОЎСКАГА (H. S. M.) ПРЫ ВЫКАРЫСТАННІ ЎРАДЛІВАГА ПЛАСТА ГЛЕБЫ З БУДАЎНІЧЫХ ПЛЯЦОВАК

Інвазіўныя чужародныя віды, да якіх адносіцца шырокае кола раслінных арганізмаў, уяўляюць сабой адну з найбольш сур'езных пагроз для біразнастайнасці, экалагічнай і харчовай бяспекі, аховы здароўя і жыцця чалавека. У цяперашні час у Беларусі найбольш злосным інвазіўным відам з'яўляецца баршчэўнік Сасноўскага (H. S. M.). Ненаўмыснае распаўсюджванне гэтага віда звязана ў многіх выпадках з выкарыстаннем для стварэння і рамонту газонаў урадлівага пласта глебы, што здымаецца з будаўнічых пляцовак, які ўтрымлівае жыццездольнае насенне баршчэўніка. У гэтай сувязі востра стаіць пытанне аб папярэдняй ацэнцы такіх пластоў глебы. На базе шматгадовага практычнага вопыту абмяркоўваюцца магчымыя шляхі вырашэння гэтай праблемы.

Ключавыя словы: інвазіўныя віды, баршчэўнік Сасноўскага, урадлівы пласт глебы, засмечаны насеннем баршчэўніка Сасноўскага

Введение. Необходимым условием создания в городе благоприятной среды проживания с достаточным количеством зеленых насаждений является бережное отношение к плодородному слою почвы. Интенсивная инженерно-строительная деятельность в городах включает большой объем земельных работ (рытье котлованов под фундаменты, прокладка дорог и инженерных коммуникаций и др.), при выполнении которых нарушается плодородный почвенный слой, а во многих случаях происходит и его потеря. Для сохранения плодородного почвенного слоя нормативными документами предписывается обязательное его снятие отдельно от подстилаемых пород на всех категориях земель до начала строительных работ [1]. Снятый плодородный слой используется затем в благоустройстве, озеленении и в первую очередь для ремонта и закладки газонов.

В последнее десятилетие в отдельных районах Республики Беларусь и на территории г. Минска отмечается интенсивное распространение опасного инвазивного вида растений – борщевика Сосновского. Из-за исключительно высокой семенной продуктивности происходит накопление жизнеспособных семян этого вида на почве в местах его произрастания и на сопредельных территориях. При использовании снятого с таких территорий плодородного слоя почвы для закладки и ремонта газонов произошло непроизвольное «расселение» борщевика Сосновского и увеличение его популяций в г. Минске, особенно в новых микрорайонах (рис. 1).

В этой связи Мингорисполком (решением от 14 октября 2010 года №2399) обязал заказчиков на стадии проектирования строительных объектов определять зараженность семенами борщевика плодородного почвенного слоя, чтобы исключить появление новых очагов этого опасного инвазивного вида в местах использования грунтов при озеленении городских территорий. Это решение отражено в технических условиях на проектирование, выдаваемых УП «Минскзеленстрой», при разработке проектов строительных объектов. В дальнейшем это подтверждено решением Минского городского исполнительного комитета (от 24.02.2015 г. №438 и п.16) и прилагаемого



Рис. 1. Растения борщевика Сосновского на городском газоне, появившиеся в результате применения грунта, засоренного семенами этого инвазивного вида

к нему «Плана мероприятий по ограничению распространения и численности борщевика Сосновского, золотарника канадского и кле-на ясенелистного на территории г. Минска» на предмет определения на стадии проектирования возможности использования грунта для ремонта и закладки газонов в связи с его заражением семенами борщевика Сосновского.

В работах зарубежных исследователей [2] отмечается, что оценка наличия жизнеспособных семян в почве является эффективным методом мониторинга за распространением борщевиков.

Объекты и методы исследований. Оценка засоренности плодородного слоя почвы семенами борщевика Сосновского, снимаемого со строительных площадок, проводили в 2011–2018 гг., во всех районах г. Минска. Общее количество обследованных объектов за этот период составило около 800 (рис. 2).

В работе приводятся усредненные данные за весь период проведения экспертных оценок, поэтому в отдельных районах картина засорения может меняться, тем более что многие из обследованных объектов недавно построены и введены в строй. Так, например, в настоящее время практически на всей территории бывшего аэропорта «Минск-1» и авиационного завода ведутся строительные работы, а это более 100 га, входящих в Октябрьский район г. Минска. Тем не менее, полученные результаты в основном отражают существующие в г. Минске проблемы с почвогрунтами, засоренными семенами борщевика Сосновского.

Для оценки возможности использования снимаемого плодородного слоя почвы со строительных площадок для ремонта и закладки газонов Институтом экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси разработана, согласована с УП «Минскзеленстрой» и зарегистрирована в БелИСА специальная методика определения засоренности грунтов.

Согласно методике, одновременно с отбором проб должно проводиться визуальное обследование отведенной под строительство территории и прилегающих к ней участков на наличие популяций и отдельных растений борщевика Сосновского. Это связано с возможностью попадания семян с соседних участков уже после проведения экспертной оценки. В зимний период в связи с наличием снежного покрова на участке экспертное обследование не проводится. Количество отбираемых проб зависит от площади обследуемой территории и определяется до выезда на объект [3]. Время проведения экспертизы зависит от площади объекта и времени года, в которое проводится экспертиза.

Снимаемые со строительных площадок грунты разбиты на три группы по содержанию в них жизнеспособных семян борщевика Сосновского: 1) почвогрунт, не содержащий жизнеспособных семян борщевика Сосновского; 2) почвогрунт с низкой зараженностью жизнеспособными семенами борщевика Сосновского (до 100 шт. в 1 м³); 3) почвогрунт с высокой зараженностью жизнеспособными семенами борщевика Сосновского (100 шт. и более в 1 м³).

Расчеты показывают, что если 1 м³ плодородного слоя распределять на газоне или цветнике слоем толщиной 5 см, то общая покрытая площадь составит 20 м² (1 м³ = 100000 см³/ 5 см = 200000 см² = 20 м²). При зараженности грунта жизнеспособными семенами борщевика в 100 шт./м³, на 1 м² формируемого газона или цветника придется 5 семян (100 шт. / 20 м² = 5 шт./м²). На основе таких расчетов можно планировать дальнейшее использование грунтов в озеленении в зависимости от интенсивности ухода за данными компонентами ландшафта (периодичность кошения газонов, количество прополок и частота рыхления цветников) и особенностями проведения мониторинга за ними.

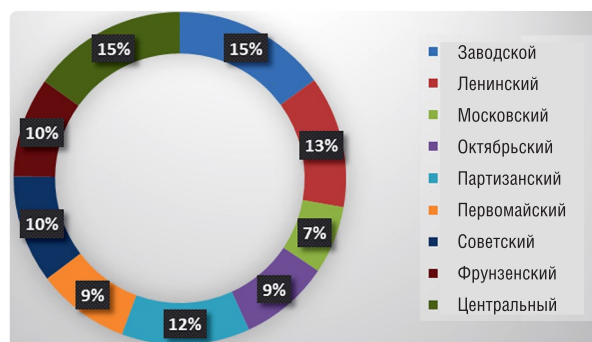


Рис. 2. Доля обследованных объектов районов г. Минска в период проведения экспертиз (2011–2018 гг.)

Для семян всех видов борщевиков характерно наличие недоразвитого зародыша. Первые две недели после отделения от материнского растения и опадания полуплодиков на почву зародыш продолжает расти. Затем наступает период, когда заметного роста не наблюдается. Поэтому для дальнейшего внутрисемянного развития зародыша требуется длительный период стратификации при пониженной температуре. В естественных условиях он начинается с осени, когда семена попали в почву или находятся на поверхности почвы, продолжается зимой и ранней весной. После этого периода семена борщевика приобретают способность прорасти [4]. Для определения жизнеспособности не прошедших стратификацию семян борщевика в Институте экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича разработан экспресс-метод, что позволяет также существенно сократить время проведения экспертизы грунтов [5].

Результаты и их обсуждение. Проведенные в 2011–2018 гг. обследования плодородного слоя почвы, снимаемого со строительных площадок в г. Минске, показали, что почти треть участков засорена вегетирующими растениями борщевика Сосновского и/или их жизнеспособными семенами. Особенно сильно засорены территории обследованных нами объектов в Октябрьском (95,1 %), Ленинском (88,6 %), Московском (30,1 %), Фрунзенском (20,9 %) и Заводском (20,4 %) районах г. Минска, где ведется интенсивная застройка архитектурно-строительных комплексов «Минск–Мир» (рис. 3), «Лошица», «Петровщина», «Сухарево», «Корзюки» и др. Минимальное количество засоренных участков приходится на Первомайский (3,4 %) и Партизанский (7,4 %) районы. Основные засоренные территории в Партизанском районе – Дrajня, в Первомайском – детская железная дорога, в Советском – район площади Бангалор и бывшей болотной станции.

Общая площадь (среди обследованных объектов) засоренных участков в районах г. Минска также была наибольшей в Октябрьском (195,4 га) и Ленинском (89,2 га), а минимальной – в Партизанском (2,38 га) и Первомайском (4,1 га) (рис. 4).

В пределах засоренных территорий отмечается сильная неравномерность распределения вегетирующих растений и семян борщевика Сосновского. Это значительно усложняет выделение условно чистых грунтов из общей площади засоренного участка, которые можно использовать в озеленении, а также разработку и проведение профилактических и истребительных мероприятий на объекте. Соответственно при проведении экспертизы обязательно должны обследоваться прилегающие к объекту территории на предмет наличия там вегетирующих растений борщевика Сосновского. При обнаружении на соседних участках растений этого инвазивного вида должна проводиться комплексная обработка территории обследованного объекта

и прилегающих участков. В противном случае может произойти повторное засорение объекта и затраты на ограничение распространения борщевика окажутся напрасными.

В пределах засоренных борщевиком Сосновского объектов удельная площадь участков локального размещения вегетирующих растений и жизнеспособных семян составила по г. Минску от 3,3 % в Советском районе до 21,9 % в Октябрьском (рис. 5). В то же время на отдельных объектах площадь засорения в период обследования достигала 60 % и выше. В первую очередь это относится к таким районам, как Лошица, Курасовщина, Корзюки, Петровщина, Сухарево.

Важным показателем, характеризующим засоренность грунта, является количество жизнеспособных семян борщевика Сосновского в расчете на 1 м² или 1 м³. Засоренность сни-



Рис. 3. Схема основных точек местонахождений отдельных растений и популяций борщевика Сосновского в микрорайоне «Минск–Мир»

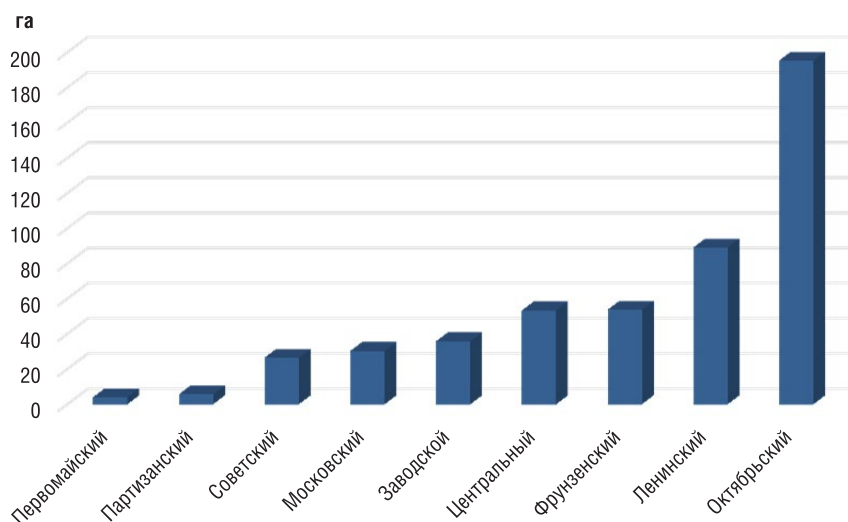


Рис. 4. Общая площадь засоренных объектов в микрорайонах г. Минска (2011–2018 гг.)

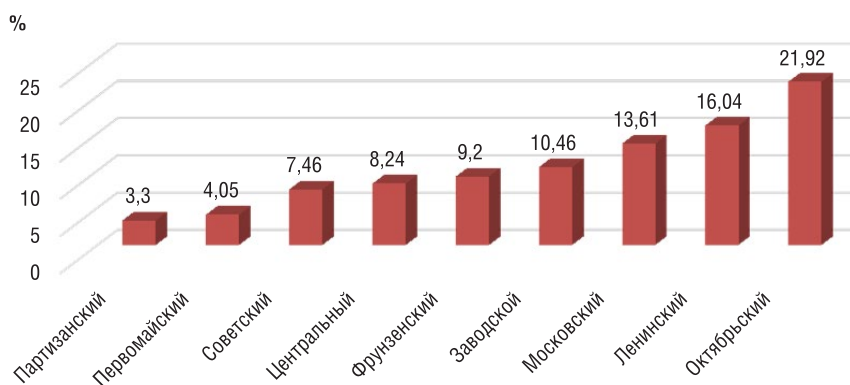


Рис. 5. Доля территорий, засоренных вегетирующими растениями и жизнеспособными семенами борщевика Сосновского, по отношению к общей обследованной площади в микрорайонах г. Минска

маемого со строительных площадок плодородного слоя также, как и их территориальное распределение, сильно варьируют. Максимальная отмечается в новых районах застройки. Это касается районов Лошица, где еще во времена СССР находилась биостанция ВАСХНИЛ по изучению кормовых культур, Курасовщина – территория, на которой раньше находился колхоз «Большевик» Минского района, возделывающий борщевик Сосновского как кормовую культуру.

Дальнейшему распространению борщевика Сосновского в другие районы г. Минска способствовало наличие водных путей (реки Мышка, Свислочь) по которым семена попали на новые территории (семена борщевика водным потоком могут переноситься на расстояние до 10 км в течение трех дней). Соответственно по водным потокам сильно засоренными оказались прилегающие к ним Заводской, Московский и Фрунзенский районы г. Минска (таблица).

В связи с наличием в плодородном слое почвы, снимаемом со строительных площадок,

Степень засоренности плодородного слоя почвы жизнеспособными семенами борщевика Сосновского в микрорайонах г. Минска

Район г. Минска	Среднее количество семян на 1 м ³ (размах варьирования), шт/м ³	Доля сильно-засоренных грунтов (более 100 семян на 1 м ³), %	Площадь участков с сильно-засоренными грунтами, га
Октябрьский	256 (35–759)	88,88	38,11
Ленинский	148 (13–409)	72,91	10,43
Московский	144 (25–400)	63,60	3,87
Заводской	123 (18–430)	23,79	0,89
Фрунзенский	99 (15–280)	22,20	1,10
Центральный	23,4 (3–185)	19,40	0,33

Примечание. Значения для Партизанского, Первомайского и Советского районов г. Минска не приводятся в связи с небольшим количеством засоренных жизнеспособными семенами борщевика Сосновского объектов

жизнеспособных семян борщевика Сосновского возникла острая проблема дальнейшего его использования. С одной стороны, такие грунты во избежание распространения этого злостного инвазивного вида не могут быть использованы в работах по благоустройству, а с другой стороны, они не могут быть утилизированы, так как плодородная почва является важным ресурсом в озеленении. Чтобы найти решение данной проблемы, в первую очередь необходимо обратить внимание на биологию семян и особенности роста и развития борщевика Сосновского.

Борщевик Сосновского размножается только семенами. Семенная продуктивность растения исключительно высокая. Потенциальная семенная продуктивность одного растения у распространенного в Европе и на Североамериканском континенте борщевика Мантегацци определяется в 60 000 цветков, каждый из которых дает 2 полуплодика, т.е. в сумме 120 000 семян [6]. Чешские исследователи [7] зафиксировали растение борщевика Мантегацци, на котором сформировалось 107 800 семян. В популяциях борщевика Сосновского наиболее часто присутствуют растения, семенная продуктивность которых колеблется в пределах 10–50 тыс. семян [8]. Это позволяет гигантским борщевикам сформировать в хорошо развитых популяциях банк семян в почве, насчитывающий до 2000 шт/м² и более. При прорастании семян весной, большая часть всходов гибнет из-за конкуренции за свет, воду и элементы питания, тем самым поддерживая плотность популяций на уровне 2–2,5 крупных особи на 1 м² [9].

Считается, что семена сохраняют в почве всхожесть до 11 лет, а по другим данным – даже до 15 лет. Проведенные исследования показывают, что в лабораторных условиях всхожесть семян борщевика Сосновского в течение трех лет значительно снижается и составляет в среднем в первый год до 98 %, во второй – 66, в третий – 33, а в четвертый – несколько процентов [10]. В то же время единичные семена и в сухих условиях сохраняют всхожесть до 15 лет [11].

В полевых условиях жизнеспособность семян обычно значительно ниже. Л. Моравцова и соавт. [12] классифицируют борщевик, как растение с краткосрочным банком семян. По результатам их исследований более 90 % семян прорастали (или разлагались) после первой зимы. В последующие годы доля жизнеспособных семян в почве снижается до 1–2 %, однако, как и в сухих условиях, единичные семена могут сохранять всхожесть до 10 и более лет, что обеспечивает существование популяций долгие годы.

Тщательные многолетние исследования популяций борщевика Сосновского на Сахалине и выполненные на их основе расчеты [13] показывают, что имеющиеся в 0–3-см слое запасы семян даже при отсутствии новых семенных поколений будут достаточны для существования и устойчивого возобновления зарослей борщевика Сосновского, по крайней мере в течение 15 лет. Это самый трудный и сложный барьер, который необходимо будет преодолеть в решении проблемы искоренения этого растения.

В этой связи за почвой, засоренной семенами борщевика, необходим мониторинг не менее 10 лет. Наличие в почве семян, сохраняющих длительное время всхожесть, вероятно, связано как с экологическими условиями, так и наличием гибридов в популяции борщевика Сосновского. Хорошо известно, что в период изучения гигантских борщевиков в 50–60-х годах прошлого столетия с целью отбора из них наиболее перспективных для интродукции в качестве кормово-силосных растений на опытных участках в Беларуси одновременно изучались до 20 различных видов из рода Борщевик. В результате большой концентрации близкородственных генотипов происходило их перекрестное опыление, что могло привести к формированию высокоагрессивных гибридов. Исходя из этого, проблема с использованием для озеленения почв, засоренных жизнеспособными семенами борщевика Сосновского, в ближайшие годы будет только обостряться.

Следует подчеркнуть, что данная проблема характерна не только для Беларуси, но и остро стоит в других странах мира. В ее практическом и юридическом решении наиболее продвинулись Великобритания и США. Так, в Англии еще в 1990 г. в соответствии с законом о защите окружающей среды (*Environmental Protection Act*) почва, снимаемая с участка, на котором росли гигантские борщевики, должна быть утилизирована на специальном полигоне, который уполномочен ее принимать. Если выбирается путь утилизации засоренного грунта, то одновременно с удалением семенного банка удаляются стеблекорни (в отличие от борщевика Сосновского некоторые виды

гигантских борщевиков могут размножаться подземными вегетативными органами). Поэтому глубина выемки грунта составляет 50 см (глубина проникновения в почву стеблекорня). Снятый грунт может быть складирован на границе участка или за его пределами, но обязательно огорожен от остального чистого грунта. За почвой в буртах в соответствии с Законом о защите окружающей среды (Великобритания) необходим контроль во избежание ее распространения за пределы мест складирования.

В США борщевик Мантегацци еще в 1974 г. включен в федеральный закон о карантинных сорняках (Federal Noxious Weeds Act of 1974), согласно которому все его популяции и отдельные растения регистрируются и постоянно контролируются, а интродукция запрещена. В настоящее время во всех районах распространения борщевика Мантегацци существуют специальные университетские программы, включающие работы по идентификации растений, контролю за динамикой распространения популяций, работу с общественностью и СМИ, проведение научно-практических семинаров, работу добровольцев по выявлению новых популяций.

Очень часто источником распространения семян борщевика является человек. Семена, особенно в осенний, обычно дождливый период, попадают с почвой в глубокие протекторы обуви и могут переноситься на большие расстояния. Поэтому в Канаде, США и Ирландии в местах, где есть вегетирующие растения борщевика, рядом с ними ставят плакат, предупреждающий, что к этим растениям нельзя подходить ближе 5 м (основная часть семян падает в пределах 4 м от материнского растения) [14].

Среди основных путей распространения гигантских борщевиков можно выделить: распространение засоренной семенами борщевика почвы, загрязнение чистых территорий семенами, перенесенными транспортными средствами и оборудованием, естественными водными потоками и потоками воды после мойки транспорта, а также незаконное захоронение засоренных семенами почв.

Как в Великобритании, так и в Северной Ирландии применяются большие штрафы к гражданам, если на их участке найдены растения гигантских борщевиков. Если при первом случае сумма штрафа составляет 50 фунтов, то при повторном она может достигать 5000. Кроме того, суды принимают гражданские иски от физических лиц в отношении хозяев участков, на которых растет борщевик. В США засоренную семенами борщевика почву во избежание засорения других районов на месте обнаружения перемещают на глубину 50 см, а сверху закрывают чистым от семян борщевика слоем грунта. Обращается особое внимание на очистку техники после работы на засоренном участке от возможного прилипания семян к рабочим органам. В этой же связи на засоренных территориях ограничено или запрещено использование техники на гусеничном ходу. Очистка техники не должна производиться на чистой от семян территории.

Как отмечено выше, Институтом экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси с 2011 г. проводится оценка плодородного слоя почвы, снимаемого со строительных площадок, на засоренность жизнеспособными семенами борщевика Сосновского. В ходе выполнения работ при наличии семян в почве возникает вопрос о путях ее дальнейшего использования. Значительный практический опыт по проведению экспертных оценок по засоренности земельных участков в г. Минске жизнеспособными семенами борщевика Сосновского показывает, что в сложившейся ситуации наиболее рациональным будет проведение следующих мероприятий.

Вывоз засоренного семенами борщевика Сосновского грунта в ближайшие к городской черте г. Минска выработанные карьеры. После их полного заполнения засоренным грунтом, отсыпка их чистым 20-см слоем почвы. Этого слоя будет достаточно, чтобы предупредить прорастание жизнеспособных семян борщевика, так как уже с глубины 10 см они практически не прорастают. После выравнивания верхнего слоя почвы для исключения прорастания случайно попавших семян борщевика на нем формируют плотный травостой из многолетних быстрорастущих видов злаковых трав (ежа сборная, тимофеевка луговая, райграс пастбищный).

При закладке на хранение засоренного семенами борщевика Сосновского грунта могут проводиться мероприятия по его комплексному физическому и агрохимическому улучшению путем внесения песка, торфа, минеральных и органических удобрений. Кроме того, в этих карьерах

возможно послойное внесение с почвой, вывозимой из города скошенной с городских газонов травы и опавших листьев, что будет способствовать формированию компостов. В результате после временной консервации через 4–5 лет город получит высокоплодородный грунт для благоустройства и озеленения.

При невозможности вывоза засоренного грунта за пределы г. Минска, его целесообразно временно складировать в бурты на границе территории, отведенной под строительство объекта. В этом случае для предотвращения водной и ветровой эрозии складированного плодородного слоя почвы бурты необходимо укрыть темной пленкой. При отсутствии возможности укрытия пленкой больших объемов почвы в буртах их поверхность засевают многолетними злаковыми травами для формирования дернины. В случае наличия откосов с уклоном более 30° должны быть предусмотрены мероприятия по их укреплению, в том числе укладку георешетки и одерновку. В противном случае такой бурт станет источником распространения борщевика Сосновского и других сорных растений.

Согласно ГОСТу 17.4.3.02-85 [1] поверхность бурта и его откосы должны быть засеяны многолетними травами, если срок хранения плодородного слоя почвы превышает два года. Под бурты, как правило, должны быть отведены непригодные для ведения сельскохозяйственного производства участки или малопродуктивные угодья, на которых исключается подтопление, засоление и загрязнение промышленными отходами, твердыми предметами, камнем, щебнем, галькой, строительным мусором.

В ходе строительства и после его окончания складированную в буртах засоренную семенами борщевика Сосновского почву целесообразно использовать на этой же территории, помещая в более глубокие слои грунта (на глубину 50 см), а верхний слой формировать из чистой плодородной почвы толщиной не менее 15–20 см. В дальнейшем для полного исключения прорастания единичных семян борщевика Сосновского, оставшихся жизнеспособными после хранения в буртах, также сформировать плотный газонный травостой из многолетних видов злаков.

При небольшом засорении возможно перемещение грунта без предварительного складирования на территории объекта в более глубокие слои горизонта с формированием над ним чистого слоя толщиной 15–20 см и высевом многолетних видов злаковых трав.

Основная часть семян борщевика Сосновского сохраняет всхожесть в течение 3–4 лет. Поэтому по истечении этого периода грунты в последующем можно использовать для озеленения, но при условии их применения для формирования газонов, на которых будет осуществляться интенсивное кошение, а также проведение (при необходимости) химических прополок. Однако такое использование засоренных грунтов возможно только при обязательном мониторинге состояния сформированного на этом участке растительного покрова на предмет наличия всходов борщевика Сосновского.

После проведения работ по благоустройству территории работники специальных служб должны вести не только регулярное наблюдение за складывающейся инвазионной ситуацией, но и обеспечить надлежащую эксплуатацию зеленой зоны. При посадке на территории, где проводилось перемещение засоренного грунта в нижние слои почвенного горизонта, деревьев и кустарников, а также проведении других работ, связанных с выемкой грунта (посадочные ямы, траншеи для прокладки кабеля, труб и т.д.), вынимаемый засоренный жизнеспособными семенами борщевика Сосновского грунт целесообразно укладывать в нижние горизонты профиля.

Во избежание переноса семян борщевика Сосновского на чистые территории при перемещении техники с засоренных борщевиком Сосновского площадей обязательно проводить ее очистку от почвы, налипшей на ходовую часть и рабочие органы.

Следует отметить, что любому перемещению засоренного жизнеспособными семенами борщевика Сосновского грунта должен предшествовать комплекс мероприятий, включающий как агротехнические методы борьбы с этим инвазивным видом, так и при необходимости обработку этих площадей разрешенными к применению в населенных пунктах гербицидами в установленных дозах. При этом обязательным условием является уничтожение растений борщевика при их наличии на примыкающих к обследованному объекту участках.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 17.4.3.02-85. Охрана природы. Почвы. Требования к охране плодородного слоя почвы при производстве земляных работ.
2. Timing and extent of tissue removal affect reproduction characteristics of an invasive species *Heracleum mantegazzianum* / P. Pyšek [et al.] // *Biological Invasions*. – 2007. – N 9. – P. 335–351.
3. ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.
4. Ламан, Н. А. Гигантские борщевики – опасные инвазионные виды для природных комплексов и населения Беларуси / Н. А. Ламан, В. Н. Прохоров, О. М. Масловский. – Минск, 2009. – 40 с.
5. Способ определения жизнеспособности семян борщевика Сосновского : пат. ВУ20369 / В. Н. Прохоров, М. Ю. Мишина, Н. А. Ламан [и др.].
6. Tiley, G. E. D. *Heracleum mantegazzianum* (giant hogweed) and its control in Scotland / G. E. D. Tiley, B. Philp : L. C. de Waal, L. E. Child, P. M. Wade and J. H. Brock (eds.) // *Ecology and management of invasive riverside plants*. John Wiley & Sons Ltd. – Chichester, 1994. – P. 101–109.
7. Pyšek, P. Invasion by *Heracleum mantegazzianum* in different habitats in the Czech Republic / P. Pyšek, A. Pyšek // *J. Veg. Sci.* – 1995. – Vol. 6, № 5. – P. 711–718.
8. Ткаченко, К. Г. Сравнительная характеристика некоторых видов рода *Heracleum* L. как эфирномасличных растений / К. Г. Ткаченко : автореф. дис. ... канд. биол. наук ; Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова. – Л., 1986. – 21 с.
9. Ламан, Н. А. Способы ограничения распространения и искоренения гигантских борщевиков: обзор современного состояния проблемы / Н. А. Ламан, В. Н. Прохоров // Сб. науч. тр.: Ботаника (исследования). – 2011. – Вып. 40. – С. 469–489.
10. Иванова, М. А. Биология прорастания семян борщевика Сосновского / М. А. Иванова // Бюллетень Главного ботанического сада. – М., 1966. – Вып. 63. – С. 66–73.
11. Lundström, H. New experiences of the fight against the giant hogweed, *Heracleum mantegazzianum* / H. Lundström // *Swedish Crop Protection Conference*. – 1989. – Vol. 2. – P. 51–58.
12. Thompson Seed germination, dispersal and seed bank in *Heracleum mantegazzianum* / L. Moravcová [et al.] // *Ecology and management of giant hogweed (Heracleum mantegazzianum)* [ed. by Pyšek P, Cock M. J. W., Nentwig W., Ravn H. P.] Wallingford, UK: CAB, 2007. – P. 74–91.
13. Интродукция некоторых лекарственных растений Дальнего Востока во Львове / О. А. Ефремова [и др.] // Растения в муссонном климате. – Владивосток, 1998. – С. 174–176.
14. Best Practice Management Guidelines Giant Hogweed *Heracleum mantegazzianum* / Giant-Hogweed-BPM-Invasive Species Ireland.pdf

Поступила 23.04.2019

ОБЗОРЫ
REVIEWS
АГЛЯДЫ

УДК 504. 455.064 (476)

Н. С. Шевцова¹, А. К. Вишняк¹, А. В. Пахомов²*¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: Shevtsova-ns@yandex.ru, ann.vishnyak@mail.ru**²Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов,
Минск, Беларусь, e-mail: aliaksandr.pakhomau@cricuwr.by***НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ПРИРОДНОГО ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Водные объекты являются перспективной частью природного рекреационного потенциала, которые позволяют сочетать различные комбинации видов и форм отдыха в пределах их акваторий. Представлены результаты систематизации научно-методических подходов с идентификацией научных школ, основных направлений их деятельности и этапов развития вместе с представлением существующих методик покомпонентной и комплексной оценки туристско-рекреационного потенциала для водных объектов. В результате проведенного авторами анализа более 100 источников научной литературы за период с 1960 г. по настоящее время, опубликованных как на территории стран советского и постсоветского пространства, так и дальнего зарубежья, были выделены и систематизированы три научные школы оценки природно-ресурсного потенциала водных объектов: советская, постсоветская и зарубежная.

Ключевые слова: туристско-рекреационный природный потенциал, научные школы, методики оценки, водные объекты

N. S. Shevtsova¹, A. K. Vishnyak¹, A. V. Pakhomov²*Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: Shevtsova-ns@yandex.ru, ann.vishnyak@mail.ru**²Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, Minsk, Belarus, e-mail: aliaksandr.pakhomau@cricuwr.by***SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING THE NATURAL TOURIST-RECREATIONAL POTENTIAL OF WATER BODIES**

Water bodies are a promising part of the natural and recreational potential and allow combining various combinations of types and forms of recreation within their water areas. The article presents the results of the systematization of scientific and methodological approaches with the identification of scientific schools, the main directions of their activity and the stages of their development, together with the presentation of existing methods of component-wise and comprehensive assessment of tourist and recreational potential for water bodies. As a result of a scientific analysis by the authors of more than 100 sources of scientific literature for the period from 1960 to the present, published both in the territory of the countries of the Soviet and post-Soviet space and abroad, three scientific schools for assessing the natural resource potential of water resources were identified and systematized: Soviet, post-Soviet and foreign.

Keywords: tourist-recreational nature potential, scientific schools, assessment methods, water bodies

Н. С. Шаўцова¹, А. К. Вішняк¹, А. В. Пахомаў²*¹Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь, e-mail: Shevtsova-ns@yandex.ru, ann.vishnyak@mail.ru**²Цэнтральны навукова-даследчы інстытут комплекснага выкарыстання водных рэсурсаў, Мінск, Беларусь,
e-mail: aliaksandr.pakhomau@cricuwr.by***НАВУКОВА-МЕТАДЫЧНЫЯ ПАДЫХОДЫ ДА АЦЭНКІ ПРЫРОДНАГА ТУРЫСЦКА-РЭКРЭАЦЫЙНАГА ПАТЭНЦЫЯЛУ ВОДНЫХ АБ'ЕКТАЎ**

Водныя аб'екты з'яўляюцца перспектыўнай часткай прыроднага рэкрэацыйнага патэнцыялу і дазваляюць спалучаць розныя камбінацыі відаў і формаў адпачынку ў межах іх акваторый. Прадстаўлены вынікі сістэматызацыі навукова-метадычных падыходаў з ідэнтыфікацыяй навуковых школ, асноўных напрамкаў іх дзейнасці і этапаў развіцця разам

з прадстаўленнем існуючых метадых пакампанентнай і комплекснай ацэнкі турысцка-рэкрэацыйнага патэнцыялу для водных аб'ектаў. У выніку праведзенага аўтарамі навуковага аналізу больш за 100 крыніц навуковай літаратуры за перыяд з 1960 г. і па цяперашні час, апублікаваных як на тэрыторыі краін савецкага і постсавецкай прасторы, так і далёкага замежжа, былі вылучаныя і сістэматызаваны тры навуковыя школы ацэнкі прыродна-рэсурснага патэнцыялу водных аб'ектаў: савецкая, постсавецкая і замежная.

Ключавыя словы: турысцка-рэкрэацыйны прыродны патэнцыял, навуковыя школы, метадыкі ацэнкі, водныя аб'екты

Туризм – активно развивающийся сектор мировой экономики с середины XX столетия [1]. По данным Всемирной туристской Организации Объединенных Наций (ЮНВТО) в 2015 г. международный туризм обеспечивал 10 % валового внутреннего продукта, каждое 11-е рабочее место, создавая прибыль в объеме 1500 млрд долл. США, формировал 7 % мирового экспорта. Число туристских прибытий (ТП) в 2015 г. составило 1186 млрд человек [2]. На сферу туризма приходится 7 % общего объема инвестиций, 11 % мировых потребительских расходов, 5 % всех налоговых поступлений [2]. К 2020 г. число ТП составит 1,6 млрд человек, а мировые доходы от туризма достигнут 2 трлн долл. США [2].

В региональном распределении мирового туризма доминирующее положение принадлежит Европе, в состав субрегиона которого – Центрально-Восточной Европы (ЦВЕ) входит Республика Беларусь. В настоящее время в экономике страны большое внимание уделяется развитию туризма, поскольку данная отрасль является одной из высокодоходных и динамично развивающихся. За 2015 г. количество туристов, посетивших Беларусь, составило 276,3 тыс. человек [3]. Существует необходимость оценки уровня современного туристско-рекреационного потенциала (ТРП) Беларуси, где доминируют водные объекты. Результаты оценки важны для определения перспектив развития въездного туризма, что определено Государственной программой по развитию туризма «Беларусь гостеприимная» на 2016–2020 гг. [4].

Наибольшее развитие в Беларуси получили рекреационный и активный виды водного туризма (ВВТ). Каждый из ВВТ имеет приоритетные требования как к условиям их организации, так и к специфическим элементам объектов туристско-рекреационной инфраструктуры (ОТРИ).

Начиная со второй половины XX века и по настоящее время, вопросы туристско-рекреационного использования (ТРИ) и оценки ТРП водных объектов стали предметом научно-методических исследований как отдельных авторов, так и научно-исследовательских организаций в нашей стране и за ее пределами.

Объектом туристско-рекреационной оценки (ТРО) является ТРП, который состоит из объектов. Объекты ТРП – это материальные предметы, системы, процессы и явления, а также стандарты, необходимые для реализации рекреационной деятельности (РД), которые для нее выполняют роль фона [5, с.10]. Но ТРО ТРП всегда проводится с позиции субъекта – человека, осуществляющего РД в соответствии с его запросами и потребностями в том или ином виде туризма и отдыха [6, с.17–18]. В связи с этим определим понятие и идентифицируем структуру ТРП.

Российский ученый Е.А. Реанович трактует ТРП в значении ресурс, резерв, возможности [7, с. 14–15]. Существует три научных подхода к понятию ТРП. При первом варианте происходит отождествление понятий ТРП и «рекреационные ресурсы» (РР) [8, с. 381–382]). Второй подход имеет ресурсное значение, под ТРП территории «понимается совокупность туристско-рекреационных ресурсов (ТРР), их территориальных сочетаний и условий, которые способствуют удовлетворению потребностей населения в туристской и РД» [9, с. 69].

При третьем подходе – системном, оценка ТРП проводится на основе концепции системности в рекреационной и туристической деятельности, которую в 1969 г. разработали В.С. Преображенский и Л.И. Мухина [10, с. 23–24]. Именно этим ученым принадлежит приоритет определения понятия территориальных рекреационных систем (ТРС). ТРС состоит из элементов с такими свойствами, как функциональная и территориальная целостность. В качестве элементов подсистемы ТРС В.С. Преображенский выделил: группы отдыхающих; природные комплексы; культурные комплексы; технические сооружения (системы); группу обслуживающего персонала; орган управления.

Кроме того, вопросом ТРС занимались Н.С. Мироненко и М. Бычварова [11]. Согласно ресурсному подходу, ТРП – это ресурсы со свойственными им характеристиками, использование которых позволяет удовлетворять потребности рекреантов. По классификации А.С. Кускова, в составе ТРП выделяют природные, культурно-исторические, социально-экономические ресурсы и туристскую инфраструктуру [5, с. 498].

В соответствии с целями настоящей работы, анализируются только природные ТРП водотоков и объекты туристской инфраструктуры (ОТИ). Культурно-исторические и социально-экономические ресурсы не являются объектами данного научного исследования (рис. 1).

Для восстановления сил отдыхающих осуществляется РД [12, с. 31]. Реализация РД возможна посредством рекреационных занятий (РЗ), которые делятся на две группы: 1 – рекреационно-лечебные и рекреационно-оздоровительные; 2 – рекреационно-спортивные и рекреационно-познавательные занятия [13, с. 46–47].

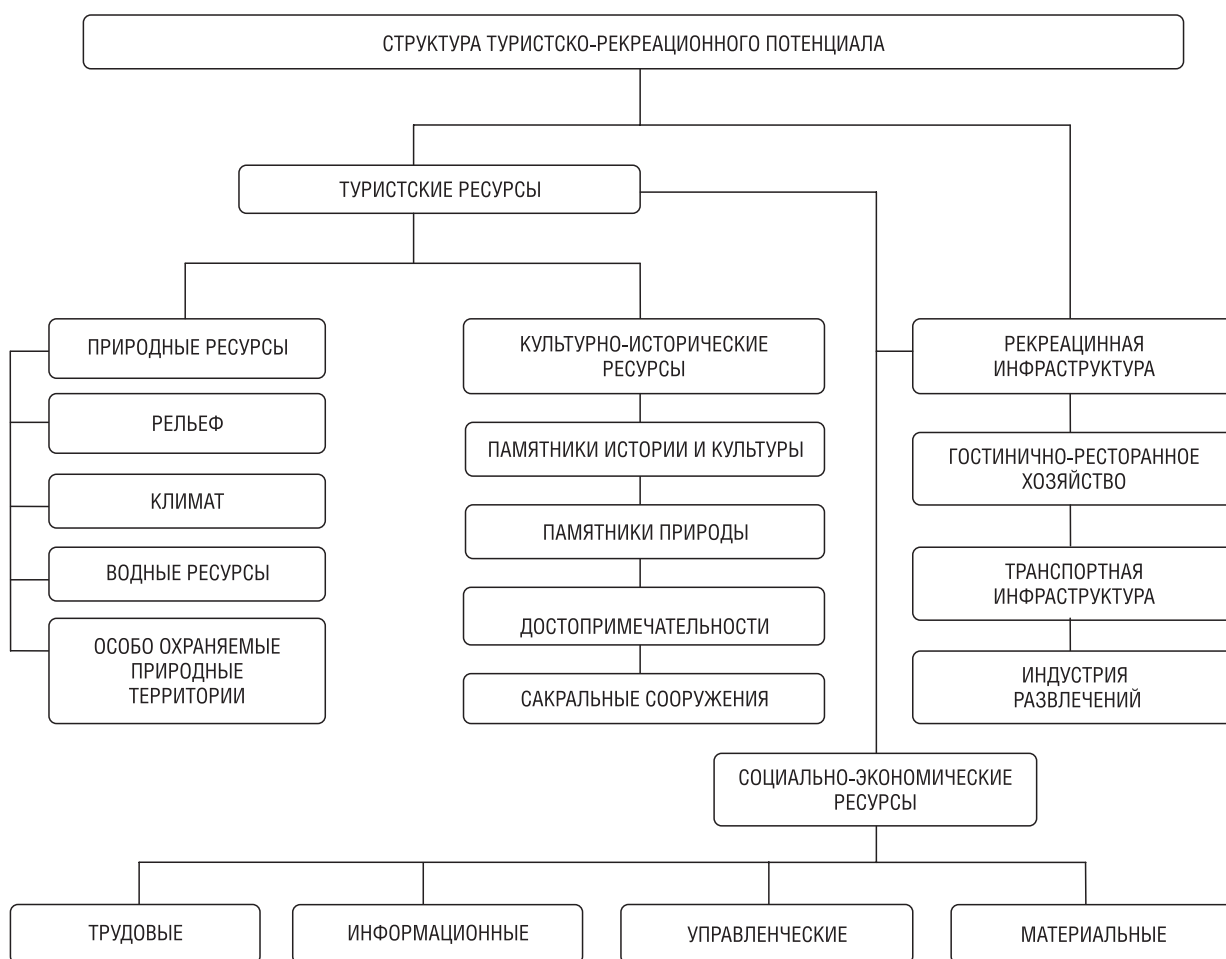


Рис 1. Структура ТРП территории (составлено авторами по [13, с. 135])

Н.С. Мироненко и И.Т. Твердохлебов указывали, что «для оптимизации проектирования, размещения и развития ТРС, определения их ключевых функций необходима оценка ТРП. РД основана на ценности отдельных ресурсов и их сочетаниях, устойчивом развитии туризма и рекреации» [14, с. 46–47]. Е.Ю. Колбовский предложил поэтапный алгоритм оценки ТРП, что позволило систематизировать проведение оценки ТРП [15, с. 182] (рис. 2). При этом Е.О. Ушакова, И.И. Золотарев, С.А. Вдовин при оценке ТРС рекомендовали руководствоваться общими принципами, методами и правилами, которые позволяют разработать концепцию комплексной оценки ТРП; проводить оценку отдельных видов ТРП и условий, определять ТРП регионов; осуществлять туристское районирование и рейтинговую оценку региона; обеспечивать паспортизацию туристских ресурсов

и объектов, ведение реестра и кадастра туристских ресурсов (КТР) [16, с. 45].

Оценочный метод позволяет выявить пространственную дифференциацию ТРП [18, с. 93]. В методологическом плане – это способ установления значимости чего-либо для действующего и познающего субъекта [19, с. 96]. В качестве субъекта может выступать как турист, так и квалифицированные эксперты на стадии проектирования и размещения ТРС [20, с. 40]. Согласно Е. О. Ушаковой, все методики оценки ТРП дифференцируются на количественные, качественные и смешанные (рис. 3) [21, с. 45].

В результате анализа научно-методической литературы по объекту исследования нами были выделены три школы: советская (1960–1992 гг.); постсоветская (с 1996 г. по настоящее время); зарубежная (с 1960 г. по настоящее время) (табл. 1)

Со второй половины XX века научное сообщество Советского Союза проявляло интерес к проблеме оценки ТРП. К числу основоположников *советской рекреационной школы* относятся: В. С. Преображенский (1975, 1980), Ю. А. Веденин (1969, 1987), Н. Н. Мирошниченко (1969, 1984), Б. Н. Лиханов (1975, 1980),

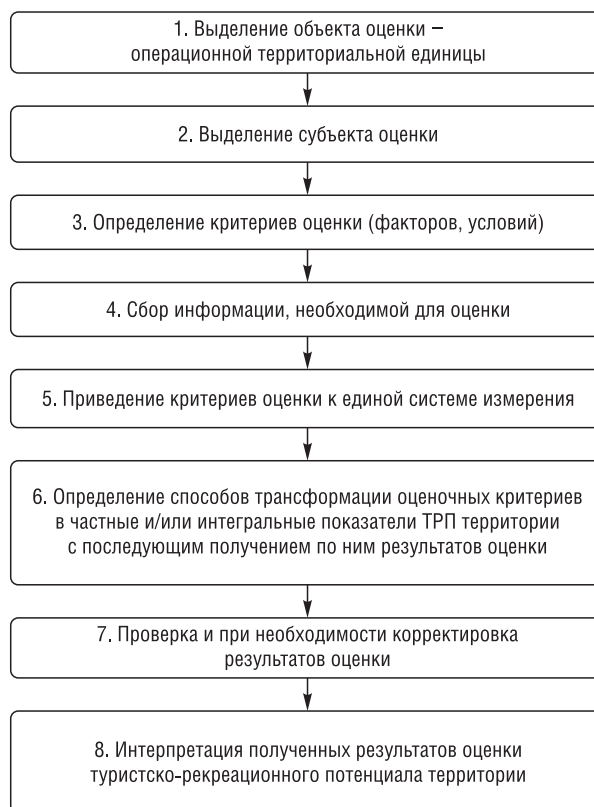


Рис. 2. Этапы проведения комплексной оценки ресурсов для развития туризма (составлено авторами по [13, с. 118; 17, с. 108–118])



Рис. 3. Теоретико-методологические подходы к оценке ТРП территорий и акваторий (составлено авторами по [13, с. 94; 19, с. 86–97; 21, с. 46–47])

Т а б л и ц а 1. Научные школы оценки природно-ресурсного потенциала водных ресурсов

Научная школа	Научный подход	Авторы	
Советская экономико-географическая школа	Факторный	Е. М. Ратнер (1967), Н. Н. Мирошниченко (1969), И. С. Кандор, Д. М. Демина (1974), Л. И. Мухина (1975), Н. А. Данилова (1980), Ю. А. Веденин (1982)	
		Л. М. Ратькова (1970), Е. Б. Лопатина (1970), И. Г. Галямина, В. Б. Нефедова, Е. Д. Смирнова, Л. Г. Швидченко (1973), Э. Л. Файбусович, Л. В. Четов (1973), Л. А. Чубуков (1975), Н. С. Мироненко (1981), А. Г. Никишина (1983), И. И. Пирожник (1985), Н. И. Кучина (1986), А. И. Игнатенко (1989), В. М. Широков (1990)	
	Аналитический	В. С. Преображенский (1980), О. А. Савельев (1981), Л. Н. Пушкова (1981), Ю. С. Васильев (1988), Кукушкин В. А (1990)	
	Математический	В. И. Русанов (1973), Б. Н. Лиханов (1975), И. Н. Руденко, Л. В. Ребенок (1975), В. Г. Капустин (1983), А. Б. Авакян (1990)	
Постсоветская экономико-географическая школа	Факторный	Г. А. Потаев, (1996), А. В. Пахомов (1999), А. В. Дроздов (2005), Е. Ю. Колбовский (2006)	
		О. Ф. Якушко (1995), Н. С. Шевцова (1998), А. В. Пахомов (1999), В. А. Рубцов (2004), А. Г. Гранберг (2004), В. Ф. Данильчук (2005), А. Я. Бовсуновская (2005), А. С. Кусков, В. Л. Голубева, Т. Н. Одинцова (2005), О. В. Серова (2007), С. А. Боголюбова (2009)	
	Картографический	В. Ф. Данильчук (2005), Н. С. Кудоковцева, И. Л. Семичастный (2008), З. А. Трифонова, М. М. Трифонова (2010), Д. С. Маркова (2011), Ю. В. Кокина (2012), О. Ф. Голлерова (2013), Е. О. Ушакова (2013), И. В. Ланцова (2014), О. В. Токарчук (2016), М. В. Гудковских (2017)	
	Региональный	Е. А. Джанджугазова (2005), Н. Н. Путинцева (2005), Ю. А. Худеньких (2006), П. С. Ширинкина, А. С. Пахомова (2007), О. Е. Афанасьев (2007), А. А. Александрова (2007), А. А. Кизим, А. Н. Вильвашова, И. В. Кулькова (2010), Н. Н. Лысенко, К. И. Сафонова (2010), Т. С. Вертинская, В. А. Клицунова (2014), Л. И. Кулакова, В. А. Осипова (2017)	
Зарубежная экономико-географическая школа	Европейская	Факторный	М. Ржетава (2016)
		Аналитический	Х. Н. Вом Диер (1972), М. Гуссен, Ф. Лангерс (2000)
		Математический	К. Блацейжик (2001)
		Картографический	Л. Шульц (1981)
	Американская	Геоэкологический (экологический риск на основе биоиндикаторов)	Р. Е. Пфистер (1977), Г. Бхат, Дж. Бергстром, Р. Дж. Тизли, Дж. М. Боукер, Х. К. Корделл (1998)
		Системный	А. И. Дизенгер, К. Харпер, Л. Д. Джеймс (1968), Луна Б. Леопольд (1975), Л. Хамиль (1975), М. Чубб, Е. Х. Бауманн (1976), Р. Ф. Лейси, Б. Е. Пайк (1989)
		Картографический	Р. Яксон (1971), Л. Стефан, Ж. Смит (1987)
		Геоинформационные технологии	Ф. Вейланд, П. Латтер (2014)
		Математический	Л. Картвелешвили, А. Мацаракис, А. Амираншвили, Н. Куталадзе (2011), Ал. Маммун (2012)
	Типологический	Ф. Вейланд (2012)	
	Факторный	Ахмад А. Нуруддин, Али Мухаммад (2013)	

Н. С. Мироненко, Н. Т. Твердохлебова (1981) и другие [22–24]. В советской школе существовало два типа оценки природного ТРП водотоков в зависимости от цели исследования: на региональном и бассейновом уровнях [25–28]. Степень пригодности природного ТРП водотоков определяется с использованием покомпонентных (частных) [11] и интегральных (общих) [29, 30] оценок.

В 1960–90-е годы при идентификации ценности природного ТРП преобладал компонентно-отраслевой подход. Анализировалась степень пригодности местности для конкретного вида туристско-рекреационной деятельности (ТРД) или же исследовался один или несколько компонентов территории с позиций их значимости для РД [31]. При этом подходе выделяли четыре направления оценки (рис. 4).

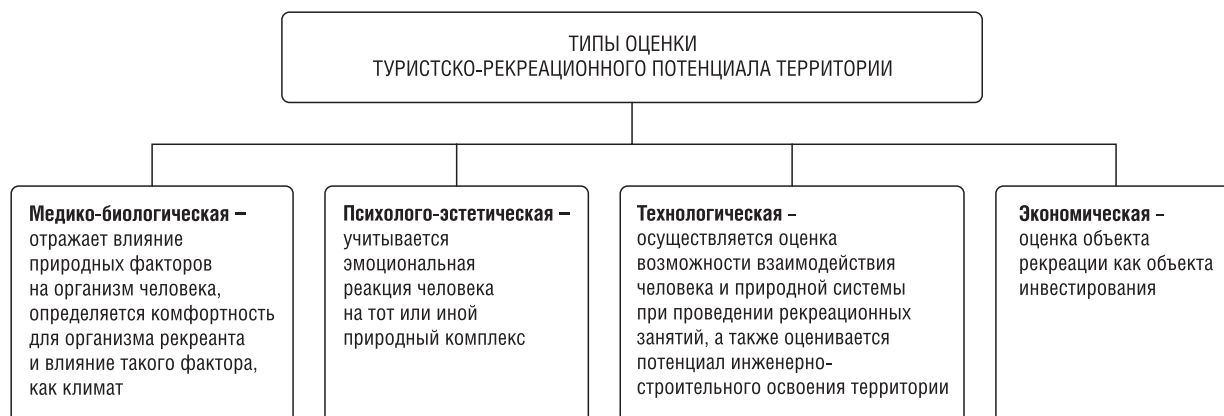


Рис. 4. Типы оценки туристско-рекреационного потенциала территории (составлено авторами по [14, с. 86–97; 36, с. 74–78])

Психолого-эстетическая и экономическая оценка ТРП в настоящей работе рассматриваться не будет.

Оценить ПРП в целом для водотоков нельзя, не оценив его составные части, целесообразно вначале охарактеризовать **покомпонентные виды оценок**.

Медико-биологическое направление оценки основывается на степени воздействия факторов природной среды на организм человека, а также степени физиологической комфортности и безопасности отдыха для здоровья людей. Разработка теоретических основ оценки климатических условий с позиций обеспечения комфорта для организма человека в 1970 г., принадлежит Э. Л. Файбусовичу, Л. В. Чечетову, И. С. Кандрору и др. исследователям [32–35].

Первыми методику медико-климатической оценки с последующим выделением неблагоприятных факторов для реализации РД разработали советские ученые Э. Л. Файбусович и Л. В. Чечетов (1973) [32]. В рассматриваемый период И. С. Кандрором, Е. М. Ратнером, В. И. Русановым, Д. М. Деминой (1974) была разработана методика медико-биологической комплексной оценки теплового состояния здорового человека в возрасте от 18 до 35 лет в зависимости от структуры метеорологических факторов [33]. Практическую значимость методика получила в работах Л. И. Мухиной, Ю. А. Веденина и Н. А. Даниловой [37–39].

В 1980-е годы разработкой методов оценки климатических условий для ТРД занимались также В. С. Преображенский, Н. А. Данилова, О. А. Савельев, В. Г. Капустин, Л. Н. Пушкова и др. [37, 40–43].

В. С. Преображенский разработал методику оценки благоприятности типов погоды для летних видов отдыха. Им были ранжированы девять типов погоды по И. С. Кандрору по оценочным категориям: комфортные, жаркие субкомфортные, жаркие дискомфортные, прохладные субкомфортные, холодные дискомфортные.

Позже В. С. Преображенским и Н. А. Даниловой установлено соответствие между типами погоды и рекомендуемыми летними видами ТРД. При комфортном типе погоды возможно осуществлять весь спектр ВВТ. При жарком субкомфорте целесообразно выбирать купание, парусный, водно-лыжный и водно-моторный спорт. При прохладном субкомфорте рекомендуются гребли на лодках и парусный спорт. Холодные и жаркие дискомфортные типы погоды не пригодны для летних ВВТ.

Методика физиологической оценки типов погоды для теплого сезона по В. С. Преображенскому получила практическое применение в работах О. А. Савельева, Л. Н. Пушковой, В. Г. Капустина, В. И. Русанова, А. Г. Никишиной, Л. М. Ратьковой, Е. Д. Смирновой, И. П. Чалой, Н. И. Кучиной и др. [17, 18, 31, 35, 41–44].

1990-е годы характеризуются как совершенствованием существующих методик определения климатического ТРП, так и разработкой новых научно-методических подходов к его ТРО. К числу таких авторов относятся: Ю. С. Васильев, В. А. Кукушкин [25], Ю. А. Веденин [16], А. Б. Авакян [26], Г. А. Потаев [45].

Ю.С. Васильев и В.А. Кукушкин разработали методику определения продолжительности периода с благоприятными условиями в соответствии со структурой ВВТ на водных объектах. Сущность методики заключается в дифференцированном учете продолжительности действия ветрового фактора, обеспечивающей возможность реализации различных ВВТ. Авторами было установлено, что в СССР число дней для купания со скоростью ветра – 0–2 м/с соответствует 30–70; для гребли на лодках и байдарках при силе ветра 0–3 м/с – 45–120; для катания на яхтах при скорости ветра 4–8 м/с – 10–100 дням. Согласно Ю.А. Веденину, продолжительность купального сезона в СССР составляет 60–90 дней. По А.Б. Авакяну минимальная длительность периода для купания соответствует 30 дням, максимальная – не определялась.

Г.А. Потаев провел зонирование территории Беларуси по продолжительности комфортного климатического периода с выделением следующих зон: северной – умеренно-благоприятной (60 дней), центральной – благоприятной (85 дней) и южной – весьма благоприятной (112 дней).

Методика интегральной ТРО климата для ВВТ в Беларуси была разработана Н.С. Шевцовой (1999) [46]. Применение этой методики позволило определить продолжительность комфортного климатического периода для купания (51–86 дней), гребли на лодках (77–129 дней) и катания на яхтах (15–79 дней).

Технологическая оценка. По Л.И. Мухиной, технологическая оценка – это отношения между субъектом и объектом, а ее предметом являются системы типа «природный комплекс–техническая система». Автором разработаны принципы и методология технологической оценки ПАК, сформулированы понятия «благоприятность» и «устойчивость» с выделением их степеней [29, 47].

Интересна методика С.А. Боголюбовой (2009) по дифференциации водных объектов в зависимости от структуры видов РД, для которых эти объекты используются [48]. Оценка водных объектов для пляжно-купального отдыха проводится на основе гидрологических, морфологических и морфометрических показателей. Для спортивных ВВТ ТРО проводится с использованием гидрологических, климатических, морфометрических и ландшафтных показателей.

Покомпонентные оценки получили развитие в 1960–90-х годах. Возникает необходимость оперировать не только покомпонентными, но и комплексными оценками (КО) ТРП [49, с. 94].

В советский период весомый вклад в развитие **комплексной оценки** природно-акваториального комплекса (ПАК) внесен такими классиками рекреационной географии, как Ю.А. Веденин и Н.Н. Мирошниченко [6], И.Н. Руденко, Л.В. Ребенок [58], В.С. Преображенский, А.Н. Игнатенко [21], И.Г. Галямина [30], Н.С. Шевцова [89, 90, 92, 98, 101], В.Ф. Данильчук, А.Я. Бовсуновская [15–17], О.В. Серова [78], З.А. Трифонова, М.М. Трифонова [83], Д.С. Марков [40], Ю.В. Кокина [28], Е.О. Ушакова [84], О.Ф. Голлерова [9], И.В. Ланцова [36], О.В. Токарчук, С.М. Токарчук [82], М.В. Гудковских [11].

Одними из первых методику КО природного ТРП предложили Ю.А. Веденин и Н.Н. Мирошниченко (1969) [23]. В дальнейшем она неоднократно оптимизировалась другими авторами [47, 50–52].

Ю.А. Веденин и Н.Н. Мирошниченко (1969) применили дифференцированный подход при выделении показателей КОТРП для летних и зимних видов РД [23]. К числу приоритетных показателей пригодности для летних видов РД они отнесли продолжительность благоприятных температурных условий; продолжительность солнечного сияния; термическую характеристику вод морей; относительную влажность воздуха; показатели рельефа; обводненность; растительность; заболоченность. Для зимних видов РД дополнительно выделили ветровой режим; наличие снежного покрова; рельеф; растительность. Все природные факторы были дифференцированы на основные и дополнительные. Основные факторы, оцениваемые в баллах, при суммировании результатов пофакторной оценки учитывались с коэффициентом 2,0. В итоге все территории были разделены на наиболее благоприятные; благоприятные; относительно благоприятные; малоблагоприятные; неблагоприятные.

В 1970-е годы разработкой методики интегральной ТРО водотоков на основе регионального подхода занимались И.Н. Руденко и Л.В. Ребенок [53]. Они определяли ТРП водных объектов

БССР, оценивая его по критериям: 1) уровень соответствия водотока требованиям для различных ВВР; 2) количество возможных видов отдыха; 3) требуемые капитальные вложения для повышения рекреационной ценности акваторий. При этом итоговая ТРО водотоков была представлена как синергетический эффект от физиолого-климатической, технологической и психолого-эстетической видов оценки.

В 1980-х годах был создан ряд методик комплексной ТРО, наиболее значимые из которых представлены в работах В.С. Преображенского и А.Н. Игнатенко, И.Г. Галяминой [9, 54]. Сущность методики КО ТРП В.С. Преображенского и А.Н. Игнатенко заключается в объединении частных оценок, которые проводятся по прогулочно-эстетическим, прогулочно-гигиеническим, промысловым и селитебным угодиям [9]. При этом итоговые результаты количественной или качественной оценки переводятся в баллы.

В 1990-е годы снизились темпы разработки новых методик КОТРП, что связано с политическими процессами в Центрально-Восточной Европе. Начало XXI века в странах ЦВЕ характеризуется увеличением доли туризма и возросшим интересом к разработке методик КОТРП водных объектов с использованием новейших технологий, что ознаменовало переход к **постсоциалистическому этапу** развития указанного направления в рекреации.

Наиболее значимые работы этого периода представлены как у российских [5, 13, 55–64] и украинских [63, 65, 66], так и у белорусских ученых [67–74]).

Заслуга М.Д. Шарыгина, Т.В. Субботина, С.Б. Фоминых (1995) [55] в разработке методики КО заключается в использовании в ней математических методов. Формула расчета ТРП представлена ниже [55, с. 108–118]:

$$РП = K_jK + K_2Г + K_3Ж + K_4P + Э + П, \quad (1)$$

где РП – рекреационный потенциал; K_j , K_2 , K_3 , K_4 – вес значимости природных компонентов в общем итоге; K – гидроклиматический потенциал; $Г$ – геолого-геоморфологические особенности территории; $Ж$ – животный мир; P (растительный мир) – биологический потенциал; $Э$ – экологическая ситуация в районе; $П$ – привлекательность территории.

Алгоритм оценок комплексного ТРП территории и его природной, медико-биологической, психолого-эстетической, технологической составляющих предложен В.А. Рубцовым и С.А. Шабалиной (2004) [56]. Вначале исследования формируется перечень показателей ТРО. Далее территория разбивается на операционно-территориальные единицы (ОТЕ) и они ранжируются по каждому из отобранных факторов в соответствии с уровнем обладания свойствами по ним. Затем ОТЕ исследуется с точки зрения взаимного соответствия пространственного распределения учитываемых факторов. Для каждой ОТЕ подсчитывается величина – значение меры «качества» этой ОТЕ и отражающая ее место в совокупности значений оценки. Интегральный ТРП определяется методом наложения компонентных (природно-климатической; техногенно-экологической; спортивно-прогулочной) карт.

Учеными научного центра комплексных исследований Донецкого института туристического бизнеса В.Ф. Данильчуком и А.Я. Бовсуновской (2005) разработана методика оценки ТРП для ВВТ [65, 66], в основу которой положена качественная и количественная оценка как составляющих природного ТРП (водные объекты и др.), так и ОТРИ. При этом каждый элемент ТРП оценивается с использованием весовых коэффициентов от 1 до 5. В итоге на основе частных ТРО рассчитывается интегральный показатель, по значению которого определяется степень рекреационной пригодности ПАК.

Украинскими учеными В.Ф. Данильчуком, Н.С. Кудоквецевым и И.Л. Семичастным (2005) разработана методика приоритетного освоения туристско-рекреационных территорий с использованием пофакторного анализа и ГИС-технологий [63]. Результаты пофакторной оценки выражены в баллах (1,0–10,0) с использованием коэффициентов значимости (0,1–1,0) по каждой группе туристско-рекреационных объектов (природно-географические, природно-антропогенные и др.). По результатам КО ТРП по каждой группе создаются электронные цифровые карты (ЭЦК). Затем строится итоговая ЭЦК, позволяющая визуализировать географию ТРП и возможность его использования.

Региональная комплексная методика ТРО П. С. Ширинкина и А. С. Пахомовой (2007) основана на следующих показателях: перспективность территории для развития различных видов туризма; транспортная сеть; комплексность ТРП и их сочетание; плотность ТРП; сервис; туроперейтинг; сочетание приоритетных территорий туризма [57].

О. В. Серовой (2007) была создана методика ТРО водных объектов, основанная на пофакторной оценке групп показателей (климат, качество воды и др.). При этом каждый показатель оценивается с использованием коэффициента его значимости по 5-балльной шкале благоприятности. Значение интегральной оценки получается путем суммирования частных оценок [62].

Методика оценки ТРП А. В. Дроздова (2005) [75] может применяться как в условиях особо охраняемых природных территорий (ООПТ), так и для других территорий. Автором выделяются компоненты оценки ТРП в составе природных и культурных ландшафтов и их компонентов, средств и условий осуществления туров и проводится процедура оценки ТРП по группам показателей с учетом приоритетов РД к качеству среды. Оценка ТРП осуществляется в функциональном, гигиеническом, эстетическом, технико-экономическом и природоохранном аспектах. Для получения КО все количественные оценки суммируются и переводят в качественные. Данная методика актуальна для сравнительного анализа РД двух объектов.

Для КОТРП региона М. А. Саранча (2007) разработал алгоритм геоинформационной оценки территории с использованием системы «операционных территориальных единиц» (ОТЕ). Оценочными факторами выступают рекреационная привлекательность ландшафтов; плотность и интенсивность функционирования автобусных маршрутов; плотность и значимость палатников; наличие и статус ООПТ; разнообразие туристских маршрутов (пешие, водные и др.); ОТРИ [13, 58–60].

Методика КО ТРП аквально-территориального комплекса (АТК), основанная на индексном методе, разработана З. А. Трифионовой и М. М. Трифионовой (2010) [64]. При этом КО составляющих ТРП (природный, историко-культурный, туристская инфраструктура, транспортный) проводится по формуле:

$$I = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (2)$$

где X – величина показателей исследуемых величин; I – индекс показателя.

Далее рассчитывается интегральный показатель как сумма промежуточных индексов по блокам с учетом поправочных коэффициентов (0,25 для каждого блока):

$$\Delta I = (I_1 \times b) + (I_2 \times b) + (I_3 \times b) + (I_4 \times b), \quad (3)$$

где ΔI – интегральный показатель; I_1 – промежуточный индекс природного потенциала; I_2 – промежуточный индекс обеспеченности историко-культурным потенциалом; I_3 – промежуточный индекс обеспеченности туристской инфраструктурой; I_4 – промежуточный индекс транспортной составляющей; b – поправочный коэффициент обеспеченности ресурсами (0,25).

Интересен системный подход к КОТРП А. С. Кускова, Н. Е. Нехаева (2010), сформировавших форму «Туристский паспорт территории» с семью оценочными блоками: объекты рекреационного интереса и рекреационной инфраструктуры, транспортное обеспечение рекреации и туризма, показатели экскурсионной деятельности, стимулирующие и лимитирующие факторы развития рекреации, главное конкурентное преимущество ТРП территории по сравнению с потенциалом других центров рекреации и туризма зарубежных стран, количество познавательных ресурсов территории, важность туристской функции для развития экономики [5, 61].

Применительно к водным объектам Н. С. Шевцовой разработана структурная модель КО природного ТРП акваторий рек, основанная на системе блоков. Она состоит из шести основных блоков: характер ТРИ акваторий рек; структура видов ТРИ; система целевых критериев и качества акваторий; процедура КО их акваториям с идентификацией профилирующих видов ТРИ и лимитирующих их факторов; пространственно-функциональное зонирование на локальном, районном и региональном уровнях, система адресных мероприятий по минимизации воздействия лимитирующих факторов, направленная на расширение ВВП от моно- до полифункционального спектра [67–74].

Отличительной особенностью методик КО ТРП в период 2010–2019 гг., является использование в них ГИС-технологий для визуализации результатов. Среди работ этого периода выделяются труды Д. С. Маркова [76], Ю. В. Кокиной [77], Е. О. Ушаковой [21] и др. [78–81]. Отметим основные работы относительно водных ресурсов.

С возникновением круизного туризма Ю. В. Кокиной (2012) была разработана методика КО природного ТРП рек [77]. Сущность ее состоит в оценке медико-биологической и ландшафтно-эстетической ценности. При этом КОТРП складывается из оценки по гидрологическим, морфологическим, биологическим показателям, климату, значимость которых корректируется коэффициентами.

Методика КОПРП АТК, позволяющая определить его специализацию для РД, представлена в работе Е. О. Ушаковой (2013) [21]. Использование методики позволяет рассчитать интегральный показатель ПРП, оценив природно-климатические, историко-культурные, социально-экономические виды ресурсов. Показатель ПРП измеряется в баллах и варьирует по шкале благоприятности от –2 до 5.

О. Ф. Голлеровой (2013) разработана методика оценки ТРП на водных объектах, основанная на анализе 14 критериев, характеризующих территориальные единицы (квадраты 5 на 5 км). Структура критериев включает группы показателей, позволяющих оценить климатические условия, водные объекты и др. Оценка проводится по 5-уровневой шкале пригодности. Затем с помощью ГИС-технологий строится результирующая карта географии ПРП путем комбинирования объектов природного и инфраструктурного потенциалов [78].

В работе И. В. Ланцовой (2014) представлена методика рекреационной бонитировки АТК водохранилищ [79]. Оценка качества компонентов природы для РД проводится по следующему модулю: количественная оценка природных ресурсов с использованием 3-балльной шкалы, построенной в соответствии с классами бонитета; оценка объемов и запасов природных ресурсов для ВВТ; оценка потребности в различных видах природных ресурсов.

В результате И. В. Ланцовой созданы картосхемы перспективного ТРП с указанием вида специализации РД. Автором разработана система мероприятий по снижению негативного воздействия РД на природную среду.

Во второй половине XX века тенденция ухудшения геоэкологического состояния природной среды на всех уровнях привела к необходимости учитывать ее качество в сфере туризма и отдыха. Попытка учесть эту составляющую осуществлена белорусскими исследователями О. В. Токарчуком и С. М. Токарчуком (2016) при разработке методики интегральной геоэкологической оценки (ГЭО) ТРП рек, озер, водохранилищ. Методика структурно состоит из трех блоков: оценка ТРП на основе показателей и критериев; оценка лимитирующих факторов; интегральная ГЭО ТРП водных объектов. В результате интегральной ГЭО ПРП формируется матрица, в которой по горизонтали отражается степень пригодности ПРП вод по 5-балльной шкале благоприятности (очень низкий, низкий, средний, высокий, очень высокий), а по вертикали – уровни влияния лимитирующих факторов на ВВР [80].

Одним из авторов, разработавших методику КОТРП АТК, основанную на статистических методах, является М. В. Гудковских [81]. Сущность данной методики заключается в использовании уравнения баланса:

$$\text{ТРП} = (|\text{П}| + |\text{СЭ}| + |\text{ТБ}|) - (|\text{НФ}| + |\text{ЭС}|), \quad (5)$$

где ТРП – туристско-рекреационный потенциал; П – природный блок (рельеф, биоклимат, водные ресурсы, ландшафты, ООПТ); СЭ – социально-экономические условия; ТБ – туристский блок (предприятия размещения и др.); НФ – неблагоприятные факторы; ЭС – экологическая ситуация.

Значимость каждого из 5 блоков рассчитывается по формуле:

$$B_j = \sum k a_j, \quad (6)$$

где B – блок оценки; a – компоненты блока; j – число компонентов блока оценки; k – коэффициент значимости компонента (от 0,5 до 1,5).

Результат КО оценивается по 5-балльной шкале благоприятности.

В 2000–2016 гг. теоретические основы рекреационной оценки получили дальнейшее развитие в трудах Е. А. Джанджугазовой [82], А. Г. Гранберга [83], Е. Ю. Колбовского [15] и др. [84–87], что связано с развитием регионального проблемного подхода к КОТРП с использованием системного, эмпирического, сравнительного анализов, математических методов классификации и типологии, математико-географического моделирования с целью изучения пространственных особенностей ТРП в регионах [88, с. 94–100].

Работа Е. А. Джанджугазовой (2005) [82] посвящена разработке методологических основ и практических рекомендаций по формированию стратегии развития регионального туристско-рекреационного комплекса (ТРК). В основу этого исследования положены системно-комплексный подход к количественной оценке ТРП, структуризация ТРП и степень его использования, методика определения возможностей его использования, формализация систематического учета состояния ТРП и идентифицировано их значение для туризма.

Особенность одной из методик оценки ТРП Е. Ю. Колбовского (2006) заключается в использовании комплексного геоэкологического подхода [15]. Процедура КОТРП основана на суммировании результатов пофакторного анализа набора туристских компонентов. Для обработки данных Е. Ю. Колбовский использует методы классификации и типологии, систематизации информации в составе таксономии и районирования. Автором структурирована вся совокупность способов районирования с выделением метода сравнения, системного, картографического, статистического и математического анализов. При этом ученый дифференцировал модели с выделением психологических, собирательных, систематизирующих, конструктивных, познавательных направлений. Главной особенностью КО ТРП является выделение лимитирующих факторов для ТРИ. Автор акцентирует внимание на количественных методах изучения динамики ТРС на разных исторических этапах, а также на выявлении пространственно-временных закономерностей развития туризма.

Практическую значимость приобрела методика интегральной оценки ТРП, разработанная Ю. А. Худеньких (2006) [85]. Она основана на балльной оценке отдельных компонентов ТРП, где используются показатели из природного, историко-культурного и социально-экономического блоков. Природный ТРП измеряется показателями объема и привлекательности территории применительно к массовым видам туризма. Баллы рассчитываются в соответствии с удельной значимостью объектов. Историко-культурный потенциал не является предметом оценки настоящей работы, поэтому его характеристика не приводится.

При оценке социально-экономического блока ТРП выделяются два компонента: транспорт и ОТРИ. Ключевым критерием оценки роли транспорта служит плотность автодорог. Оценка ОТРИ проводится на основе показателя, отражающего отношение числа объектов размещения и питания к численности населения территории.

В этот период в рекреационной географии возникает кластерный подход к оценке размещения ОТРИ, что находит свое отражение в корректировке методик оценки ТРП, который прослеживается в работах ряда ученых [89–91].

Специфика методики КО ТРП Л. И. Кулаковой и В. А. Осипова (2017) заключается в использовании регионального подхода и методов корреляционно-регрессионного анализа. Методика позволяет выявить факторы и критерии, позволяющие идентифицировать потенциально пригодные территории для РД. Методика оценки ключевых факторов представлена из покомпонентных и интегральных видов оценки [87]. Эта авторская методика генерирует составляющие методики КО Е. Ю. Колбовского [15], интегральную оценку ТРП Ю. А. Худеньких [85], диагностику потенциала туристского кластера А. А. Александровой [89], методики оценки ТРПМ Д. Шарыгина [55], факторной методики Н. Н. Лысенко и К. И. Сафоновой [86], покомпонентной оценки ТРПА В. Дроздова [75] и О. Е. Афанасьева [92].

Методика оценки ТРП А. В. Дроздова (2010) основана на выделении основных компонентов ТРП, таких как природный и культурный ландшафт, средства и условия реализации туров. Критериями оценки природного ландшафта являются: уникальность, сохранность и привлекательность [75].

О.В. Афанасьевым (2016) была разработана методика интегральной оценки ТРП, основанная на суммировании покомпонентных результатов оценки природного и социально-экономического потенциалов, использование которых зависит от ОТРИ [92]. При этом в качестве ведущих факторов были выделены: природный потенциал; природно-рекреационный потенциал ООПТ; историко-культурный потенциал и ОТРИ.

Интегральный показатель рассчитывался по следующей формуле:

$$P = V_1K_o + V_2T_o + V_3N_o + V_4B_o, \quad (7)$$

где V_1 – ТРП, K_o – относительный историко-культурный потенциал, T_o – относительный потенциал ООПТ, N_o – относительный потенциал природных ресурсов, B_o – относительный потенциал ОТРИ, V_1 – V_4 – весовые коэффициенты [92].

Интегральный показатель природной составляющей ТРП представляет сумму всех оценочных параметров, рассчитываемых по формуле:

$$N = R + C + V + L + M + G, \quad (8)$$

где N – показатель природных ресурсов; R – рельеф; C – климат; V – водные ресурсы; L – эстетическое разнообразие ландшафта; M – источники минеральных вод; G – уровень радиоактивного загрязнения.

Оценка ТРП по О.Е. Афанасьеву проводится по 4-балльной шкале. При этом значение каждого из пофакторных показателей определяется отношением значения уровня развития ресурса в данном административном районе к идентичному максимальному значению показателя по стране. Для определения интегрального потенциала используются значения весовых коэффициентов (для природных ресурсов – 0,3, для ОТРИ – 0,15). Использование методики О.В. Афанасьева позволяет оценить ТРП прибрежной территории. Результаты оценки являются основой для определения возможности размещения ОТРИ и проведения их оптимизации.

В период 1970–2019 гг. за рубежом сформировались европейская, американская, азиатская школы, различающиеся научными подходами и направлениями идентификации пригодности природного ТРП водных объектов. Отметим коротко наиболее значимые работы в каждой из школ.

Во второй половине XX века разработка методик оценки ТРП в Европе носила преимущественно практико-ориентированный характер, что связано с интенсивным развитием сферы туризма, которое стимулировалось процессами урбанизации и ростом потребностей городского населения в полноценном отдыхе. В связи с этим в Нидерландах в 1970-е годы возникла система ТРО, построенная на дифференцированном учете важности факторов природы для различных видов отдыха. Значения для каждого вида РД оцениваются по шкале от 0 до 5 баллов, а ее качественное или количественное состояние по шкале от 0 до 20 баллов. КО объекта для вида РД определяется путем суммирования частных оценок, умноженных на значимость характеристики [93].

В то же время в Германии оценка ТРП территории проводилась путем разбивки ее на квадраты по 16 км². Анализ их пригодности производится для видов РД как связанных, так и не связанных с водными объектами [94].

В 1990-е годы в Чехии широко используется метод идентификации природного ТРП, позволяющий учесть специфику водных объектов для РД. При проведении анализа целесообразности РД на реках и озерах на карте М 1:50000 выделялись участки площадью 18 км². Пригодность водных объектов определялась с помощью комплексного показателя R , учитывающего климат и морфометрию [25].

В начале XX века в Нидерландах в целях территориального планирования РД М. Гуссен и Ф. Лангер разработали методику оценки ТРП водных объектов для купания и рыболовства, основанную на системе приоритетных показателей [95]. В качестве основных критериев были выделены: для купания – качество воды, чистота, наличие ОТРИ в местах купания; для рыболовства – кроме первых двух для купания, идентифицированы рыбные запасы, вероятность

ловли рыбы, данные по землепользованию. Результатом работы стали карты районирования страны с выделением областей по их привлекательности для купания и рыболовства, построенные в системе ГИС с учетом шкалы благоприятности с выделением 5 уровней.

В связи с изменением климата, оказавшим существенное влияние на развитие туризма стран Европы, климат стал ведущим фактором при определении специализации страны в области туризма. Это стало основой для разработки К. Блазейчиком (2001) в Польше методики оценки климатического ТРП, основанной на уравнении теплового баланса человека, использование которого позволяет идентифицировать уровень климатического комфорта для различных видов РД [96, 97].

Португальскими учеными Ж. С. Рибейро, Л. С. Варейро (2012) [98] разработана методика, позволяющая оценить количество и качество аттрактивных объектов, в том числе и водных.

Методика КОТРП водных объектов с применением методов статистического анализа была разработана М. Ржетавой (2016) в Польше [99]. Сущность методики заключается в вычислении интегрального показателя, характеризующего ТРП водных объектов по 28 характеристикам восьми групп, а именно: эстетическая привлекательность; транспортная доступность водного объекта; доступность берегов и водоема; их безопасность; наличие памятников природы; ОТРИ.

Значение интегрального показателя ТРП рассчитывается по формуле [99]:

$$\text{ТРП} = \sum_{i=1}^n X, \quad (13)$$

где ТРП – туристско-рекреационные потенциал; X – характеристика; n – количество характеристик.

Во второй половине XX века в Америке развиваются преимущественно практико-ориентированные подходы к оценке ТРП акваторий, имеющие бассейновый подход. По направленности оценки вначале они ориентированы на эстетическую и технологическую виды оценок в связи с развитием пригородного туризма в зоне влияния водных объектов, а затем на экологическую оценку по причине необходимости проведения мероприятий водоохранной деятельности. В связи с этим в 1968 г. в США Д. Диринджером, К. Харпером и Л. Джеймсом была разработана методика оценки эстетического и технологического ТРП, расположенных в пределах 25 миль от города [100]. В результате авторами были оценены возможности рек для рыболовства, пикника, возможности формирования ОТРИ и др.

Пересечение интересов туризма и необходимость водохранных мероприятий в США привели к возникновению функционального туристско-рекреационного зонирования (ТРЗ) акваторий для сохранения их экосистем. Одним из авторов теории ТРЗ по видам РД является Р. Яксон (1971) [101], который выделил следующие зоны: прибрежную зону активного отдыха (150 м); открытую водную зону (от 150 м до 1000 м – для гребли на лодках, катания на водных лыжах); нетронутую природную зону (от 100 м – для защиты водной экосистемы от рекреационной нагрузки).

В 1975 г. Луна Б. Леопольд (1975) опубликовала систему «количественного разнообразия эстетических свойств ландшафта» для целей РД [102]. Эта система основана на «коэффициенте уникальности», позволяющий построить график гидрологического профиля реки, необходимый для оценки ее пригодности для РД. Впоследствии методика оценки ТРП Луны Б. Леопольд, в 1976 г. была оптимизирована М. Чабб и Е. Н. Бауманом [103]. Ее апробация проводилась в США с целью оценки ТРП рек. Для этого авторы разбивали реку на участки с интервалом одна миля. В пределах участков собирались данные по 67 показателям и каждому показателю присваивался балл в интервале от 1 до 5. В структуре выделялись физические, биологические и эстетические показатели. По результатам анализа данных определялись оптимальные виды РД и их целесообразность.

Вопросу экологической оценки речных террас для отдельного вида ТРИ – кемпинга посвящена научная работа Р. Е. Пфистера (1977) [104]. Для проведения оценки использовали мнение туристов, оценивающих местность анкетированием по 13 характеристикам. В результате составляли сводную таблицу, отражающую результаты оценки по показателю частоты выбора террас реки для РД.

В связи с диверсификацией туризма Л. Стефан и Д. Смит (1987) уточнили его структуру с выделением следующих видов: «катание на лодках», «отдых на природе», «городской туризм» и «городской туристический туризм» [105]. При этом особую популярность приобретают ВВТ и, как следствие, необходимость организации на водных объектах водоохраных мероприятий, что, по мнению Р. Яксона (1988), вызывает необходимость регулирования рекреационного воздействия от катания на лодках и других плавательных средствах [106].

Поэтому в условиях тенденции техногенного загрязнения водной среды в США Р. Ласей и Е. Пайк (1989) разработали методику оценки ТРП водных объектов с позиции экологического риска отдыха на воде [107]. Для принятия решения о выборе пляжа с целью купания нужна оценка безопасности гидрологических и гидрохимических показателей. В этой связи в США с 1990-го года для определения уровня пригодности ТРП водотоков применяется система биоиндикаторов, основанная на оценке экологического риска для выявления степени благоприятности вод для купания, гребли на лодках, рыбной ловли. Внедрение автоматизированной системы биоиндикаторов позволяет фиксировать до 38 % загрязнителей вод, не учитываемых традиционными методами [27].

Внедрение в практику подхода экологического риска при оценке ТРП водных объектов позволило Г. Бхату, Д. Бергстому, Р. Тислей и др. разделить территорию США на 10 экорегионов с расположенными на них водными объектами, каждый из которых имеет определенную специализацию в области ТРИ [108].

Методика оценки ТРП АТК создана Ф. Вейландом и П. Латерром (2014) в Аргентине основана на дифференциации территории на квадраты, поквadratная оценка проводится по ряду критериев, результаты суммируются и на заключительном этапе проводится итоговая оценка ТРП с помощью специализированного программного обеспечения [109].

Специфика азиатского подхода к оценке ТРП водных объектов заключается в том, что на территории этого континента сконцентрирован достаточно пестрый по уровню социально-экономического развития набор стран, представленный как государствами с переходным типом экономики в Центральной Азии, так и в большинстве своем развивающимися странами в Восточной (кроме Японии), Юго-Восточной и Южной Азии. Для них характерно формирование или интенсивное развитие туризма.

Так, в Грузии Л. Картвелешвили и др. [110] оценен ТРП Грузии путем вычисления интегрального индекса туристического климата (ИИТК) по формуле [111]:

$$\text{ИТК} = 8 \cdot \text{ДИК} + 2 \cdot \text{ЕИК} + 4 \cdot \text{АО} + 4 \cdot \text{СПСС} + 2 \cdot \text{СВ}, \quad (14)$$

где ИТК – индекс туристического климата; ДИК – дневной индекс комфорта (средняя максимальная температура воздуха; максимальная температура воздуха; средняя относительная влажность); ЕИК – ежедневный индекс комфорта (средняя температура воздуха; средняя относительная влажность); АО – атмосферные осадки; СПСС – суточная продолжительность солнечного сияния; СВ – скорость ветра.

ИТК оценивается по 100-балльной шкале.

В Индии Ал Маммуном (2012) для оценки ТРП АТК используется методика «весовой суммы» [112]. Особенность методики заключается в суммировании значений по трем аспектам: физическому, социальному и природному. Для оценки каждого из них используется набор параметров, которым присваивается значение от 0,2 до 1,0 с шагом 0,2, а затем умножается на весовой коэффициент данного параметра. В итоге для вычисления интегрального показателя применяется следующее уравнение [112]:

$$V = \sum W_i \cdot [\sum w_j s_j], \quad (15)$$

где V – ТРП; W_i – один из трех аспектов; w_j – оцениваемый параметр; s_j – весовой коэффициент.

В Малайзии группой ученых Ахмадом А. Нуруддином, Али Мухаммадом (2013) разработана методика оценки ТРП рек, сущность которой заключается в их оценке по 3 группам факторов: физическим и химическим; биологическим; антропогенным. Каждый из факторов оценивается

по 4-балльной шкале. Далее проводится суммирование всех оценок ТРП для определения профилирующих видов РД территории [113].

Методика оценки пригодности водных объектов для РД, в основу которой положена система микробиологических показателей, была создана в Новой Зеландии Ф. Вейландом (2014). Процедура оценки проводится в два этапа: санитарно-гигиенический мониторинг (СГМ) и микробиологическая оценка (МО). Цель СГМ – идентификация потенциальных источников загрязнения. При МО используются еженедельные данные за 3–5 лет. Основными микробиологическими показателями качества вод являются: содержание в воде бактерий *Escherichiacoli* (кишечная палочка) и *Enterococci* (энтерококки) в 100 мл [114].

Проведенный обзор научно-методической литературы за период с 1960 по 2018 г. показал, что накоплен обширный методический материал как по покомпонентной, так и по комплексной оценке ТРП водных объектов, позволивший выделить в ее развитии 3 школы: советскую, постсоветскую и зарубежную, отличающиеся неидентичностью теоретико-методологических подходов, основных направлений и методик оценки ТРП.

Список использованных источников

1. *Александрова, А. Ю.* Международный туризм: учеб. пособие / А. Ю. Александрова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: КНОРУС, 2010. – 464 с.
2. World Tourism Organization UNWTO [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <http://www2.unwto.org/en>. – Дата доступа: 28.05.2017.
3. Регионы Республики Беларусь. Социально-экономические показатели: стат. сб. / Нац. стат. комитет Респ. Беларусь. Т. 1. – Минск, 2016. – 774 с.
4. Об утверждении Государственной программы «Беларусь гостеприимная» на 2016–2020 г.г.: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23.03.2016 г., №232 // Национальный правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21600232>. – Дата доступа: 28.04.2017.
5. *Кусков, А. С.* Рекреационная география: учеб.-метод. пособие / А. С. Кусков, В. Л. Голубева, Т. Н. Одинцова. – М.: Флинта: МПСИ, 2005. – 504 с.
6. *Николаенко, Д. В.* Рекреационная география: учеб. пособие / Д. В. Николаенко. – М.: ВЛАДОС, 2001. – 288 с.
7. *Реанович, Е. А.* Смысловое значение понятия «потенциал» / Е. А. Реанович // Междунар. науч.-исследоват. журн. [Электронный ресурс] – 2012. – №7 (7). Ч. 2. – С. 14–15. – Режим доступа: <http://research-journal.org/economical/smyslovoe-znachenie-ponyatiya-potencial/>. – Дата доступа: 28.04.2017.
8. *Калужский, М. Л.* Экономика Западной Сибири: Омская область: учеб. пособие / М. Л. Калужский, А. Р. Сараев. – М.: Директ-Медиа, 2013. – 697 с.
9. Комплексное использование и охрана водных ресурсов / О. Л. Юшманов [и др.]; под ред. О. Л. Юшманова. – М.: Агропромиздат, 1985. – 303 с.
10. *Преображенский, В. С.* Теоретические основы рекреационной географии / под ред. В. С. Преображенского. – М., 1975. – 222 с.
11. Рекреационные системы / под ред. Н. С. Мироненко, М. Бычварова. – М.: МГУ, 1986. – 134 с.
12. *Пирожник, И. И.* Основы географии туризма и экскурсионного обслуживания / И. И. Пирожник. – Минск, 1985. – 253 с.
13. *Саранча, М. А.* Туристский потенциал территории: проблематика определения сущности и структуры / М. А. Саранча // Вестн. УдГУ. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2015. – Вып. 3. – С. 134–140.
14. *Мироненко, Н. С.* Рекреационная география / Н. С. Мироненко, И. Т. Твердохлебов. – М.: МГУ, 1981. – 207 с.
15. *Колбовский, Е. Ю.* Экологический туризм и экология туризма: учеб. пособие / Е. Ю. Колбовский. – М.: Академия, 2006. – 256 с.
16. Рекреационные ресурсы СССР / под ред. Ю. А. Веденина. – М.: Наука, 1990. – 166 с.
17. *Ратькова, Л. М.* Опыт оценки территории Московской области по физиолого-гигиеническим показателям / Л. М. Ратькова, Е. Д. Смирнова, И. П. Чалая // Вестн. МГУ. Сер. геогр. – 1970. – №3. – С. 43–47.
18. *Кучина, Н. И.* Экономико-географические проблемы использования рекреационных ресурсов СФРЮ: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.02 / Н. И. Кучина; МГУ им. М. В. Ломоносова. – М.: Патент, 1986. – 24 с.
19. География туризма: учеб. пособие / В. И. Кружалин [и др.]. – М.: Федеральное агентство по туризму, 2014. – 336 с.
20. *Луговая, И. В.* Туристская привлекательность региона как маркетинговое понятие / И. В. Луговая // Брендинг малых и средних городов России: опыт, проблемы, перспективы: материалы Всерос. заоч. науч.-практ. конф., г. Екатеринбург, 2014 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 37–41.
21. *Ушакова, Е. О.* Методологические основы оценки ресурсов развития туризма региона / Е. О. Ушакова, И. И. Золотарев, С. А. Вдовин. – Новосибирск: СГГА, 2014. – 194 с.
22. Географические аспекты конструирования новых типов рекреационных систем / В. С. Преображенский [и др.] // Изв. АН СССР Сер. геогр. – 1972. – №1. – С. 5–25.
23. *Веденин, Ю. А.* Оценка природных условий для организации отдыха / Ю. А. Веденин, Н. Н. Мирошниченко // Изв. АН СССР. Сер. геогр. – 1969. – №4. – С. 51–60.
24. *Преображенский, В. С.* Теоретические основы рекреационной географии / под ред. В. С. Преображенского. – М., 1975. – 222 с.

24. *Васильев, Ю. С.* Использование водоемов и рек в целях рекреации / Ю. С. Васильев, В. А. Кукушкин. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 225 с.
25. Рекреационное использование водохранилищ: проблемы и решения / под ред. А. Б. Авакяна. – М.: Наука, 1990. – 151 с.
26. Состояние и задачи разработки теории и методики оценки природных условий и ресурсов / Е. Б. Лопатина [и др.] // Изв. АН СССР. Сер. геогр. – 1970. – № 4. – С. 45–55.
27. *Стаускас, В. П.* Градостроительная организация районов и центров отдыха / В. П. Стаускас. – Л.: Стройиздат, 1977. – 164 с.
28. *Мухина, Л. И.* Принципы и методы технологической оценки природных комплексов / Л. И. Мухина. – М.: Наука, 1973. – 94 с.
29. Рекомендации для проектирования рекреационных мероприятий при водохозяйственном строительстве. – М.: Союзпроект, 1972. – 88 с.
30. *Пушкова, Л. Н.* Климатические ресурсы Северо-Запада РСФСР для целей рекреации / Л. Н. Пушкова. – М.: МФГО СССР, 1983. – С. 50–58.
31. *Файбусович, Э. Л.* Методика оценки природных условий для туризма / Э. Л. Файбусович, Л. В. Четов // Краеведение и туризм. – 1973. – С. 3–15.
32. *Демина, Д. М.* Физиологические принципы санитарно-климатического районирования территории СССР / Д. М. Демина, И. С. Кандрор, Е. М. Ратнер. – М.: Медицина, 1974. – 176 с.
33. *Ратнер, Е. М.* Метод физиологической оценки местного климата на тепловое состояние человека / Е. М. Ратнер // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры. – 1967. – № 5. – С. 446–451.
34. *Русанов, В. И.* Методы исследования климата для медицинских целей // Труды Томск. науч.-исслед. ин-та курортологии. – 1973. – Т. 12. – 190 с.
35. *Карчевская, Е. Н.* Методическое обеспечение регионального развития и пространственной дифференциации туризма (на примере Гомельской области): автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.24 / Е. Н. Карчевская; РГУ им. Иммануила Канта. – Калининград, 2008. – 22 с.
36. *Данилова, Н. А.* Климат и отдых в нашей стране / Н. А. Данилова. – М.: Мысль, 1980. – 156 с.
37. *Данилова, Н. А.* Районирование территории СССР по степени благоприятного и неблагоприятного воздействия климата на человека / Н. А. Данилова // материалы метеоролог. исследов. – М.: Межвед. геофизич. комитет при Президиуме АН СССР, 1979. – № 1. – С. 87–115.
38. Подходы к оценке условий рекреационной деятельности / Л. И. Мухина [и др.] // Изв. АН СССР. Сер. географ. – 1974. – № 3.
39. *Преображенский, В. С.* География рекреационных систем СССР / под ред. В. С. Преображенского, В. Н. Кривошеева. – М.: Наука, 1980. – 219 с.
40. *Капустин, В. Г.* Рекреационная оценка климата пригородной зоны Свердловска / В. Г. Капустин. – М.: МФГО СССР, 1983. – С. 117–126.
41. *Пушкова, Л. Н.* Климатические ресурсы Северо-Запада РСФСР для целей рекреации / Л. Н. Пушкова. – М.: МФГО СССР, 1983. – С. 50–58.
42. *Савельев, О. А.* Оценка природных ресурсов местоположений туристских баз / О. А. Савельев // Рекреационные ресурсы и методы их изучения: сб. ст. Моск. филиал геогр. о-ва СССР; отв. ред. Б. Н. Лиханов, В. Н. Кривошеева. – М.: МФГО СССР, 1981. – С. 21–27.
43. *Никишина, А. Г.* Рекреационная оценка климата Соловецких островов / А. Г. Никишина // Рекреационная география СССР: сб. ст. – М.: МФГО СССР, 1983. – С. 59–68.
44. *Потаев, Г. А.* Рекреационные ландшафты. Охрана и формирование / Г. А. Потаев. – Минск: Университетское, 1996. – 156 с.
45. *Шевцова, Н. С.* Оценка климата для целей рекреации на водоемах Беларуси с применением интегральных Н. С. Шевцова, А. В. Пахомов // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: тез. докл. междунар. науч. конф. – Нарочь, 1999. – С. 145–146.
46. *Мухина, Л. И.* Опыт разработки методики рекреационной оценки природных комплексов / Л. И. Мухина. – М.: ЦРИБ «Турист», 1975. – 128 с.
47. *Боголюбова, С. А.* Эколого-экономическая оценка рекреационных ресурсов / С. А. Боголюбова. – М.: Academia, 2009. – 256 с.
48. *Сафарян, А. А.* Подходы к оценке туристского потенциала территории / А. А. Сафарян // Географич. вестн. Туризм. – 2015. – № 1(32). – С. 89–102.
49. *Лиханов, Б. Н.* Программа характеристик природных компонентов и ландшафтов при проектировании рекреационных комплексов / Б. Н. Лиханов, Н. М. Ступина // Географические проблемы организации туризма и отдыха. Вып. 1. – М.: ЦРИБ «Турист», 1975.
50. *Мухина, Л. И.* Оценка природных условий / Л. И. Мухина, Ю. А. Веденин, Н. А. Данилова. – М.: Наука, 1975. – С. 131–159.
51. *Нефедова, В. Б.* Методы рекреационной оценки территорий / В. Б. Нефедова, Е. Д. Смирнова, Л. Г. Швидченко // Вестн. МГУ. Сер. географич. – 1973. – № 5.
52. Проектирование территорий курортно-рекреационного назначения в условиях БССР / Нормативно-метод. рекомендации. – Минск: БелНИИПградостроительства, 1975. – 171 с.
53. *Игнатенко, А. И.* Рекреационные территориальные системы: научные основы развития и функционирования / А. И. Игнатенко. – Киев: УМК ВО при МинВУЗе УССР, 1989. – 85 с.
54. *Шарыгин, М. Д.* Природно-ресурсный потенциал и его оценка / М. Д. Шарыгин // Эколого-экономические районы. – Пермь, 1995. – С. 108–118.
55. *Рубцов, В. А.* Оценка рекреационного потенциала и развитие внутреннего туризма в Республике Татарстан / В. А. Рубцов, С. А. Шабалина // Туризм и региональное развитие: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Смоленск: Универсум, 2004.

56. *Ширинкин, П. С.* Определение приоритетных территорий Пермского края для развития туризма: теория, методология, практика / П. С. Ширинкин, А. С. Пахомова // Вестн. ПГИИК. – 2007. – №5.
57. *Саранча, М. А.* Методологические проблемы интегральной оценки туристско-рекреационного потенциала территории / М. А. Саранча // Вестн. УдГУ. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2011. – Вып. 1. – С. 118–127.
58. *Саранча, М. А.* Рекреационный потенциал Удмуртской Республики: географический анализ и оценка с использованием геоинформационных технологий / М. А. Саранча, И. И. Рысин. – Ижевск: Научная книга, 2007.
59. Эволюция подходов к исследованию территориальных туристско-рекреационных систем / М. А. Саранча [и др.] // Вестн. УдГУ. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2011. – Вып. 3. – С. 101–113.
60. *Кусков, А. С.* Рекреационная география / А. С. Кусков, Н. Е. Нехаева. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010.
61. *Серова, О. В.* Ландшафтно-экологическая оценка Республики Башкортостан для развития природного туризма и отдыха: дис. ... канд. геогр. наук / О. В. Серова. – Тольятти, 2007.
62. *Данильчук, В. Ф.* Методика выявления приоритетного освоения туристско-рекреационных территорий на основе ГИС-технологий / В. Ф. Данильчук, Н. С. Кудоконцев, И. Л. Семичастный // Вісник ДІТБ. Сер: Економіка, організація та управління підприємствами туристичної індустрії та туристичної галузі в цілому. – 2008. – №12. – С. 25–29.
63. *Трифопова, З. А.* Оценка туристского потенциала территории Чувашской Республики / З. А. Трифопова, М. М. Трифопова // Вестн. ВГУ. Сер. География, геоэкология. – 2010. – №1. – С. 38–40.
64. *Данильчук, В. Ф.* Методология сравнительной оценки объектов и территорий туристического назначения / В. Ф. Данильчук // Культура народов Причерноморья / В. Ф. Данильчук. – 2005. – Т. 1, №74. – С. 36–39.
65. *Данильчук, В. Ф.* Методология оценки рекреационных территорий / В. Ф. Данильчук, Г. М. Алейникова, А. Я. Бовсуновская. – Донецк: ДИТБ, 2003. – 197 с.
66. *Шевцова, Н. С.* Комплексная оценка рекреационного природного потенциала акваторий озер Беларуси: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.36. / Н. С. Шевцова; Беларус. гос. ун-т. – Минск: ИЦ БГУ, 2001. – 20 с.
67. *Шевцова, Н. С.* Основные положения и принципы применения целевых показателей качества воды водоемов рекреационного назначения / Н. С. Шевцова // Природные ресурсы. – 1999. – №2. – С. 99–106.
68. *Шевцова, Н. С.* Функционально-временное зонирование акватории озер по количественным и качественным критериям рекреационной пригодности / Н. С. Шевцова // Природные ресурсы. – 1998. – №2. – С. 34–46.
69. *Щербаков, Г. А.* Базовая модель использования водных объектов в целях рекреации / Г. А. Щербаков, Н. С. Шевцова // Европа – наш общий дом: Экологические аспекты: Сб. докл. междунар. науч. конф., Минск, 6 – 9 декабря 1999 г. Ч. 2. – Минск, 2000. – С. 287–293.
70. Природно-хозяйственная классификация озер Беларуси: Рекомендации по хозяйственному использованию озер / О. Ф. Якушко [и др.]; под ред. проф. О. Ф. Якушко; М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь; М-во образования и науки Респ. Беларусь; Академия наук Беларуси. – Минск: БГУ, 1995. – 131 с.
71. *Шевцова, Н. С.* Структура модели комплексной туристско-рекреационной оценки природного потенциала рек // Региональная физическая география в новом столетии: сб. деп. в ГУ «БелиСА» 06.09.11, № Д201139. – Минск, 2011. – Вып. 5. – С. 283–290.
72. Оценка природного туристско-рекреационного потенциала рек Гродненской области / Н. С. Шевцова [и др.] // Природные ресурсы. – 2010. – №2. – С. 96–105.
73. *Шульга, Ч. К.* Проблемы и перспективы туристско-рекреационного использования рек Могилевской области / Ч. К. Шульга, Н. С. Шевцова // Вес. БДПУ. Сер. 3. Фізика. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. – 2015. – №3. – С. 42–47.
74. *Дроздов, А. В.* Основы экологического туризма / А. В. Дроздов. – М.: Гардарики, 2005.
75. *Марков, Д. С.* Комплексная оценка туристско-рекреационного потенциала ландшафтов / Д. С. Марков // Вестн. Брян. гос. ун-та. – 2011.
76. *Кокина, Ю. В.* Комплексная оценка рекреационного потенциала Волжского пути для развития круизного туризма: автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Ю. В. Кокина; МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 2012.
76. *Голлерова, О. Ф.* Экологическое состояние и рекреационный потенциал пойм равнинных рек Дуная и Волги (в пределах Подунайского региона Словакии и Астраханской области России): автореф. дис. ... канд. геогр. наук / О. Ф. Голлерова; МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 2013. – С. 6–7.
77. *Ланцова, И. В.* Рекреационная бонитировка аквально-территориальных комплексов водохранилищ / И. В. Ланцова // Туризм и региональное развитие: сб. науч. ст. – Смоленск: Универсум, 2014. – Вып. 7. – С. 62–68.
78. *Токарчук, О. В.* Геоэкологическая оценка рекреационного потенциала водных объектов Брестской области / О. В. Токарчук, С. М. Токарчук // Вучоныя запіскі. – 2016. – №12. – С. 129–138.
79. *Гудковских, М. В.* Методика комплексной оценки туристско-рекреационного потенциала / М. В. Гудковских // Географич. вестн. – Тюмень. – 2017. – С. 102–115.
80. *Джанджугазова, Е. А.* Формирование стратегии развития регионального туристско-рекреационного комплекса / Е. А. Джанджугазова: дис. ... д-ра эконом. наук. М., 2005. – 204 с.
81. *Гранберг, А. Г.* Основы региональной экономики: учеб. пособие / А. Г. Гранберг; Гос. ун-т Высш. шк. экономики. – 4-е изд. – М.: ИД ГУ ВШЭ, 2004. – 495 с.
82. *Путинцева, Н. Н.* Использование рекреационного потенциала регионов Западной Сибири для оздоровления населения / Н. Н. Путинцева // ГЕО-СИБИРЬ. – 2005. – Новосибирск: СГГА, 2005. – Т. 7. – С. 203–205.
83. *Худеньких, Ю. А.* Подходы к оценке туристско-рекреационного потенциала на примере районов Пермского края / Ю. А. Худеньких // География. – 2006. – №2. – С. 217–230.
84. *Лысенко, Н. Н.* Туристский комплекс Сахалинской области: исторический аспект стратегического анализа / Н. Н. Лысенко, К. И. Сафонова. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2010. – 128 с.
85. *Кулакова, Л. И.* Методологические подходы к оценке туристского рекреационного потенциала российских регионов / Л. И. Кулакова, В. А. Осипова // Российское предпринимательство. – 2017. – Т.18, №24. – С. 4261–4272.
86. Проектирование территорий курортно-рекреационного назначения в условиях БССР / Нормативно-методические рекомендации. – Минск: БелНИИПградостроительства, 1975. – 171 с.
87. *Александрова, А. А.* Туристские кластеры: содержание, границы, механизмы функционирования / А. А. Александрова // Экономические проблемы сервиса и туризма. – 2007. – №11. – С. 51–55.

88. Кизим, А.А. Повышение инвестиционной привлекательности на основе развития туристского кластера / А.А. Кизим, А.Н. Вильвашова, И.В. Кулькова // Региональная экономика: теория и практика. – 2010. – №26 (161). – С. 52–59.
89. Вертинская, Т.С. Методология создания региональных туристских кластеров в Беларуси / Т.С. Вертинская, В.А. Клицунова. – М., 2014. – С. 52
90. Афанасьев, О.Е. Методика оценки туристско-рекреационных ресурсов зависимых стран и территорий / О.Е. Афанасьев // Сервис плюс. – 2016. – №2. – С. 54–63.
91. Vom Dier, H. N. Research on some technical aspects of outdoor recreation, as part of multipurpose rural reconstructions in the Netherlands / H. N. Vom Dier // Inst. for Land and Water Manag. Res. – 1972. – №84. – P. 154.
92. Sculz, L. Nahrstoffeintrag in feen durch Badegaste / L. Sculz // Zbl.Bacteriol. – 1981. – Abt.18. – Bd 173. – №6. – S. 528–548.
93. Goossen, M. Assessing quality of rural areas in the Netherlands: finding the most important indicators for recreation / M. Goossen, F. Langers // Landscape and Urban Planning. – 2000. – Vol. 46, №4. – P. 241–251.
94. Blazejczyk, K. Assessment of recreational potential of bioclimate based on the human heat balance / K. Blazejczyk // Proceedings of the 1st International Workshop on Climate, Tourism and Recreation, Int. Soc. Biomet., Commission on Climate, Tourism and Recreation, WP11, 2001. – P. 1–20.
95. Risk assessment and modeling overview document / Assessment and redemption of contaminated sediments (ARCS) program. // Information of U. S. Environmental Protection Agency (USEPA) under USEPA Contract Numbers 68-C1-0012 and 68-C0-0054 to AScl Corporation and under USEPA Contract Number 68-C2-0134 to Battelle Ocean Sciences. /U. S. Environmental Protection Agency. Off. Water. – Washington, D.C., 1996. – 43 p.
96. The Tourist Potential of the Minho-Lima Region (Portugal). Visions for Global Tourism Industry // Creating and Sustaining Competitive Strategies Edited by Murat Kasimoglu. – 2012. – С. 339–357.
97. Rzętała, M. The new evaluating proposal of tourist-recreational attractiveness of water reservoirs / M. Rzetala // 3rd INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC CONFERENCE ON SOCIALS CIENCES & ARTS SGEM 2016, At Albena, Bulgaria, Volume: Volume: BOOK 2. Political Sciences, Law, Finance, Economics & Tourism, Vol. 4. Economics & Tourism.
98. Dearing, J. A. Esthetic and Recreational Potential of Small Naturalistic Streams Near Urban Areas / J. A. Dearing, K. Harper, L. D. James // 1st Edn., University of Kentucky Water Resources Institute, Lexington. – 1968. – P. 260.
99. Jaakson, R. Zoning to Regulate On-Water Recreation / R. Jaakson // Land Economics. – 1971. – Vol. 47, №4. – P. 382.
100. Hamill, L. Analysis of Leopold's Quantitative Comparisons of landscape esthetics / L. Hamill // Journal of Leisure Research. – 1975. – Vol. 7, Iss. 1.
101. Chubb, M. The Rivers Method: A Pilot Study of River Recreation Potential Assessment / M. Chubb, E. H. Bauman // Michigan State University, Dept. of Geography, East Lansing, Michigan, 1976.
102. Pfister, Robert E. Models relating camping to river terrace characteristics along the Rogue Scenic Waterway / Pfister, Robert E. // Graduate Thesis Or Dissertation, Oregon State University, 1977.
103. Stephen L. J. Smith Regional analysis of tourism resources / L. J. Stephen // Annals of Tourism Research. – 1987. – Vol. 14, Iss. 2. – P. 254–273.
104. Jaakson, R. River Recreation Boating Impacts / R. Jaakson // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. – 1988. – Vol. 114, №3. – P. 363–367.
105. Lacey, R. F. Water Recreation and Risk / R. F. Lacey, E. B. Pike // Water and Environment Journal. – 1989. – Vol. 3, №1. – P. 13–21.
106. An ecoregional approach to the economic valuation of land- and water-based recreation in the United States / G. Bhat [et al.] // Environmental Management. – 1998. – Iss. 22. – P. 69–77.
107. Weyland, F. Recreation potential assessment at large spatial scales: A method based in the ecosystem services approach and landscape metrics / F. Weyland, P. Laterra // Ecological Indicators. – 2014. – Vol. 39. – P. 34–43.
108. Ушакова, Е.О. Методический подход к комплексной оценке ресурсов развития туризма региона / Е.О. Ушакова // Региональная экономика: теория и практика, 2013.
109. Assessment of touristical-recreational potential of Georgia on background regional climate change / L. Karvelishvili [et al.] // 11st International Scientific-Practical Conference „TOURISM: ECONOMICS AND BUSINESS”, 4-5 June, Batumi. – 2011. – Vol. II. – P. 250–252.
110. Al Mammun, A. A. Methodology for Assessing Tourism Potential: Case Study Murshidabad District, West Bengal, India / A. Al Mammun, M. Soumen // international Journal of Scientific and Research Publications. – September 2012. – Vol. 2. – Iss. 9.
111. Nuruddin, A. A. Nature tourism planning using river-based resources and recreational assessment for Sungai Dinding, Perak, Malaysia / A. A. Nuruddin, A. A. Muhammad // Journal of Social Sciences. – 2013. – Vol. 9, №4. – P. 127–135.
112. Recreational Water Quality [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ecan.govt.nz/>. – Дата доступа: 19.03.2019.

Поступила 20.08.2019