



ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ГЕОГРАФИЯ ГЕОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

GEOGRAPHY and GEOLOGY

Издается с января 1969 г.
(до 2017 г. – под названием «Вестник БГУ.
Серия 2, Химия. Биология. География»)
Выходит один раз в полугодие

2

2023

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор	АНТИПОВА Е. А. – доктор географических наук, профессор; профессор кафедры экономической и социальной географии факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. E-mail: antipova@bsu.by
Заместитель главного редактора	КЛЕБАНОВИЧ Н. В. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; профессор кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. E-mail: n_klebanovich@inbox.ru
Ответственный секретарь	ГАГИНА Н. В. – кандидат географических наук, доцент; заведующий кафедрой географической экологии факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. E-mail: hahina@bsu.by
<i>Балтрунас В.</i>	Центр изучения природы, Вильнюс, Литва.
<i>Витченко А. Н.</i>	Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Донерт К.</i>	Европейский центр качества, Европейская ассоциация географов, Зальцбург, Германия.
<i>Еловичева Я. К.</i>	Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Зуй В. И.</i>	Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Калицкий Т.</i>	Институт географии Университета Яна Кухановского в Кельце, Кельце, Польша.
<i>Катровский А. П.</i>	Смоленский государственный университет, Смоленск, Россия.
<i>Курлович Д. М.</i>	Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Лукашев О. В.</i>	Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Маркс Л.</i>	Варшавский университет, Варшава, Польша.
<i>Мезенцев К. В.</i>	Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина.
<i>Нюсупова Г. Н.</i>	Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алма-Ата, Казахстан.
<i>Пирожник И. И.</i>	Поморский университет, Слупск, Польша.
<i>Родионова И. А.</i>	Российский университет дружбы народов, Москва, Россия.
<i>Руденко Л. Г.</i>	Институт географии Национальной академии наук Украины, Киев, Украина.
<i>Сарменто Ж. К. В.</i>	Университет Минью, Брага, Португалия.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief	ANTIPOVA E. A. , doctor of science (geography), full professor; professor at the department of economic and social geography of the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: antipova@bsu.by
Deputy editor-in-chief	KLEBANOVICH N. V. , doctor of science (agricultural sciences), full professor; professor at the department of soil science and land information systems of the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: n_klebanovich@inbox.ru
Executive secretary	HAHINA N. V. , PhD (geography), docent; head of the department of geographical ecology of the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: hahina@bsu.by
<i>Baltrūnas V.</i>	Nature Research Centre, Vilnius, Lithuania.
<i>Vitchenko A. N.</i>	Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Donert K.</i>	European Centre of Excellence, EUROGEO, Salzburg, Germany.
<i>Yelovicheva Ya. K.</i>	Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Zui V. I.</i>	Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Kalicki T.</i>	Institute of Geography of the Jan Kochanowski University in Kielce, Kielce, Poland.
<i>Katrovskii A. P.</i>	Smolensk State University, Smolensk, Russia.
<i>Kurlovich D. M.</i>	Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Lukashev O. V.</i>	Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Marks L.</i>	University of Warsaw, Warsaw, Poland.
<i>Mezentshev K. V.</i>	Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.
<i>Nyusupova G. N.</i>	al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.
<i>Pirozhnik I. I.</i>	Akademia Pomorska, Slupsk, Poland.
<i>Rodionova I. A.</i>	Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia.
<i>Rudenko L. G.</i>	Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
<i>Sarmento Zh. K. B.</i>	University of Minho, Braga, Portugal.

УДК 364.122.5

УРБАНОЛОГИЯ: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ИЗУЧЕНИЕ ГОРОДОВ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛИЗАЦИИ

М. А. БОГДАСАРОВ¹⁾, Ю. В. БОГДАСАРОВА^{1), 2)}, Н. Н. ВЛАСЮК^{3), 4)}, Д. В. КАПСКИЙ^{5), 6)}

¹⁾Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина,
буль. Космонавтов, 21, 224016, г. Брест, Беларусь

²⁾Гимназия № 2 г. Бреста, ул. Московская, 332, корп. 5, 224023, г. Брест, Беларусь

³⁾Брестский областной исполнительный комитет, ул. Ленина, 11, 224005, г. Брест, Беларусь

⁴⁾Брестский государственный технический университет, ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь

⁵⁾Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, пр. Независимости, 66, 220072, г. Минск, Беларусь

⁶⁾Академия управления при Президенте Республики Беларусь, ул. Московская, 17, 220007, г. Минск, Беларусь

Обосновано формирование урбанологии как новой синтетической науки о городах. В ней систематизированы и обобщены актуальные сведения ряда естественных, гуманитарных, инженерных и информационно-технологических наук о различных аспектах существования и развития городов и сформирован общий каркас системы

Образец цитирования:

Богдасаров МА, Богдасарова ЮВ, Власюк НН, Капский ДВ. Урбанология: новый взгляд на изучение городов в условиях глобализации. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2023;2:3–16.
EDN: DSYIXH

For citation:

Bahdasarau MA, Bahdasarava YuV, Vlasjuk NN, Kapskii DV. Urbanology: a new perspective on the study of cities in the context of globalisation. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2023;2:3–16. Russian.
EDN: DSYIXH

Авторы:

Максим Альбертович Богдасаров – доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси; профессор кафедры географии и природопользования факультета естествознания.

Юлия Викторовна Богдасарова – учитель географии высшей категории²⁾, аспирантка кафедры географии и природопользования факультета естествознания¹⁾. Научный руководитель – доктор географических наук, профессор А. А. Волчек.

Николай Николаевич Власюк – кандидат архитектуры, доцент; начальник управления архитектуры и территориального развития комитета по архитектуре и строительству³⁾, профессор кафедры архитектуры строительного факультета⁴⁾.

Денис Васильевич Капский – доктор технических наук, доцент; заместитель председателя⁵⁾, профессор кафедры управления информационными ресурсами института управленческих кадров⁶⁾.

Authors:

Maksim A. Bahdasarau, doctor of science (geology and mineralogy), full professor, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus; professor at the department of geography and nature management, faculty of natural science.
bahdasarau@gmail.com

Yulia V. Bahdasarava, teacher of geography of the highest category²⁾, postgraduate student at the department of geography and nature management, faculty of natural science¹⁾.

bogdasarova81@icloud.com

Nikolai N. Vlasjuk, PhD (architecture), docent; head of the department of architecture and territorial development, committee for architecture and construction³⁾, professor at the department of architecture, civil engineering faculty⁴⁾.

ulasiuk@list.ru

Denis V. Kapskii, doctor of science (engineering), docent; deputy chairman⁵⁾, professor at the department of information resources management, institute of managerial personnel⁶⁾.

d.kapsky@gmail.com

знаний о реальных процессах их функционирования. Раскрыты понятие, объект, предмет, задачи и функции урбанографии, ее истоки и соотношение с другими науками, намечены основные направления разработки урбанографической теории современного города. В авторском понимании урбанография – наука, которая изучает города как сложные социальные системы, связанные с окружающей средой и взаимодействующие с ней. С урбанографией сопряжен сити-менеджмент – система управления городом, включающая планирование, организацию, контроль и координацию всех аспектов городской жизни, в том числе экономики, инфраструктуры, транспорта, социальной сферы, экологии и безопасности. Показано, что урбанография, как наука и учебная специальность, обладает уникальным и качественно новым функциональным потенциалом для разработки как теоретических моделей, так и практических рекомендаций по обеспечению устойчивого и эффективного регулирования жизнедеятельности горожан. Урбанография рассматривает особенности городской среды и предлагает решения по улучшению качества жизни горожан, а сити-менеджмент занимается практическим управлением городом и реализацией подобных решений. Обобщены теоретические модели зарубежных и отечественных специалистов, проанализированы их эвристический потенциал и выявлена значимость этих моделей для изучения современных проблем городов. Предложен ряд направлений дальнейших исследований, призванных обеспечить выход процесса формирования проектных решений в части пространственного развития городов на новый уровень. Подчеркнута важность социальной справедливости и экологического благополучия в городской среде. Статья может быть интересна географам, архитекторам, градостроителям, руководителям органов исполнительной власти, отдельных предприятий и учреждений, а также всем, кто интересуется современным развитием городов в условиях глобализации.

Ключевые слова: урбанография; глобальные проблемы; устойчивое развитие; глобализация; урбанизация; городская среда обитания; качество жизни населения; сити-менеджмент.

URBANOLOGY: A NEW PERSPECTIVE ON THE STUDY OF CITIES IN THE CONTEXT OF GLOBALISATION

M. A. BAHDASARAU^a, Yu. V. BAHDASARAVA^{a, b}, N. N. VLASYUK^{c, d}, D. V. KAPSKII^{e, f}

^a*Brest State A. S. Pushkin University, 21 Kasmanawtaw Boulevard, Brest 224016, Belarus*

^b*Gymnasium No. 2 of Brest, 332 Maskowskaja Street, 5 building, Brest 224023, Belarus*

^c*Brest Regional Executive Committee, 11 Lenina Street, Brest 224005, Belarus*

^d*Brest State Technical University, 267 Maskowskaja Street, Brest 224017, Belarus*

^e*Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus,*

66 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220072, Belarus

^f*Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus,*

17 Maskowskaja Street, Minsk 220007, Belarus

Corresponding author: M. A. Bahdasarau (bahdasarau@gmail.com)

The article is devoted to the substantiation of the formation of urbanology as a new synthetic science of cities. It systematises and generalises the actual knowledge of a number of natural, humanitarian, engineering and information-technological sciences about the peculiarities of various aspects of the existence and development of cities and forms a general framework of the system of knowledge about the real processes of their functioning. The main provisions of the article reveal the concept, object, subject, tasks and functions of urbanology, its origins and correlation with other sciences, outline the main directions of development of urbanological theory of the modern city. In the author's understanding, urbanology is a science that studies cities as complex social systems connected with the environment and interacting with it. City management is closely related to it – the system of city management, which includes planning, organisation, control and coordination of all aspects of urban life, including economy, infrastructure, transport, social sphere, ecology and security. It is shown that urbanology, as a science and academic speciality, has a unique and qualitatively new functional potential for the development of both theoretical models and practical recommendations to ensure sustainable and effective regulation of urban life. Urbanology studies the features of the urban environment and offers solutions to improve the quality of life of citizens, and city management is engaged in the practical management of the city and the implementation of these solutions. The scientific novelty of the presented results lies in the generalisation of theoretical models of foreign and domestic researchers, analysis of their heuristic potential and identification of their significance for the study of contemporary urban problems. The authors also propose a number of new directions for further research, designed to ensure a new level of the process of forming design solutions in terms of spatial development of cities. The article emphasises the importance of social justice and ecological well-being in the urban environment. It may be of interest to geographers, architects, urban planners, heads of executive authorities, individual enterprises and institutions, as well as to all those who are interested in modern urban development in the context of globalisation.

Keywords: urbanology; global problems; sustainable development; globalisation; urbanisation; urban environment; quality of life; city management.

Введение

В течение последних 100 лет происходит быстрая урбанизация. По данным ООН, начиная с 2007 г. более половины населения мира живут в городах, а к 2050 г. горожанами будут почти 70 % жителей планеты. Именно города и мегаполисы, являющиеся центрами экономического и социального взаимодействия, генерируют 80 % глобального ВВП. Однако при этом на них приходится около 70 % глобальных выбросов углерода и более 60 % использования природных ресурсов¹. Все это создает множество новых вызовов, например, в вопросах планирования городского пространства и разработки стратегий бизнес-сообщества, а в конечном итоге и в части улучшения жизни горожан. Современный город со своими достижениями и проблемами представляет собой очень сложный саморазвивающийся организм, которому необходимы устойчивость, готовность к дальнейшим вызовам и обеспеченность возможностями для развития.

В Беларуси также наблюдается активный процесс урбанизации: повышается роль городов в жизни общества [1]. Многие люди переезжают из сельской местности в города, чтобы получить доступ к лучшей работе, образованию и социальной инфраструктуре. Однако, как и во всем мире, это приводит к возникновению ряда проблем, таких как загрязнение окружающей среды, нехватка дешевого жилья, высокая автомобилизация, возрастание маятникового движения из близлежащих населенных пунктов и др. Для формирования устойчивых городских отношений и создания качественной среды, охватывающих как социально-демографическую, так и гендерно-профессиональную структуру населения, а также для поддержания его здорового образа жизни, рационального расселения и эффективного размещения производственных сил правительство и местные власти принимают меры по развитию инфраструктуры, улучшению экологической ситуации и социальной защите. Важнейшим элементом этой стратегии является подготовка современных специалистов – урбанистов и сити-менеджеров, которая с недавних пор ведется в единственном учреждении образования – Брестском государственном университете имени А. С. Пушкина. Настоящая статья призвана ответить на вопросы о том, что представляет собой урбанистика.

Именно эта наука позволит обеспечить поэтапное и устойчивое развитие городов. Впервые в Беларуси появилась возможность заполнить пробел, возникший в системе территориального планирования, путем подготовки современных специалистов, которые могут взять на себя ответственность за формирование городской политики (в области человеческого капитала, инфраструктуры, транспорта, экологии и иных аспектов, гармонично сочетающихся с перспективами постоянного развития территории) и видят города как источники социально-экономического роста республики. Архитекторы следят за эстетико-физическим обликом города, планировщики – за тем, как различные функциональные зоны и экосистемы вписываются в его территорию. Однако, поскольку важное значение для современного города имеют экономика, инновации, экология, социальная сфера, культура и другие аспекты, существует объективная потребность в качественно новых специалистах, которые учитывали бы их при планировании городской территории, обеспечивая ее устойчивое развитие и поддерживая синергетический эффект.

Актуальность изучения современных городских пространств обусловлена множеством проблем, которые возникают в городах. Эти исследования важны для понимания того, как улучшить жизнь людей в городах и сделать их более привлекательными как для самих горожан, так и для туристов, а также привлечь инвестиции.

Целью статьи является формирование системы знаний об урбанистике как о науке и учебной специальности, обладающей уникальным и качественно новым функциональным потенциалом для разработки теоретических моделей и практических рекомендаций по обеспечению устойчивого и эффективного регулирования жизнедеятельности горожан. Для достижения данной цели последовательно решались задачи по систематизации и обобщению знаний ряда естественных, гуманитарных, инженерных и информационно-технологических наук о различных аспектах существования и развития городов и реальных процессах их функционирования.

В основе анализа исследований по урбанистике с методической точки зрения лежит обзор зарубежных и отечественных публикаций в области комплексного изучения городов и проблем их развития. Результаты этого обзора позволили сформулировать ряд положений.

Новизна работы заключается в обобщении теоретических моделей зарубежных и отечественных специалистов, анализе их эвристического потенциала, выявлении значимости этих моделей для изучения современных проблем городов и предложении актуальных направлений дальнейшего исследования.

¹World cities report – 2022: envisaging the future of cities [Electronic resource]. URL: <https://unhabitat.org/world-cities-report-2022-envisaging-the-future-of-cities> (date of access: 28.07.2023).

Постановка проблемы

Под глобализацией понимается процесс интеграции национальных экономик и культур в мировую экономику и культуру. Она проявляется в росте международной торговли, миграции рабочей силы, распространении технологий и информации, а также в усилении взаимозависимости между государствами. Глобализация имеет как положительные, так и отрицательные последствия. Она способствует экономическому росту, повышает уровень жизни людей в развивающихся странах, расширяет возможности для сотрудничества государств и обмена знаниями между ними и в то же время приводит к ухудшению экологической ситуации, усилению неравенства, потере культурной идентичности и традиций.

Глобализации противостоит деглобализация (локализация) – обратный процесс мирового общественного развития. С экономической точки зрения она представляет собой распад единого экономического пространства, характеризующийся стихийным нарушением свободного перемещения товаров, капитала и трудовых ресурсов между странами. Признаками деглобализации являются торговые войны, выход стран из интеграционных союзов, ограничения на свободу передвижения капитала и рабочей силы, неэффективное функционирование глобальных экономических институтов. Она связана со стремлением регионов к самостоятельности в обеспечении собственных потребностей за счет использования преимущественно местных ресурсов, что, в свою очередь, снижает потребность в международной торговле, участии в глобальном перераспределении производственных ресурсов и наднациональном регулировании экономической деятельности.

Сегодня все больше людей соглашаются с мнением журналистки и писательницы Дж. Джекобс о том, что крупнейшие города мира служат основным двигателем мировой экономики [2]. Функция города в современных условиях заключается в том, чтобы одновременно быть эпицентром экономической, деловой и инновационной активности. Отсюда вытекают комплекс преимуществ для жизнедеятельности человека и спектр проблем, таких как перенаселенность, перегруженность инфраструктуры, этнические и социальные конфликты, высокая стоимость жизни, низкая эффективность управления и нехватка ресурсов [3].

Урбанизация – происходящий во всем мире процесс роста и развития городов, который связан с увеличением численности населения, модернизацией промышленности и экономики, а также с изменением образа жизни людей. В науке представлены три основных подхода к интерпретации понятия «урбанизация». В рамках первого подхода она рассматривается как исторический процесс повышения роли городов в развитии государства и общества, в рамках второго подхода – в качестве результата сосредоточения населения, материальной и духовной культуры в городах, а в рамках третьего подхода – как феномен распространения городской культуры и образа жизни на все сферы человеческой деятельности. В последние десятилетия урбанизация стала особенно заметной. Во многих странах наблюдается быстрый рост городов, в частности крупных мегаполисов. Это связано с тем, что люди переезжают в города в поисках работы, образования и более комфортных условий жизни.

Городские территории имеют развитую инфраструктуру, промышленность, транспортную сеть, а также различные социальные объекты и являются ядрами экономической, культурной и научной жизни, в которых сосредоточены научные и образовательные учреждения, культурные центры, музеи, театры, кинотеатры и т. д. Они также выступают важными транспортными узлами, через которые проходят автомобильные, железнодорожные, авиационные и морские маршруты. Соответственно, урбанизация позволяет людям жить в комфортных условиях, пользоваться благами и инфраструктурой, а также работать в сфере услуг и промышленности. Кроме того, городская жизнь способствует развитию культуры и искусства, а также обеспечивает доступ к образованию и здравоохранению.

Существуют следующие современные тенденции урбанизации:

- рост численности городского населения (по данным ООН, к 2050 г. доля городского населения может достичь 68 %);
- увеличение плотности населения в городах, что приводит к повышению нагрузки на инфраструктуру и возникновению экологических проблем, таких как загрязнение воздуха и воды;
- умножение количества мегаполисов (крупные города становятся более популярными, поскольку они предлагают высокий уровень жизни и доступ к различным услугам);
- развитие новых технологий, например беспилотных автомобилей и виртуальной реальности, которые могут помочь улучшить качество жизни в городах и снизить нагрузку на окружающую среду².

Однако урбанизация имеет и негативные последствия, которые связаны с социальными, экономическими и экологическими аспектами. Важнейшие из них включают следующие проблемы:

- социальные (рост напряженности между различными группами населения, снижение уровня образования и культуры, увеличение числа бездомных и безработных);

²World cities report – 2022...

- экономические (повышение стоимости жизни, уменьшение доступности жилья, всплеск преступности и падение уровня безопасности);
- экологические (загрязнение воздуха, воды и почвы, ухудшение качества жизни из-за шума и пыли, изменение климата).

Для решения этих проблем необходимо проводить политику, направленную на улучшение качества среды обитания и жизни населения через повышение доступности жилья, здравоохранения и образования, снижение негативного воздействия на окружающую среду.

Урбанизация является сложным процессом, требующим баланса между ее положительными и отрицательными аспектами. Чтобы соблюсти этот баланс и решить насущные проблемы, многие страны разрабатывают стратегии городского развития, которые включают действия по улучшению инфраструктуры, созданию зеленых зон и парков, поддержке малого и среднего бизнеса и др.

Результаты и их обсуждение

История становления урбанографии. С момента зарождения цивилизации важную роль в ее общественном и экономическом развитии играют города. Соответственно, интерес к формированию городов, эволюции различных аспектов их функционирования как центров экономики, технологий и гуманитарных практик возник очень рано. По мнению С. Н. Леонова, первые известные исследования в этой области, которые маркируют начало ее становления как научного направления, принадлежат еще древнегреческим философам: Платону, описавшему идеальную модель города исходя из философских рассуждений о взаимодействии между людьми, и Аристотелю, выполнившему расчеты оптимальной численности населения городов на основе анализа особенностей организации нескольких десятков полисов [4].

Промышленная революция и вызванная ею быстрая эволюция городов как комплексных центров – ядер промышленного роста в частности и экономического развития в целом, в которых концентрируются промышленность, инфраструктура, образование, финансы и культура, остро поставили вопрос о рациональном создании городов, максимально удобных для сочетания многочисленных экономических и общественных функций. Соответственно, возникла проблема эффективного управления развитием городов (их планировки, архитектуры, экологии и т. д.). Урбанография получила мощный толчок.

Один из основоположников современной урбанографии В. Л. Глазычев отмечал, что с начала XX в. в становлении и развитии науки о городе выделились три направления:

- 1) внешняя форма города и его композиционная структура, в частности облик города, его архитектурный стиль, специфика расположения зданий и их взаимосвязи;
- 2) городская инфраструктура, включая транспортную систему, экономику, девелопмент;
- 3) социальная жизнь города, в том числе проблемы занятости, здравоохранения, образования и др. [5].

В СССР городское планирование было подчинено градостроительной архитектуре, что привело к переплетению первых двух направлений. Вопросами формирования городской инфраструктуры занималась система государственного планирования, тогда как проблемам экономики города уделялось недостаточно внимания.

На Западе наибольшее развитие получило второе направление, связанное с автомобилизацией и вытеснением общественного транспорта. Это привело к возникновению множества проблем, которые требуют решения по сей день. К ним относятся улучшение экологической ситуации, увеличение доступности общественного транспорта и т. д. [6].

Третье направление практически не разрабатывалось до 1960-х гг., когда начался рост интереса к социальным проблемам городов, чему немало поспособствовала публикация книги Дж. Джекобс [7]. Сегодня это направление, напротив, является одним из наиболее актуальных. В его рамках изучаются социальные процессы, происходящие в городах (неравенство, бедность, дискриминация и т. д.).

В определенной степени можно считать, что современная урбанография ведет отсчет с 1996 г., когда была принята Хартия нового урбанизма³. Ее главные положения составляют основу принципов разумного урбанизма – теории городского планирования, предложенной К. Ч. Беннингером в 2002 г. и базирующейся на десяти аксиомах:

- 1) аксиоме экологической устойчивости, которая требует, чтобы городское планирование и строительство были направлены на сохранение природных ресурсов и минимизацию негативного воздействия на городскую среду (использование экологически чистых технологий, строительство зеленых зон и развитие общественного транспорта);
- 2) аксиоме сохранения наследия, которая предполагает защиту и реставрацию исторических зданий, парков и других объектов, обладающих культурной ценностью, что помогает создать уникальный облик города и сберечь его историко-культурное наследие;

³The charter of the new urbanism [Electronic resource]. URL: <https://www.cnu.org/who-we-are/charter-new-urbanism> (date of access: 28.07.2023).

3) аксиоме целесообразности технологий, в соответствии с которой технологии, применяемые в городском планировании и строительстве, должны быть эффективными и экономичными (использование энергоэффективных систем освещения, отопления и водоснабжения и др.);

4) аксиоме эффективной инфраструктуры, которая диктует, чтобы город был эффективен и доступен для всех его жителей (развитие общественного транспорта, строительство пешеходных зон и велосипедных дорожек, модернизация дорожных сетей);

5) аксиоме создания мест, которая подразумевает организацию мест для отдыха, развлечений и социальной активности (например, парков, скверов, спортивных площадок и культурных центров);

6) аксиоме социальной доступности, согласно которой все жители города должны иметь возможность получения социальных услуг, таких как образование, здравоохранение и транспорт (развитие социальной инфраструктуры, обеспечение ее доступности для всех слоев населения);

7) аксиоме транзитно ориентированного развития, которая предусматривает проектирование города так, чтобы его жители могли легко и удобно передвигаться (развитие системы общественного транспорта, создание удобных пешеходных маршрутов);

8) аксиоме региональной интеграции, которая требует, чтобы города были интегрированы в региональную экономику и социальную инфраструктуру (создание совместных проектов, сотрудничество между городами и регионами);

9) аксиоме человеческого масштаба, которая предполагает, чтобы городской дизайн и планирование соответствовали потребностям и возможностям людей (здания должны быть достаточно большими и удобными для жизни, а общественные пространства достаточно просторными и комфортными для представителей всех возрастов и групп населения);

10) аксиоме установленной целостности, которая подразумевает, чтобы городская система была устойчивой, эффективной и гармоничной (координация различных элементов городского планирования и строительства, учет экологических, социальных и экономических факторов) [8].

Городская среда и качество жизни. Под городской средой обитания (проживания) подразумевается совокупность основополагающих условий, созданных обществом и природой в границах населенного пункта, которые влияют на уровень и качество жизни. Она образуется благодаря совместному действию абиотических, биотических и антропогенных факторов и формирует отношение человека к городу и системе управления. Городская среда воздействует на здоровье и благополучие людей, поэтому в целях обеспечения их хорошего самочувствия и безопасности важно создавать комфортные условия для жизни и работы в городе.

Качество жизни населения – комплексный показатель, который отражает уровень жизни в стране, регионе или отдельном населенном пункте. Это один из важнейших индикаторов развитости страны, поскольку он влияет на экономику, социальное благополучие и уровень преступности в обществе.

Высокое качество жизни подразумевает следующие аспекты:

- достаточную продолжительность жизни, поддерживаемую хорошим медицинским обслуживанием и отсутствием значимых угроз для жизни и здоровья;
- приемлемый объем потребления товаров и услуг, гарантированный доступ к материальным благам;
- удовлетворительные социальные отношения, отсутствие серьезных общественных конфликтов и угроз;
- благополучие семьи;
- доступность знаний, культурных ценностей, формирующих личность и представления об окружающем мире, а также возможностей для получения образования;
- учет мнения индивида при решении общественных проблем, создании общепринятой картины мира и правил поведения;

• социальную принадлежность, полноценное участие в общественной и культурной жизни;

• открытость информации, включая сведения о положении дел в обществе;

• комфортные условия труда, дающего простор для творчества и самореализации, относительно короткий рабочий день, оставляющий человеку достаточно свободного времени для разных занятий.

Низкое качество городской среды, в свою очередь, может быть связано со следующими проблемами:

- недостаточно развитой инфраструктурой (отсутствием общественного транспорта или его низкой доступностью, нехваткой зеленых зон, проблемами с водоснабжением и канализацией);
- неравенством ресурсов (различиями в доступности жилья, образования, здравоохранения и рабочих мест);
- социальными проблемами (бедностью, безработицей, преступностью и другими негативными явлениями, которые влияют на качество жизни горожан);
- экологическими проблемами (загрязнением воздуха, воды и почв, шумом и иными факторами, которые воздействуют на здоровье горожан);

- культурными проблемами (низким разнообразием культуры и искусства, отсутствием возможностей для культурного развития и досуга);
- проблемами безопасности (угрозами терроризма, насилия и подобными обстоятельствами, которые могут вызывать страх и беспокойство у горожан).

Следует отметить, что комфортная городская среда является одновременно и процессом взаимодействия проживающих в городе людей с городскими системами, и его продуктом.

Собственно, создание комфортной городской среды выступает главной целью специалистов в области географии, экономики, архитектуры, градостроительства, экологии, социологии, культурологии и других наук, которые исследуют процессы урбанизации, особенности ее влияния на общество и окружающую среду, а также разрабатывают стратегии развития городов и регионов.

По мнению Д. М. Наринского, профессора факультета городского и регионального развития Высшей школы экономики, которое он высказал в ходе выступления на Всероссийском форуме «Развитие малых городов и исторических поселений» в 2023 г., знаковым событием последних лет стала реализация федерального проекта «Формирование комфортной городской среды», запустившего механизмы взаимодействия власти и общества и простимулировавшего диалог между стейкхолдерами⁴. По результатам Всероссийского конкурса лучших проектов создания комфортной городской среды в малых городах и исторических поселениях была обозначена важность развития не столько мегаполисов, сколько населенных пунктов иных форматов. Это породило новую культуру проектной деятельности, тесно связанную с аналитикой и прогнозированием. Интеграция подобных проектов и решений в области транспортной и коммунальной инфраструктуры обеспечит выход формирования проектных решений в части пространственного развития городов на новый уровень. Опыт разработки проектов комфортной городской среды должен быть использован для поиска актуальных подходов к жилищной политике (в том числе к комплексному совершенствованию территории). Ключевая задача долгосрочных проектов пространственного развития состоит в определении того, сколько людей на какой территории и в какой период будут проживать. Данные вопросы Д. М. Наринский кратко сформулировал следующим образом: кто? где? когда? Это в полной мере справедливо и для проектов жилищного строительства.

Урбанонология и урбанистика. Разумным представляется мнение В. В. Таболина о том, что формирование нового научного направления предполагает наличие научной гипотезы, на базе которой разрабатываются теоретические конструкции системы нового знания о городе [9]. В настоящее время многие научные приоритеты изменяются, смещаются в область комплексного анализа тех или иных процессов и явлений, а важнейшей задачей мировой науки становится прогноз развития природы и общества. В данном случае научная гипотеза заключается в том, что применительно к процессу урбанизации решить эту задачу возможно исключительно на основе системного, комплексного и междисциплинарного подходов к регулированию практически всех аспектов жизнедеятельности человека в городе. Таким образом, на границе перечисленных выше наук и отдельных направлений усилиями специалистов разного профиля формируется новая синтетическая наука – урбанонология.

Согласно определению, данному К. К. Красовским, А. А. Сидоровичем и И. В. Абрамовой, урбанонология – комплексная наука об урбанизации, изучающая ее пространственно-временную динамику, экономико-географические, экологические, демографические, градостроительные и социопсихологические особенности [10].

Нужно отметить, что в узком смысле урбанонология довольно часто рассматривается как отрасль социологии. Так, на портале «Национальная энциклопедическая служба России»⁵, а также в работе В. В. Вагина [11] она определяется как комплексная научная дисциплина, объединяющая знания разных отраслей в попытках создания общей теории городского развития. Н. Е. Яценко считает урбанонологию комплексной наукой, которая исследует историю, современное состояние и перспективы развития городов, а также все проблемы, связанные с урбанизацией⁶.

В переводе на русский язык этот термин означает «градоведение», и в нем аккумулируются, обобщаются и интегрируются знания о географических, экологических, экономических, социальных, градостроительных, исторических и других процессах, происходящих в городах. Е. П. Меньшикова приводит перечень наук, которые лежат в основе градоведения [12]. К ним относятся социология города и деревни, психология восприятия городской среды, архитектура и градостроительство города и его

⁴Трансляция Всероссийского форума «Развитие малых городов и исторических поселений» [Электронный ресурс]. URL: https://www.youtube.com/watch?v=rJCN2m_3E (дата обращения: 28.07.2023).

⁵Урбанонология // Нац. энцикл. служба России [Электронный ресурс]. URL: <https://voluntary.ru/termin/urbanologija.html> (дата обращения: 28.07.2023).

⁶Яценко Н. Е. Урбанонология // Толковый слов. обществовед. терминов [Электронный ресурс]. URL: https://www.slovamik.ru/html_tsot/u/urbanologi8.html (дата обращения: 28.07.2023).

агломерации, экология города («градоэкологический метаболизм» [13]), городское и агломерационное профессиональное управление, городское право, экономика города и его агломерации, стратегическое планирование градосистемы, строительство и строительное искусство, информациология города и его региона, а также городское хозяйство.

Однако попытки создать комплексную теорию города пока не увенчались успехом [14] по ряду причин. Во-первых, большинство специалистов не выходили за рамки своих наук и часто декларировали проблемы, которые предлагалось решать их коллегам из смежных естественных или гуманитарных наук. Во-вторых, подавляющая часть исследований носила не междисциплинарный, а научно-популярный описательный характер [9].

Л. Б. Коган, по праву считающийся наряду с В. Л. Глазычевым одним из основоположников урбано-логии как науки, отметил, что «нам нужна... наука о городах, о городских сообществах, в которой равны в своих правах и интересах и градостроители, и географы, и социологи, и экономисты, и политологи, и демографы, и юристы, и муниципальные работники, и врачи, и т. д.» [15]. Он также считал, что «высокая степень адаптивности урбано-логии, ее приспособленность к использованию в самом широком спектре наук связаны с тем, что она работает с такими категориями фундаментального знания, которые, будучи взяты из самого процесса урбанизации, могут быть интерпретированы как на уровне высокой абстракции, так и на прикладном, операционном уровне, они могут быть непосредственно наблюдаемы и измерены» [16].

С философской точки зрения урбано-логию, по мнению Ю. Ц. Тыхеевой, следует понимать как интегративную науку, исследующую проблемы городов и городских систем с самых разных сторон в их совокупности⁷. Это теория города, в которой интегрируются знания, призванные установить и обосновать сущностные характеристики города, его исторические смыслы и природу с общих методологических позиций. В результате можно рассмотреть город как особое социальное, стадийно значимое, исторически обусловленное явление в его тесном единстве с цивилизационным развитием общества. В урбано-логии город выступает как социально-исторический феномен, самое полное воплощение цивилизационного процесса, при этом человек занимает в этой науке центральное место.

Сегодня урбано-логия рассматривается как междисциплинарная наука, объединяющая ряд направлений: градостроительство и городское проектирование [17; 18], экономику города [2; 19–22], социологию города [23–26], городское управление [6; 17; 24; 25], географию городов [26; 27]. Каждому из них посвящены множество публикаций (в том числе в таких ведущих журналах, как «Cities», «City Planning Reviews», «Urban Problems» и «Urban Studies») и учебных изданий. Намного реже, особенно в учебной литературе, используется предлагаемый авторами настоящей статьи подход к интерпретации урбано-логии как комплексной области знаний о городских системах [28].

В авторском понимании урбано-логия – наука, которая изучает города как сложные техносоциальные системы, связанные с окружающей средой и взаимодействующие с ней. Соответственно, урбано-лог – это ученый, который занимается исследованием городов как целостных систем с помощью научных методов, рассматривает город в качестве единого организма со своей структурой и особенностями функционирования, городскую среду с ее спецификой, проблемами и характеристиками взаимодействия с окружающей природой, социальные процессы, происходящие в городе, а также его экономическую и политическую жизнь.

Объектом изучения урбано-логии является город как целостная система, включающая различные элементы (географические, экологические, социальные, экономические, политические, культурные и др.), а ее предметом выступают закономерности функционирования и развития города как целостной системы с ее пространственной организацией, функциональной структурой, особенностями взаимодействия с природной средой, социальными, экономическими и культурными процессами, экологическими проблемами.

Урбано-логия изучает процессы формирования и развития городских территорий, их функциональные и пространственные характеристики, вопросы, связанные с транспортом, инфраструктурой и управлением городом, а также взаимосвязь городов с окружающей средой и обществом. По мнению Ю. Ц. Тыхеевой, урбано-логия опирается на урбанистику⁸.

В свою очередь, урбанистика – это междисциплинарное прикладное направление, которое изучает город в контексте развития городской среды и взаимодействия различных городских систем для решения насущных проблем горожан. Чаще всего под урбанистикой понимается или городское планирование, или активное участие в обсуждении либо инициировании проектов городского благоустройства и улучшения

⁷Тыхеева Ю. Ц. Человек в городском пространстве: философско-антропологические основания урбано-логии : автореф. дис. ... д-ра филос. наук : 09.00.13. СПб., 2004. 35 с.

⁸Там же.

городской среды. Соответственно, урбанист – это человек, который живет или работает в городе и занимается его развитием и улучшением. Он может быть архитектором, дизайнером, градостроителем или обычным гражданином, который хочет сделать свой город более комфортным и привлекательным для жизни.

Таким образом, отличие между урбанологом и урбанистом заключается в том, что первый представляет собой специалиста, который анализирует город с научной точки зрения, а второй – человека, непосредственно участвующего в жизни города и стремящегося сделать его лучше. И урбанологи, и урбанисты могут, например, заниматься проектированием и дизайном городской среды, исследовать городскую культуру и идентичность и др.

В авторском понимании сити-менеджмент – система управления городом, включающая планирование, организацию, контроль и координацию всех аспектов городской жизни, в том числе экономики, инфраструктуры, транспорта, социальной сферы, экологии и безопасности. Соответственно, сити-менеджер – это руководитель, который отвечает за управление городом и его развитие. Он должен обладать знаниями в области географии, экономики, финансов, права, социологии, психологии и других наук, чтобы принимать эффективные решения по повышению качества жизни горожан.

Урбанология и сити-менеджмент тесно связаны между собой, так как они направлены на улучшение жизни в городах. Урбанология изучает особенности городской среды и предлагает решения по повышению качества жизни горожан, а сити-менеджмент занимается практическим управлением городом и реализацией этих решений.

Основные научные подходы в урбанологии и направления ее развития. Для изучения урбанологии как науки и освоения ее как учебной специальности необходимы знания в следующих областях:

- архитектуре (проектирование и дизайн городской среды, включая жилые, коммерческие и общественные здания);
- географии (изучение пространственной организации и территориальной структуры городов во всем их многообразии);
- геоинформационных технологиях (использование возможностей современных систем для сбора, хранения, анализа и графической визуализации данных о городской среде и особенностях ее функционирования);
- градостроительстве (разработка планов и стратегий развития городов, в том числе по вопросам зонирования, инфраструктуры и благоустройства территории);
- ландшафтном дизайне (проектирование и создание ландшафтов, которые улучшают качество жизни горожан и способствуют экологической устойчивости);
- социологии (изучение социальных процессов и структур в городских сообществах);
- транспорте и логистике (исследование степени мобильности и транспортной доступности, расчет оптимального времени, которое затрачивается на доставку грузов и пассажиров, для создания сбалансированной экологичной транспортной системы, обеспечивающей устойчивое развитие города);
- экологии (исследование экологических проблем и последствий их влияния на городскую среду (загрязнение воздуха, шумовое воздействие и устойчивость к изменению климата));
- экономике (анализ экономических процессов и факторов, влияющих на функционирование городов и повышение их привлекательности);
- юриспруденции (определение прав и обязанностей всех участников рынка недвижимости, регулирование вопросов градостроительства, зонирования территорий, землепользования и др.).

Основные научные подходы в урбанологии представлены на рисунке.



Основные научные подходы в урбанологии
Basic scientific approaches in urbanology

Важно понимать, что каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки, поэтому только их сочетание может помочь наиболее полно понять процессы, происходящие в городе, и разработать эффективные стратегии управления им.

Поскольку в основе получаемого в Беларуси образования в этой сфере лежит именно географический опыт, обозначим приоритетные направления географии, тесно связанные с урбанологией:

- архитектурную географию (изучение пространственных отношений между зданиями и окружающей средой, архитектурными объектами и природными и антропогенными факторами, оценка их влияния на городскую среду, взаимодействие с окружающей природой и обществом);
- городскую географию (рассмотрение особенностей городской среды и специфики ее связи с природным и социально-экономическим окружением, исследование пространственной организации городов, их структуры, функций и динамики развития);
- культурную географию (анализ культурных процессов, их роли в формировании городской идентичности и культурной жизни горожан, обзор музеев, театров, кинотеатров, ресторанов и других культурных объектов (в том числе в целях духовного развития общества));
- социальную географию (изучение социальной структуры городов, демографических данных, экономических показателей, культурного разнообразия и социальных проблем, определение потребностей и ожиданий различных групп населения и разработка стратегий улучшения городской среды и повышения качества жизни);
- экологическую географию (исследование экологических проблем городов и последствий их воздействия на окружающую среду, создание стратегий снижения уровня загрязненности воздуха, воды, почвы и предотвращения влияния других экологических проблем, связанных с деятельностью городов);
- экономическую географию (установление аспектов экономической жизни городов, их роли в региональной и национальной экономике, анализ городской экономики, ее отраслевой структуры, территориальной организации и специфики взаимодействия с другими городами и регионами).

На современном этапе социально-экономического развития особую актуальность приобретают проблемы городского неравенства в контексте размещения городских систем в пространстве. Эти вопросы являются предметом активных систематических исследований зарубежных ученых (в основном географов и экономистов), в связи с чем целесообразным представляется рассмотрение их опыта анализа, оценки и моделирования размещения города в пространстве. Специалисты выделяют следующие факторы пространственного неравенства: размер локального рынка (плотность занятых), эффекты от локализации (внешние эффекты одной отрасли) и урбанизации (внешние эффекты межотраслевого взаимодействия) и рыночный потенциал. К ключевым причинам концентрации экономической активности в регионе они относят объединение рынка труда, совместное использование ресурсов и обмен знаниями. Ученые также оценивают влияние численности и плотности населения на продуктивность города. Применяя закон Ципфа, они объясняют эволюцию городских экономик путем сохранения определенных тенденций в распределении размеров города [29].

Основываясь на анализе современных мировых тенденций, в развитии урбанологии можно наметить несколько магистральных направлений (своего рода научных школ): архитектурную урбанологию, городское планирование, пространственный анализ, социальную урбанологию, экологическую урбанологию, горную урбанологию и подземную урбанологию.

Архитектурная урбанология разрабатывает концепции застройки городских территорий, исследует влияние городской архитектуры на среду и качество жизни людей. Она ориентирована на создание комфортной и эстетически привлекательной городской среды.

Городское планирование изучает принципы и методы разработки планов и стратегий развития города, включая определение целей и задач, анализ ресурсов и возможностей, контроль за реализацией этих решений. Оно является ключевым фактором устойчивого развития города и обеспечения высокого качества жизни его обитателей.

Пространственный анализ посредством исследования географических данных анализирует пространственные особенности различных объектов и явлений города и взаимосвязи между ними, устанавливает тенденции и закономерности в их пространственном распределении и прогнозирует изменения.

Социальная урбанология акцентирует внимание на социальных процессах, происходящих в городах, и их влиянии на жизнь людей, исследует проблемы, связанные с проживанием в городе. В их число входят миграция, социальная стратификация, вопросы социальной мобильности, образования, здравоохранения, занятости и т. д.

Экологическая урбанология рассматривает вопросы экологической устойчивости и сохранения природной среды в городах, включает в себя исследование влияния городской инфраструктуры на окружающую среду, разработку экологических стратегий и планов, а также внедрение экологически чистых технологий.

Особое место в этом ряду занимают горная урбаноология и подземная урбаноология.

Горная урбаноология связана с комплексным развитием городов и других населенных пунктов, расположенных в горной местности. Она изучает особенности урбанизации горных территорий, законы формирования, развития и эволюции горно-городских систем, а также планирования, строительства и управления такими городами с учетом влияния на них конкретных природных, экономических и социальных условий. Главные цели горной урбаноологии – научно обоснованное градостроительство, направленное на соблюдение природно-экономических законов и принципов экологического равновесия, и разумное развитие, согласованное с характеристиками структуры городов, их функциями и спецификой планировки территории. И то и другое должно не только отвечать требованиям создания благоприятной среды для жизни и работы, но и способствовать долгосрочному устойчивому развитию городов, чтобы соответствовать требованиям достижения единства экономических, социальных и экологических выгод [30].

Подземная урбаноология сопряжена с комплексным использованием подземного пространства городов и других населенных пунктов, отвечающим требованиям градостроительной эстетики, социальной гигиены, а также технико-экономической целесообразности. Ее главные цели – обеспечение оптимальных условий труда, быта, отдыха и передвижения населения под землей, увеличение площади открытых озелененных пространств на поверхности, формирование здоровой, удобной и эстетически привлекательной подземной среды. Степень использования подземного пространства, техника и технология ведения работ зависят от величины города, характера и содержания исторически сложившейся и перспективной застройки, концентрации дневного населения в различных частях города, расчетного уровня автомобилизации, природно-климатических, инженерно-геологических и других условий⁹.

Умные города и «Симбиосити». В заключение необходимо сказать несколько слов о тех концепциях, в реализации которых специалисты-урбаноологи будут востребованы в первую очередь. Речь идет о проектах создания умных городов и «Симбиосити» [31; 32].

Под умными городами понимается концепция городского развития, основанная на использовании информационных и коммуникационных технологий для улучшения качества жизни горожан. Умные города стремятся к созданию более эффективной и устойчивой городской среды, которая способна адаптироваться к изменяющимся потребностям населения и окружающей среды. Эта концепция включает следующие элементы:

- интеллектуальные системы управления (использование различных датчиков, сенсоров и систем сбора данных для мониторинга городской инфраструктуры (транспорта, энергоснабжения, водоснабжения и т. д.) и управления ею);
- интеллектуальную инфраструктуру (создание инфраструктуры, автоматически оптимизирующей свои функции и обеспечивающей лучшую производительность (например, умных светофоров, которые регулируют движение транспорта и снижают заторы на дорогах));
- умный транспорт (разработка интеллектуальных транспортных систем, которые повышают доступность транспорта, снижают заторы на дорогах, обеспечивают безопасность движения и могут использоваться для оптимизации маршрутизации и планирования общественного транспорта [33, ч. 2 и 4]);
- экологические системы (активное внедрение экологически чистых технологий, таких как возобновляемые источники энергии, энергоэффективные здания и системы утилизации отходов, для уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу и улучшения качества воздуха);
- интернет вещей (широкое использование технологий интернета вещей для управления городской инфраструктурой и обеспечения безопасности (например, систем мониторинга безопасности на улицах и в общественных местах, систем контроля доступа и видеонаблюдения));
- цифровые услуги и приложения (предоставление жителям цифровых услуг и приложений, которые помогают им управлять своими жизнями, получать информацию о городских событиях и услугах, а также взаимодействовать с городской инфраструктурой);
- систему умного городского управления (внедрение новых методов управления, основанных на использовании данных и аналитике, что позволяет принимать более обоснованные решения и оптимизировать использование ресурсов [33, ч. 4]).

В целом умные города – это будущее городского развития, поскольку они предоставляют новые возможности для улучшения качества жизни и повышения эффективности городской инфраструктуры.

«Симбиосити» – это проект города, разработанный для демонстрации новых решений в городском планировании и создания комфортной и экологичной городской среды. В его основе лежит целостный

⁹Подземная урбанистика // Горн. энцикл. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mining-enc.ru/p/podzemnaya-urbanistika> (дата обращения: 28.07.2023) ; Скунов Б. А. Все глубже, глубже и глубже. Стратегия инновационного развития подземного городского пространства // Строит. эксперт [Электронный ресурс]. URL: <https://ardexpert.ru/article/4137> (дата обращения: 28.07.2023).

и всеобъемлющий подход к устойчивому городскому развитию, который превращает городские проблемы в возможности.

Одним из ключевых элементов «Симбиосити» является широкое использование зеленых насаждений. В городе должно быть создано множество парков и скверов, которые не только выступают местом отдыха, но и обеспечивают экологическую устойчивость. Кроме того, такой город имеет развитую инфраструктуру, включающую общественный транспорт, пешеходные зоны, велосипедные дорожки и др. Это позволяет легко перемещаться по городу, а также способствует ведению здорового образа жизни. Важным элементом являются также инновационные технологии в строительстве и управлении городом [31; 32].

Таким образом, «Симбиосити» демонстрирует возможность создания комфортного и экологичного города с применением новых подходов к городскому планированию.

Сегодня уровень урбанизации в Беларуси составляет 79,5 %. Это значение соответствует показателю, свойственному развитым западным государствам, и превышает показатель, характерный для постсоветских стран, причем доля городского населения продолжает расти. Актуальными для градостроительной политики большинства белорусских регионов остаются следующие задачи:

- улучшение качества городской среды;
- сохранение малых городов и населенных пунктов;
- эволюция пригородных зон областных центров и городов областного подчинения, переход к агломерационному развитию;
- подъем экономики регионов и сокращение разрыва в качестве жизни населения в городах областного подчинения, где должны быть обеспечены ускоренные темпы социально-экономического роста;
- становление умных городов, внедрение цифровых технологий, сервисов, функциональная и качественная трансформация городской среды;
- проектирование в населенных пунктах новых районов застройки с современными параметрами качественной и разнообразной среды;
- развитие инженерной, транспортной, а также индустриальной, логистической и другой инфраструктуры;
- сохранение историко-культурного наследия;
- повышение экологического и туристского потенциала региона [34].

В решении этих задач определяющую роль могут сыграть специалисты в области урбанологии и сити-менеджмента, а это значит, что их подготовка в Брестском государственном университете имени А. С. Пушкина имеет важнейшее народно-хозяйственное значение. Она должна быть предметом пристального внимания со стороны государства и общества, пользоваться поддержкой руководителей республиканских и местных органов исполнительной власти, отдельных предприятий и учреждений.

Заключение

Интеллектуальные и глобальные экономико-логистические вызовы последних десятилетий способствовали развитию городов и их регионов. В то же время концентрация в городах экономических, культурных и информационных ресурсов создала потенциальные возможности для подъема экономики на разных уровнях (отраслевом, региональном, страновом), а также других сфер общественной жизни. В настоящее время город представляет собой сложную систему, которая включает комплексы социально-экономических, исторических, геополитических, природных и даже психологических факторов, влияющих на устойчивость их развития.

В соответствии с требованиями времени возникает урбанология – интегративная синтетическая наука, которая изучает проблемы городов и городских систем с разных сторон в их совокупности. Исследования сложных городских процессов содействуют отказу от привычного архитектурно-градостроительного восприятия городского пространства и его структур. Особенности данной науки состоят в необходимости междисциплинарных знаний ряда естественно-научных и гуманитарных дисциплин, а также в ориентации на интегральное решение экономических, социальных и экологических проблем, коммерциализацию интеллектуальных и креативных проектов развития городской среды.

Урбанология призвана сыграть важную роль в развитии современных городов, поскольку она помогает во всем многообразии понять то, как функционируют города, и то, какие изменения необходимы для улучшения качества жизни в них и развития. Ее усилия направлены на создание комфортной архитектурно-пространственной и социально-культурной среды для современного человека с учетом новых трендов развития городов. Урбанология изучает структуру городов, их экономику, социальную организацию, экологию и другие аспекты для того, чтобы создавать более эффективные и устойчивые города. Она также помогает разрабатывать стратегии управления городской средой, которые учитывают интересы всех участников, включая жителей, представителей бизнес-сообщества и правительства.

Сегодня крайне необходимы современные специалисты, готовые к новой городской реальности, в которую массово проникают IT-системы и IT-гаджеты (интеллектуальное обустройство улиц и городского пространства, создание умных домов, городов и регионов, распространение технологий интернета вещей, дополненной реальности, электронной логистики, цифровой реальности и адаптивной социологии и др.). Поэтому требуется дальнейшая эволюция новой науки – урбанографии, которая смогла бы воспринять все вызовы современных городов и позволила бы устойчиво развивать последние, несмотря на неослабевающие риски различного характера.

Развитие города – сложный процесс, целая наука и даже искусство. И то, будет ли оно иметь правильную, положительную динамику, прежде всего зависит от наличия экспертов, команды профессионалов, занимающихся разработкой проектов, стратегий и их реализацией. Миссия урбанографов заключается в том, чтобы сделать любой населенный пункт (в первую очередь город) удобным, комфортным для жизни и обеспечить его устойчивое развитие.

Библиографические ссылки

1. Красовский КК. *Урбанистическая эволюция Беларуси*. Брест: Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина; 2009. 237 с.
2. Джекобс Дж. *Экономика городов*. Ананьев Д, переводчик. Новосибирск: Культурное наследие; 2008. 294 с. (Библиотека деvelopepa).
3. Зубец АН. *Истоки и история экономического роста*. Москва: Экономика; 2014. 463 с.
4. Леонов СН. Город как модель и форма общественного развития (об учебнике «Урбанистика. Городская экономика, развитие и управление»). *Пространственная экономика*. 2020;16(1):171–183. DOI: 10.14530/se.2020.1.171-183.
5. Глазычев ВЛ. *Урбанистика*. Москва: Европа; 2008. 216 с.
6. Вучик ВР. *Транспорт в городах, удобных для жизни*. Калинин А, переводчик; Блинкин М, редактор. Москва: Территория будущего; 2011. 574 с. (Университетская библиотека Александра Погорельского).
7. Джекобс Дж. *Смерть и жизнь больших американских городов*. Мотылев Л, переводчик. Москва: Новое издательство; 2011. 457 с. (Библиотека свободы).
8. Benninger CC. Principles of intelligent urbanism: the case of the new capital plan for Bhutan. *Ekistics and the New Habitat*. 2002;69(412–414):60–80. DOI: 10.53910/26531313-E200269412-414386.
9. Таболин ВВ. Основы юридической урбанографии: введение в юридическую науку о городах. *Конституционное и муниципальное право*. 2018;1:63–67.
10. Красовский КК, Сидорович АА, Абрамова ИВ. Урбанография как перспективная географическая специальность. *Вучоныя запіскі Брэсцкага ўніверсітэта*. 2020;16(частка 2):139–145.
11. Вагин ВВ. *Городская социология*. Москва: Московский научный общественный фонд; 2001. 169 с.
12. Меньшикова ЕП. Науки, обслуживающие сложнейшую модель общества – город. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2016;8:85–91.
13. Яницкий ОН. Метаболическая концепция современного города. *Социологическая наука и социальная практика*. 2013;3:16–32.
14. Лола АМ. *Основы градостроения и теории города (в российской интерпретации)*. Москва: Комкнига; 2005. 324 с. Совместно с издательством «УРСС».
15. Сдобнов ЮА, Коган ЛБ, Хайт ВЛ, Демин НМ, Беккер ВЯ. Городская политика в стратегии России. *Городское управление* [Интернет]. 2004 [протитировано 28 июля 2023 г.];5. Доступно по: <http://emsu.ru/um/default.asp?god=2004&nom=5>.
16. Коган ЛБ. *Урбанография и городская политика: от осознания к знанию* [Интернет]. 2010 [протитировано 28 июля 2023 г.]. Доступно по: <http://emsu.ru/kogan>.
17. Гейл Я. *Города для людей*. Токтонов А, переводчик; Ионов В, редактор. Москва: Альпина паблишер; 2012. 276 с.
18. John ML. *Contemporary urban planning*. New York: Routledge; 2016. 476 p.
19. John FM. *Fundamentals of urban economics*. Upper Saddle River: Prentice Hall; 1997. 545 p.
20. О'Салливан А. *Экономика города*. Пипейкин ВП, переводчик. Москва: Инфра-М; 2002. 705 с.
21. Флорида Р. *Креативный класс: люди, которые создают будущее*. Яцок Н, переводчик. Москва: Манн, Иванов и Фербер; 2016. 384 с.
22. Глейзер Э. *Триумф города: как наше величайшее изобретение делает нас богаче, умнее, экологичнее, здоровее и счастливее*. Кушнарева И, переводчик. Москва: Издательство Института Гайдара; 2014. 432 с.
23. Лэндри Ч. *Креативный город*. Гнедовский В, Хрусталева М, Гнедовский М, переводчики. Москва: Классика-XXI; 2006. 399 с.
24. Бюржель Г. *Умирает ли Париж?* Туницкая Е, Колесников С, переводчики; Догадайло ВА, редактор. Москва: Дело; 2013. 136 с.
25. Нордстрем КА, Шлингман П. *Urban express: 15 правил нового мира, в котором главные роли у городов и женщин*. Москва: Альпина паблишер; 2019. 268 с.
26. Пердик ЕН. *Города мира. География мировой урбанизации*. Москва: Международные отношения; 1999. 384 с.
27. Лаппо ГМ. *Города России. Взгляд географа*. Москва: Новый хронограф; 2012. 504 с.
28. Beimborn EA, editor. *Urbanology: new approaches to urban revival. Proceedings of the symposium and workshop*. Milwaukee: University of Wisconsin; 1969. 178 p.
29. Манаева ИВ. Город в территориальном пространстве: обзор зарубежных исследований. *Вопросы территориального развития* [Интернет]. 2016 [протитировано 28 июля 2023 г.];3. Доступно по: <http://vtr.isert-ran.ru/index.php/article/1891>.
30. Huang Guangyu. *Theory of mountain urbanology*. Beijing: China Architecture and Building Press; 2006. 269 p.
31. Власюк НН. Город мечты: уникальный опыт Бреста. *Наука и инновации*. 2020;12:22–26.
32. Власюк НН. Брест SymbioCity-2050 – современные тенденции городского планирования. *Веснік сувязі*. 2021;3:22–25.

33. Капский ДВ, Лосин ЛА. *Транспорт в планировке городов*. Минск: Белорусский национальный технический университет; 2019–2022. 4 части.

34. Власюк НН. Брестская область: вектор градостроительного развития. *Архитектура и строительство*. 2021;5:16–20.

References

1. Krasovskiy KK. *Urbanisticheskaya evolyutsiya Belarusi* [Urban evolution of Belarus]. Brest: Brest State A. S. Pushkin University; 2009. 237 p. Russian.
2. Jacobs J. *Ekonomika gorodov* [The economy of cities]. Novosibirsk: Kul'turnoe nasledie; 2008. 294 p. (Biblioteka developera). Russian.
3. Zubets AN. *Istoki i istoriya ekonomicheskogo rosta* [Origins and history of economic growth]. Moscow: Ekonomika; 2014. 463 p. Russian.
4. Leonov SN. City as the model and form of social development (on the textbook «Urbanistics. Urban economy, development and management»). *Spatial Economics*. 2020;16(1):171–183. Russian. DOI: 10.14530/se.2020.1.171-183.
5. Glazychev VL. *Urbanistika* [Urbanism]. Moscow: Evropa; 2008. 216 p. Russian.
6. Vuchik VR. *Transport v gorodakh, udobnykh dlya zhizni* [Transportation for livable cities]. Kalinin A, translator; Blinkin M, editor. Moscow: Territoriya budushchego; 2011. 574 p. (Universitetskaya biblioteka Aleksandra Pogorel'skogo). Russian.
7. Jacobs J. *Smert' i zhizn' bol'shih amerikanskikh gorodov* [The death and life of great American cities]. Moscow: Novoe izdatel'stvo; 2011. 457 p. (Biblioteka svobody). Russian.
8. Benninger CC. Principles of intelligent urbanism: the case of the new capital plan for Bhutan. *Ekistics and the New Habitat*. 2002;69(412–414):60–80. DOI: 10.53910/26531313-E200269412-414386.
9. Tabolin VV. Fundamentals of legal urbanology: introduction to the legal science of cities. *Constitutional and Municipal Law*. 2018;1:63–67. Russian.
10. Krasovskiy KK, Sidorovich AA, Abramova IV. Urbanology as a perspective geographic speciality. *Scientific Proceeding of Brest University*. 2020;16(part 2):139–145. Russian.
11. Vagin VV. *Gorodskaya sotsiologiya* [Urban sociology]. Moscow: Moskovskii nauchnyi obshchestvennyi fond; 2001. 169 p. Russian.
12. Menshikova EP. Science serving the most complex model of the society – the city. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2016;8:85–91. Russian.
13. Yanitskiy ON. Metabolic concept of modern city. *Sociological Science and Social Practice*. 2013;3:16–32. Russian.
14. Lola AM. *Osnovy gradovedeniya i teorii goroda (v rossiiskoi interpretatsii)* [Fundamentals of urban studies and theory of the city (in the Russian interpretation)]. Moscow: Komkniga; 2005. 324 p. Co-published by the «URSS». Russian.
15. Sdobnov YuA, Kogan LB, Khait VL, Demin NM, Bekker VYa. Urban policy in Russian strategy. *City government* [Internet]. 2004 [cited 2023 July 28];5. Available from: <http://emsu.ru/um/default.asp?god=2004&nom=5>. Russian.
16. Kogan LB. *Urbanology and urban policy: from awareness to knowledge* [Internet]. 2010 [cited 2023 July 28]. Available from: <http://emsu.ru/kogan>. Russian.
17. Gehl J. *Goroda dlya lyudei* [Cities for people]. Toktonov A, translator; Ionov V, editor. Moscow: Al'pina publisher; 2012. 276 p. Russian.
18. John ML. *Contemporary urban planning*. New York: Routledge; 2016. 476 p.
19. John FM. *Fundamentals of urban economics*. Upper Saddle River: Prentice Hall; 1997. 545 p.
20. O'Sullivan A. *Ekonomika goroda* [Urban economics]. Pipeikin VP, translator. Moscow: Infra-M; 2002. 705 p. Russian.
21. Florida R. *Kreativnyi klass: lyudi, kotorye sozdayut budushchee* [The rise of the creative class: people who create the future]. Yatsyuk N, translator. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber; 2016. 384 p. Russian.
22. Glaeser E. *Triumf goroda: kak nashe velichaishee izobretenie delaet nas bogache, umnee, ekologichnee, zdorovee i schastlivee* [Triumph of the city: how our greatest invention makes us richer, smarter, greener, healthier, and happier]. Kushnareva I, translator. Moscow: Izdatel'stvo Instituta Gaidara; 2014. 432 p. Russian.
23. Landry C. *The creative city: a toolkit for urban innovators*. London: Earthscan; 2000. 300 p. Russian edition: Landry C. *Kreativnyi gorod*. Gnedovskii V, Khrustaleva M, Gnedovskii M, translators. Moscow: Klassika-XXI; 2006. 399 p.
24. Burgel G. *Umiraet li Parizh?* [Is Paris dying?]. Tunitskaya E, Kolesnikov S, translators; Dogadailo VA, editor. Moscow: Delo; 2013. 136 p. Russian.
25. Nordstrom KA, Schlingmann P. *Urban express: 15 pravil novogo mira, v kotorom glavnye roli u gorodov i zhenshchin* [Urban express: 15 urban rules to help you navigate the new world that's being shaped by women and cities]. Moscow: Al'pina publisher; 2019. 268 p. Russian.
26. Pertsik EN. *Goroda mira. Geografiya mirovoi urbanizatsii* [Cities of the world. Geography of world urbanisation]. Moscow: Mezhdunarodnye otnosheniya; 1999. 384 p. Russian.
27. Lappo GM. *Goroda Rossii. Vzglyad geografa* [Cities of Russia. Geographer's view]. Moscow: Novyi khronograf; 2012. 504 p. Russian.
28. Beimbom EA, editor. *Urbanology: new approaches to urban revival. Proceedings of the symposium and workshop*. Milwaukee: University of Wisconsin; 1969. 178 p.
29. Manaeva IV. City in the territorial space: a review of foreign studies. *Territorial development issues* [Internet]. 2016 [cited 2023 July 28];3. Available from: <http://vtr.isert-ran.ru/index.php/article/1891>. Russian.
30. Huang Guangyu. *Theory of mountain urbanology*. Beijing: China Architecture and Building Press; 2006. 269 p.
31. Vlasjuk NN. Dream city: a unique experience of Brest. *Science and Innovations*. 2020;12:22–26. Russian.
32. Vlasjuk NN. [Brest SymbioCity-2050 – modern tendencies urban planning]. *Viesnik suviasi*. 2021;3:22–25. Russian.
33. Kapskii DV, Losin LA. *Transport v planirovke gorodov* [Transport in urban planning]. Minsk: Belarusian National Technical University; 2019–2022. 4 parts. Russian.
34. Vlasjuk NN. [Brest Region: vector of urban development]. *Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2021;5:16–20. Russian.

Получена 10.08.2023 / исправлена 10.10.2023 / принята 17.10.2023.
Received 10.08.2023 / revised 10.10.2023 / accepted 17.10.2023.

ПРИРОДООХРАННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ РАЙОНОВ БЕЛАРУСИ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ

М. Н. БРИЛЕВСКИЙ¹⁾

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

Представлены результаты исследования природоохранного потенциала физико-географических регионов Беларуси (провинций, округов и районов), который влияет на формирование национальной экологической сети. Внесены изменения в схему физико-географического районирования страны, уточнены границы и площади ее физико-географических районов. Установлено, что оценка природоохранного потенциала должна проводиться по физико-географическим районам, так как они существенно различаются наличием или отсутствием земель природного каркаса, а также количеством и площадью особо охраняемых природных территорий. Предложена методика определения природоохранного потенциала как интегрального показателя индекса сохранности природных геосистем и коэффициента обеспеченности особо охраняемыми природными территориями. Расчеты свидетельствуют о том, что значения индекса сохранности природных геосистем изменяются от 0,58 (Копыльская гряда) до 1,40 (Лельчицкая равнина), а все физико-географические районы по данному показателю дифференцируются на четыре группы. По величине коэффициента обеспеченности особо охраняемыми природными территориями физико-географические районы также делятся на четыре группы. Максимальных значений этот коэффициент достигает в 5 физико-географических районах с заповедниками и национальными парками. Значения интегрального показателя природоохранного потенциала варьируются от 0,58 (Копыльская гряда) до 2,06 (Верхнеберезинская низменность). По величине этого показателя физико-географические районы распределяются по семи группам. Установлено, что за последние годы природоохранный потенциал большинства физико-географических районов повышается в связи с увеличением площадей земель природного каркаса и особо охраняемых природных территорий.

Ключевые слова: физико-географические районы; округа; провинции; земли природного каркаса; сохранность природных геосистем; особо охраняемые природные территории; природоохранный потенциал; экологическая сеть.

Образец цитирования:

Брилевский МН. Природоохранный потенциал физико-географических районов Беларуси и его значение для национальной экологической сети. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2023;2:17–30. EDN: GUUDYH

For citation:

Bryleuski MN. Environmental potential of the physical and geographical regions of Belarus and its significance for the national ecological network. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2023;2:17–30. Russian. EDN: GUUDYH

Автор:

Михаил Николаевич Брилевский – кандидат географических наук, доцент, профессор кафедры географической экологии факультета географии и геоинформатики.

Author:

Mikhail N. Bryleuski, PhD (geography), docent; professor at the department of geographical ecology, faculty of geography and geoinformatics.
bryleuski@mail.ru

ENVIRONMENTAL POTENTIAL OF THE PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL REGIONS OF BELARUS AND ITS SIGNIFICANCE FOR THE NATIONAL ECOLOGICAL NETWORK

M. N. BRYLEUSKI^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

The results of a study of the environmental potential of the physical and geographical regions of Belarus of the rank of provinces, districts and regions, on which the formation of a national ecological network depends, are presented. Changes have been made to the scheme of physical and geographical zoning of the country, the boundaries and areas of physical and geographical regions have been clarified. It has been established that the assessment of the environmental potential should be carried out by physical and geographical regions, since they differ significantly in the presence of natural frame lands, the number and area of specially protected natural areas. A method for determining the environmental potential is proposed as an integral indicator of the index of preservation of natural geosystems and the coefficient of provision of specially protected natural areas. Calculations have shown that the index of conservation of natural geosystems varies from 0.58 (Kopyl Ridge) to 1.40 (Lelchitsa Plain), and all physical and geographical regions were differentiated into four groups according to this indicator. The physical and geographical regions were also divided into four groups according to the value of the coefficient of provision with specially protected natural areas. The coefficient reaches its maximum values in 5 physical and geographical regions with reserves and national parks. The integral indicator of the environmental potential in the territory of Belarus varies from 0.58 (Kopyl Ridge) to 2.06 (Upper Berezina Lowland). The physical and geographical regions were divided into seven groups according to the magnitude of their environmental potential. It has been established that in recent years there has been an increase in the conservation potential of most physical and geographical regions due to the growth in the area of natural frame land and the increase in the area of specially protected natural areas.

Keywords: physical and geographical regions; districts; provinces; natural framework lands; preservation of natural geosystems; specially protected natural areas; environmental potential; ecological network.

Введение

На Всемирном экономическом форуме в Женеве отмечено усиление вероятности возникновения экологических рисков в ближайшие годы и определены пять основных экологических угроз¹. Первые две экологические угрозы, связанные с последствиями изменения климата и действием экстремальных погодных явлений, неоднократно обсуждались на международных конференциях. Подписаны глобальные соглашения по их предотвращению (Киотский протокол и Парижское соглашение, вступившие в силу в 2005 и 2016 гг. соответственно) с опорой на Рамочную конвенцию ООН об изменении климата². Различным аспектам анализа мер по адаптации хозяйственной деятельности к изменениям климата посвящен ряд монографий и научных статей отечественных исследователей [1–7].

Особенности географического положения Беларуси (размещение на устойчивой древней платформе с равнинным рельефом в умеренном климатическом поясе) обусловили сравнительно низкий риск образования третьей экологической угрозы, сопряженной со стихийными бедствиями. В то же время остается актуальным риск возникновения четвертой экологической угрозы – антропогенных экологических катастроф, наиболее острой из которых является проблема преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Данная проблематика широко освещена в работах отечественных и зарубежных ученых³ [8–11].

Наконец, пятая экологическая угроза связана с потерей биологического и ландшафтного разнообразия. Во многом данный риск сопряжен с последствиями четырех других угроз, он проявляется в исчезновении отдельных видов животных и растений, распространении чужеродных инвазивных видов, деградации природных ландшафтов в результате интенсивной хозяйственной деятельности, а также в низкой эффективности оказания экосистемных услуг и т. д. [12].

¹The global risks report – 2019 [Electronic resource]. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2019.pdf (date of access: 05.05.2023).

²Why does sharing the road matter? [Electronic resource]. URL: <https://www.unenvironment.org/explore-topics/transport/what-we-do/share-road/why-does-sharing-road-matter> (date of access: 05.05.2023); Climate action: reducing emissions from transport [Electronic resource]. URL: <http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/indexen.htm> (date of access: 05.05.2023).

³Четверть века после чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления : нац. докл. Респ. Беларусь. Минск : Ин-т радиологии, 2011. 90 с. ; 30 лет Чернобыльской аварии: итоги и перспективы преодоления ее последствий : нац. докл. Респ. Беларусь. Минск : Ин-т радиологии, 2016. 116 с.

Задача по предотвращению сокращения биологического и ландшафтного разнообразия в Беларуси реализуется в рамках международных договоров, подписанных в конце XX в., и заключается в расширении сети особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и формировании национальной экологической сети. За последние годы на государственном уровне утвержден ряд законодательных актов в области сохранения биологического и ландшафтного разнообразия⁴.

Специалисты Научно-практического центра НАН Беларуси по биоресурсам разработали концепцию национальной экологической сети, критерии выделения ее элементов (ядер, охранных зон и экологических коридоров), предложили методические подходы к ее интеграции в Государственную схему комплексной территориальной организации Республики Беларусь, а также составили Схему национальной экологической сети⁵. На территории страны выделяются европейские (заповедники, национальные парки и некоторые заказники, имеющие международный природоохранный статус), национальные (заказники республиканского значения) и региональные (заказники местного значения) ядра экологической сети, охранные зоны, расположенные вокруг них, и экологические коридоры. Схема национальной экологической сети динамично разрабатывалась и постоянно обновлялась.

В качестве ядер экологической сети выступают ООПТ. По состоянию на 2022 г. в Беларуси выделялись 1339 ООПТ, занимающих 1889,3 тыс. га, что составляет 9 % от площади страны⁶. Это значение практически соответствует оптимальному показателю, характерному для региона, который расположен в умеренном географическом поясе. Однако большинство подобных объектов (959) представляют собой памятники природы республиканского и местного значения. Они занимают малые площади, не образуют самостоятельных ядер, а дополняют ядра разного уровня и выполняют скорее рекреационную функцию, так как являются объектами познавательного туризма. Кроме того, ООПТ и другие элементы экологической сети размещены на территории Беларуси неравномерно. Полесский радиационно-экологический заповедник площадью 216,9 тыс. га, который занимает территорию, наиболее загрязненную радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС, обладает особым статусом и к ООПТ не относится [12].

Официальные данные об ООПТ приводятся, как правило, по административным единицам – областям и районам. Однако границы ООПТ выделяются в зависимости от природных особенностей территории, поэтому многие из них (Березинский биосферный заповедник, национальные парки «Припятский», «Беловежская пуща» и «Нарочанский», заказники «Выгонощанское», «Красный Бор», «Ельня», «Налибокский», «Средняя Припять» и др.) располагаются в пределах нескольких административных районов или областей. Отдельные ООПТ (Национальный парк «Беловежская пуща», заказник «Прибужское Полесье» и др.) размещаются на государственных границах и имеют продолжение в сопредельных странах. Следовательно, ООПТ должны изучаться в пределах природных регионов, характеризующихся общностью происхождения и однотипностью протекания физико-географических процессов.

В Беларуси проведены различные виды природного районирования (геоморфологическое, агроклиматическое, геоботаническое) отдельных природных компонентов, выполнено комплексное ландшафтное районирование [13]. По мнению автора настоящей статьи, для оценки природоохранного потенциала в наибольшей степени подходит комплексное физико-географическое районирование. Цель работы заключается в выявлении особенностей размещения земель природного каркаса и оценке природоохранного потенциала физико-географических регионов страны. В качестве объекта исследования выступают физико-географические районы (ФГР), округа и провинции Беларуси, а в качестве его предмета – природоохранный потенциал регионов страны и его роль в создании единой экологической сети.

Методологической основой оценки природоохранного потенциала являются положения и принципы геоэкологии, ландшафтоведения, физической географии и природопользования. Под термином «природоохранный потенциал» и близким ему по содержанию понятием «природно-экологический потенциал» рассматривается совокупность свойств природной среды, обеспечивающих потребности человека в природных ресурсах и позволяющих геосистемам выполнять экологические, средоформирующие и эстетические функции, поддерживать экологически целесообразное равновесие территории, устойчивость геосистем и способность природных сред к самовосстановлению и самоочищению [14].

⁴Об особо охраняемых природных территориях : Закон Респ. Беларусь от 15 нояб. 2018 г. № 150-3 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Беларусь / ООО «ЮрСпектр». Минск, 2018 ; О Национальном плане действий по сохранению и устойчивому использованию биологического разнообразия на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 21 дек. 2021 г. № 733 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Беларусь / ООО «ЮрСпектр». Минск, 2021 ; Об экологической сети : Указ Президента Респ. Беларусь от 13 марта 2018 г. № 108 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Беларусь / ООО «ЮрСпектр». Минск, 2018 ; Схема рационального размещения особо охраняемых природных территорий республиканского значения до 1 января 2025 г. // О развитии системы особо охраняемых природных территорий : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 2 июля 2014 г. № 649 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Беларусь / ООО «ЮрСпектр». Минск, 2023.

⁵Об экологической сети : Указ Президента Респ. Беларусь от 13 марта 2018 г. № 108...

⁶Особо охраняемые природные территории Республики Беларусь. Карта [Электронный ресурс]. URL: <https://www.minpriroda.gov.by/ru/oxanaterrkarta-ru> (дата обращения: 15.05.2023).

Материалы и методы исследования

В соответствии с единой общеевропейской системой районирования суши Беларусь входит в состав такой физико-географической страны, как Восточно-Европейская равнина, размещается в Европейской области смешанных лесов и включает 5 физико-географических провинций [15; 16]. Они дифференцируются по орографическим границам, обуславливающим разный генезис рельефа и направленность физико-географических процессов, с учетом высотного яруса. Исключение составляет Белорусская Поозерская провинция, которая выделяется на основании возраста, соответствующего последнему оледенению, в ее рельефе представлены возвышенности, равнины и низменности. Южным пределом провинции является граница последнего поозерского оледенения.

По преобладающим четвертичным отложениям и одновозрастным типам рельефа классифицируются 14 физико-географических округов. Они, в свою очередь, делятся на 50 ФГР в зависимости от типа рельефа и почвенно-растительного покрова.

Все физико-географические провинции, округа и районы имеют характерные черты. Они отличаются историей формирования, направленностью современных географических процессов, а также особенностями климата, почв и растительности. В их пределах образуются уникальные природные объекты, которые, как правило, представляют собой ООПТ. Для определения региональной специфики распределения значений показателей, характеризующих природоохранный потенциал Беларуси, анализировались данные о структуре землепользования в разрезе административных районов по состоянию на 1 января 2022 г.⁷

С помощью сравнительно-географического, статистического и картографического методов проведены расчеты распределения значений показателей природоохранного потенциала в пределах единиц физико-географического районирования и установлена наибольшая дифференциация для ФГР. Основными показателями, необходимыми для оценки природоохранного потенциала территории, являются индекс сохранности природных геосистем ($I_{СПГ}$) и коэффициент обеспеченности ООПТ ($K_{ООПТ}$).

Этап 1: определение доли площади физико-географических регионов от общей площади страны с использованием инструментов программного обеспечения *ArcGIS*. Сопоставление этого показателя с данными о политико-административном делении Беларуси позволило вычислить долю площади административных районов от площади отдельных физико-географических единиц.

Этап 2: расчет доли площади различных видов земель природного каркаса (лесные земли, луговые земли, а также земли под древесно-кустарниковой растительностью, земли под открытыми болотами и земли под водными объектами) от общей площади каждого ФГР [17].

Этап 3: выяснение значений $I_{СПГ}$ всех физико-географических провинций, округов и районов.

Методом экспертной оценки установлено, что в наибольшей степени экологические функции проявляются у земель под открытыми болотами. Они почти не задействуются в хозяйственной деятельности, в основном вмещают ООПТ, представляют собой ядра экологической сети, благоприятно влияют на газовый состав атмосферы и микроклимат, регулируют уровень грунтовых вод и сохраняют биологическое разнообразие. Лесные земли также выполняют различные экологические функции, однако преимущественно они являются вторичными по происхождению и в большей степени участвуют в хозяйственной деятельности. Земли, занятые естественными и искусственными водными акваториями, отличаются наиболее специфическими условиями формирования, имеют важное значение для создания экологических коридоров, они сильнее остальных геосистем преобразованы человеком и подвержены загрязнению в результате хозяйственной деятельности. В свою очередь, земли под древесно-кустарниковой растительностью организуют экологические коридоры между лесными и болотными массивами и выступают важным звеном экологической сети. Однако они, как правило, возникают на месте выведенных из сельскохозяйственного оборота сенокосов, пастбищ и низкопродуктивных пахотных земель, поэтому отличаются меньшей сохранностью природных функций. Наконец, луговые земли (естественные сенокосы и пастбища) относятся преимущественно к сельскохозяйственным ландшафтам, они в наибольшей степени преобразованы человеком.

Для каждого из перечисленных видов земель природного каркаса определен коэффициент значимости от 1 (луговые земли) до 2 (земли под открытыми болотами) с шагом 0,25. Значения $I_{СПГ}$ рассчитывались по формуле

$$I_{СПГ} = \frac{2S_{бол} + 1,75S_{лес} + 1,5S_{вод} + 1,25S_{куст} + S_{луг}}{S_{общ}}$$

где $S_{бол}$ – площадь земель под открытыми болотами; $S_{лес}$ – площадь лесных земель; $S_{вод}$ – площадь земель под водными объектами; $S_{куст}$ – площадь земель под древесно-кустарниковой растительностью; $S_{луг}$ – площадь луговых земель; $S_{общ}$ – общая площадь ФГР.

⁷Реестр земельных ресурсов Республики Беларусь [Электронный ресурс]. URL: http://www.gki.gov.by/ru/activity_branches-land-reestr (дата обращения: 15.03.2023).

Этап 4: расчет значений $K_{ООПТ}$, который характеризует площадные и функциональные особенности размещения современной сети ООПТ. Это необходимо осуществить, потому что не все земли природного каркаса играют важную роль в формировании ядер экологической сети. Данные о размещении ООПТ на территории Беларуси взяты с сайта Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь⁸.

В зависимости от экологической значимости ООПТ Беларуси можно условно разделить на пять групп. В первую группу (с наиболее выраженной природоохранной функцией) входит Березинский биосферный заповедник. Вторую группу составляют национальные парки, которые выполняют в большей степени просветительскую, научную и рекреационную функции и в меньшей степени природоохранную функцию. ООПТ первой и второй групп выступают ядрами экологической сети европейского значения. Третья группа включает заказники республиканского значения (преимущественно ядра экологической сети национального значения). В четвертую группу входят заказники местного значения, природоохранная функция которых ниже (обычно ядра экологической сети местного значения). Наконец, пятую группу составляют памятники природы республиканского и местного значения. Они занимают незначительные площади, так как представлены точечными объектами (валуны, вековые и редкие деревья, родники), и выполняют в основном рекреационную функцию. Целесообразно при расчетах значений природоохранного потенциала учитывать не только площадь памятников природы, но и их количество. Каждая из этих групп имеет свой коэффициент значимости – от 1 (пятая группа) до 2 (первая группа) с шагом 0,25. Коэффициент значимости памятников природы увеличивается на 0,01 за каждый объект.

Чтобы $K_{ООПТ}$ в некоторых ФГР, в которых ООПТ отсутствуют, не равнялся значению 0, его предлагается рассчитывать по формуле

$$K_{ООПТ} = 1 + \frac{2S_{зап} + 1,75S_{НП} + 1,5S_{ЗРЗ} + 1,25S_{ЗМЗ} + S_{пам} \cdot 0,01n}{S_{общ}}$$

где $S_{зап}$ – площадь заповедников; $S_{НП}$ – площадь национальных парков; $S_{ЗРЗ}$ – площадь заказников республиканского значения; $S_{ЗМЗ}$ – площадь заказников местного значения; $S_{пам}$ – площадь памятников природы; n – количество памятников природы; $S_{общ}$ – общая площадь ФГР.

Этап 5: расчет значений интегрального показателя природоохранного потенциала ($ИП_{ПП}$) ФГР как произведения величин показателей $И_{СПП}$ и $K_{ООПТ}$.

Результаты и их обсуждение

Использование инструментов программного обеспечения *ArcGIS* при подготовке карты физико-географического районирования к публикации в новом Национальном атласе Республики Беларусь позволило уточнить контуры отдельных ФГР (Минской возвышенности, Ошмянской возвышенности, Докшицкой равнины, Чашникской равнины, Ушачско-Лукомльской возвышенности, Лельчицкой равнины и Мозырско-Юровичской возвышенности), а также их названия. ФГР различаются не только особенностями природных компонентов, но и размерами, которые варьируются от 89,20 тыс. га (Гродненская возвышенность) до 1240,82 тыс. га (Ясельдинско-Слуцкая низменность). Как правило, большими площадями обладают ФГР, геолого-геоморфологическая основа которых представлена низменностями и равнинами (табл. 1).

Таблица 1

Природоохранный потенциал ФГР Беларуси

Table 1

Environmental potential of physical and geographical regions of Belarus

Физико-географический округ	Физико-географический район	Площадь, тыс. га	Земли природного каркаса		И _{СПП}	ООПТ		К _{ООПТ}	ИП _{ПП}
			Площадь, тыс. га	Доля, %		Площадь, тыс. га	Доля, %		
Белорусская Поозерская провинция									
Витебское Поозерье	Нещердо-Городокская возвышенность (1)	299,26	260,25	87,0	1,43	40 505,9	13,5	1,182	1,69
	Суражская равнина (2)	180,20	136,10	75,5	1,19	1373,9	0,8	1,011	1,20
	Витебская возвышенность (3)	208,60	142,65	68,4	1,07	158,0	0,1	1,001	1,07
	Лучосская равнина (4)	207,77	132,23	63,6	0,98	18 102,2	8,7	1,123	1,10

⁸Особо охраняемые природные территории Республики Беларусь. Карта...

Продолжение табл. 1
Continuation of the table 1

Физико-географический округ	Физико-географический район	Площадь, тыс. га	Земли природного каркаса		И _{спг}	ООПТ		К _{оопт}	ИП _{пп}
			Площадь, тыс. га	Доля, %		Площадь, тыс. га	Доля, %		
Браславское Поозерье	Освейско-Браславские гряды (5)	330,20	241,87	73,3	1,14	101 411,4	30,7	1,509	1,72
Подвинье	Дисненская низменность (6)	224,20	146,57	65,4	0,98	23 626,4	10,5	1,147	1,12
	Полоцкая низменность (7)	648,90	508,23	78,3	1,26	98 110,4	15,1	1,224	1,54
	Шумилинская равнина (8)	386,85	282,41	73,0	1,15	8334,2	2,2	1,030	1,18
Нарочано-Ушачское Поозерье	Чашникская равнина (9)	152,85	108,28	70,8	1,07	21 422,6	14,0	1,190	1,27
	Ушачско-Лукомльская возвышенность (10)	404,36	305,06	75,4	1,20	3333,2	0,8	1,011	1,21
	Свенцянские гряды (11)	316,60	220,67	69,7	1,06	27 189,4	8,6	1,120	1,19
	Нарочанская равнина (12)	238,90	168,99	70,7	1,11	107 259,8	44,9	1,762	1,96
<i>Западно-Белорусская провинция</i>									
Центральный округ Белорусской гряды	Вилейская низменность (13)	441,60	298,60	67,6	1,05	9012,0	2,0	1,026	1,08
	Ошмянская возвышенность (14)	288,28	175,28	60,8	0,95	10 042,2	3,5	1,043	0,99
	Минская возвышенность (15)	675,34	376,61	55,8	0,88	22 931,1	3,4	1,050	0,92
	Докшицкая равнина (16)	119,54	88,86	74,3	1,20	1092,4	0,9	1,024	1,23
	Верхнеберезинская низменность (17)	279,52	208,28	74,5	1,21	106 433,9	38,1	1,705	2,06
	Борисовская возвышенная равнина (18)	248,79	170,82	68,7	1,13	3381,6	1,4	1,018	1,15
Понеманье	Средненеманская низменность (19)	370,27	217,51	58,7	0,92	79 169,3	21,4	1,314	1,21
	Верхненеманская низменность (20)	364,26	229,36	63,0	1,02	97 216,3	26,7	1,393	1,42
	Лидская равнина (21)	441,21	248,87	56,4	0,85	12 691,2	2,9	1,036	0,88
	Столбцовская равнина (22)	216,49	132,89	61,4	0,97	4846,1	2,2	1,032	1,0
Юго-западный округ Белорусской гряды	Гродненская возвышенность (23)	89,20	49,75	55,8	0,89	112,6	0,1	1,001	0,89
	Волковысская возвышенность (24)	404,55	204,75	50,6	0,78	12 711,9	3,1	1,043	0,81
	Слонимская возвышенная равнина (25)	193,63	106,96	55,2	0,85	8202,9	4,2	1,061	0,90
	Новогрудская возвышенность (26)	340,24	198,18	58,2	0,89	6874,1	2,0	1,027	0,91
	Копыльская гряда (27)	175,95	70,56	40,1	0,58	862,3	0,5	1,006	0,58
<i>Восточно-Белорусская провинция</i>									
Поднепровье	Оршанская возвышенность (28)	347,50	186,01	53,5	0,83	3988,1	1,1	1,014	0,84
	Горецко-Мстиславльская возвышенность (29)	288,57	142,24	49,3	0,73	190,0	0,1	1,001	0,73
	Оршанско-Могилёвская равнина (30)	965,48	521,42	54,0	0,83	7649,8	0,8	1,010	0,84
	Костюковичская равнина (31)	685,24	482,89	70,5	1,10	59 942,9	8,7	1,115	1,23
<i>Предполесская провинция</i>									
Западное Предполесье	Пружанская равнина (32)	478,68	308,30	64,4	1,03	161 841,6	33,8	1,584	1,63
	Барановичская равнина (33)	307,65	189,78	61,7	0,97	20 636,7	6,7	1,094	1,06
	Слуцкая равнина (34)	421,50	198,04	47,0	0,71	3843,6	0,9	1,013	0,72

Окончание табл. 1
Ending of the table 1

Физико-географический округ	Физико-географический район	Площадь, тыс. га	Земли природного каркаса		И _{спг}	ООПТ		К _{оопт}	ИП _{пп}
			Площадь, тыс. га	Доля, %		Площадь, тыс. га	Доля, %		
Восточное Предполесье	Пуховичская равнина (35)	490,97	279,05	56,8	0,89	13 682,9	2,8	1,038	0,93
	Центральноберезинская равнина (36)	1087,55	740,38	68,1	1,10	96 133,4	8,8	1,123	1,24
	Бобруйская равнина (37)	556,87	388,87	69,8	1,12	23 163,7	4,2	1,059	1,19
	Кличевско-Рогачевская равнина (38)	331,37	200,18	60,4	0,95	485,6	0,1	1,002	0,95
	Чечерская равнина (39)	596,15	357,81	60,0	0,96	28 735,1	4,8	1,067	1,02
<i>Полесская провинция</i>									
Брестское Полесье	Высоковская равнина (40)	393,18	218,34	55,5	0,84	22 544,2	5,7	1,077	0,90
	Малоритская равнина (41)	317,04	201,74	63,6	0,98	32 402,8	10,2	1,142	1,12
	Равнина Загородье (42)	240,17	153,50	63,9	0,96	1431,7	0,6	1,007	0,97
Припятское Полесье	Ясельдинско-Слуцкая низменность (43)	1240,82	891,01	71,8	1,15	115 470,7	9,3	1,134	1,30
	Среднеприпятская низменность (44)	921,41	705,26	76,5	1,24	363 753,7	39,5	1,612	2,0
Мозырское Полесье	Лельчицкая равнина (45)	456,03	376,70	82,6	1,40	7536,5	1,7	1,021	1,43
	Мозырско-Юровичская возвышенность (46)	167,37	122,57	73,2	1,20	18 249,9	10,9	1,120	1,34
Гомельское Полесье	Копаткевичская равнина (47)	458,46	328,47	71,6	1,17	7377,1	1,6	1,024	1,20
	Василевичская низменность (48)	684,07	473,39	69,2	1,13	4166,3	0,6	1,008	1,14
	Речицко-Сожская низменность (49)	713,91	418,44	58,6	0,92	57 136,4	8,0	1,112	1,02
	Комаринская низменность (50)	362,38	289,74	80,0	1,32	3,2	0	1,0	1,32

Примечание. Цифры в скобках соответствуют обозначениям на рис. 1–3.

ФГР различаются по степени хозяйственной освоенности, преобразованности ландшафтов и структуре земель, расположенных в их пределах. На формирование экологической сети в ФГР влияет доля площади земель природного каркаса, которые представлены природными и природно-антропогенными экосистемами (лесными, болотными, луговыми, древесно-кустарниковыми и аквальными), от общей площади региона. Несмотря на достаточно высокую степень сельскохозяйственной освоенности Беларуси, земли природного каркаса занимают в среднем около 65,5 % от площади страны. По ФГР этот показатель различается более чем в 2 раза, он варьируется от 87,0 % (Нещердо-Городокская возвышенность) до 40,1 % (Копыльская гряда). Значительные площади (более 75 %) сохранившихся природных экосистем характерны прежде всего для отдельных ФГР Белорусской Поозерской (Нещердо-Городокская возвышенность, Суражская равнина, Полоцкая низменность, Ушачско-Лукомльская возвышенность) и Полесской (Лельчицкая равнина, Среднеприпятская низменность, Комаринская низменность) провинций. Слабая освоенность территории объясняется низким плодородием почв, их заболоченностью и загрязненностью радионуклидами. К районам с большей преобразованностью природных геосистем (менее 55 %) относятся ФГР Западно-Белорусской (Копыльская гряда, Волковысская возвышенность), Восточно-Белорусской (Оршанская возвышенность, Горецко-Мстиславльская возвышенность, Оршанско-Могилёвская равнина) и Предполесской (Слуцкая равнина) провинций.

Среди земель природного каркаса преобладают лесные экосистемы, которые покрывают от 20,2 % (Копыльская гряда) до 67,2 % (Лельчицкая равнина) территории Беларуси. Более 50 % от площади страны (Нещердо-Городокская возвышенность, Верхнеберезинская низменность, Докшицкая равнина, Борисовская возвышенная равнина, Центральноберезинская равнина, Бобруйская равнина, Лельчицкая равнина, Мозырско-Юровичская возвышенность, Копаткевичская равнина, Василевичская низменность

и Комаринская низменность) заняты лесами. В отдельных ФГР (Копыльская гряда, Слуцкая равнина, Горещко-Мстиславльская возвышенность, равнина Загородье) лесные земли покрывают менее 30 % территории страны. На протяжении последних 30 лет площадь лесных земель в пределах всех ФГР увеличивается.

Немного меньшую площадь занимают луговые земли. Среди них преобладают вторичные экосистемы с сенокосами и пастбищами. Луговой растительностью покрыты от 5,7 % (Нещердо-Городокская возвышенность) до 19,8 % (равнина Загородье) территории страны. В последние годы площадь лугов уменьшилась во всех ФГР на величину от 0,6 % (Вилейская низменность) до 8,2 % (Лучоская равнина). Сокращение размеров луговых сообществ объясняется высокими темпами зарастания луговых фитоценозов древесно-кустарниковой растительностью в результате снижения численности сельского населения, а следовательно, и поголовья скота, а также из-за исчезновения сельских поселений, последствий загрязнения сельскохозяйственных угодий радионуклидами и экспансии сорных и инвазивных видов растений, приводящих к бурьянизации луговых фитоценозов.

Древесно-кустарниковая растительность занимает почти 5 % от земельного фонда страны и по площади распространения уступает только лесной и луговой растительности. В разрезе ФГР ее доля составляет от 1,5 % (Слуцкая равнина) до 13,1 % (Суражская равнина). Более значительные площади земель покрыты древесно-кустарниковой растительностью в ФГР Белорусской Поозерской провинции, что объясняется выводом из сельскохозяйственного оборота малопродуктивных земель, мелкоконтурностью угодий и зарастанием бывших сенокосов и пастбищ кустарником в связи с сокращением поголовья скота. Во всех ФГР, кроме Слуцкой равнины, за последние 20 лет площадь земель под древесно-кустарниковой растительностью увеличилась.

Важное значение среди земель природного каркаса имеют болота. После широкомасштабной мелиорации площадь открытых болот в Беларуси сильно сократилась, однако они занимают 3,6 % от земельного фонда страны. Большинство открытых болот сегодня заняты ООПТ. Самая высокая (12,7 %) доля земель под открытыми болотами отмечена в пределах Среднеприпятской низменности, а самая низкая (0,6 %) зафиксирована на Минской возвышенности и Столбцовой равнине. Лучше всего открытые болота сохранились в большинстве ФГР Белорусской Поозерской и Полесской провинций. Наметившаяся в прошлом столетии тенденция уменьшения размеров болот продолжается и в настоящее время. Практически во всех ФГР страны площадь болот незначительно сокращается (как правило, на доли процента).

Наименьшую территорию (2,3 %) среди земель природного каркаса занимают аквальные экосистемы с водной растительностью, которые наиболее равномерно распределяются по Беларуси. Их площадь колеблется от 0,9 % (Костюковичская равнина) до 7,1 % (Освейско-Браславские гряды). Чаще всего земли под водными объектами встречаются в большинстве ФГР Белорусской Поозерской провинции. За последние годы размеры земель этой категории практически не изменились.

С учетом экологической значимости земель природного каркаса рассчитаны значения $I_{СПГ}$ и проведена группировка ФГР страны по данному показателю (рис. 1). Все ФГР дифференцировались на четыре группы.

В группу со значением $I_{СПГ}$ более 1,21 входят 6 ФГР, расположенных преимущественно в Полесской и Белорусской Поозерской провинциях, а также в Западно-Белорусской провинции. Они характеризуются большими площадями лесных земель (более 40 %), а в некоторых районах (Лельчицкая равнина, Комаринская низменность и Нещердо-Городокская возвышенность) лесистость достигает максимальных величин по стране (более 60 %). Кроме того, значительные площади заняты землями под открытыми болотами (более 4 %), особенно много их зафиксировано в пределах Среднеприпятской низменности.

Довольно высокая сохранность природных геосистем характерна для 20 ФГР, которые составляют группу со значением $I_{СПГ}$ 1,01–1,20. В данную группу входят ФГР, размещенные в различных провинциях и отличающиеся повышенной лесистостью, а также средними показателями площади земель с древесно-кустарниковой, луговой и болотной растительностью.

Группу со значением $I_{СПГ}$ 0,81–1,0 образуют 20 ФГР, большинство из которых расположены в пределах Западно-Белорусской и Восточно-Белорусской провинций, лучше освоенных в сельскохозяйственном отношении.

Наконец, 4 ФГР с наиболее плодородными почвами характеризуются минимальной сохранностью природных геосистем и формируют группу со значением $I_{СПГ}$ менее 0,81.

Важную роль в создании национальной экологической сети играет наличие не только земель природного каркаса (потенциальных экологических коридоров), но и уникальных природных геосистем, на базе которых формируются ООПТ (экологические ядра). ООПТ также неравномерно распространяются по стране. Для определения территориальных особенностей размещения ООПТ рассчитаны значения $K_{ООПТ}$. По данному показателю ФГР Беларуси делятся на четыре группы (рис. 2).

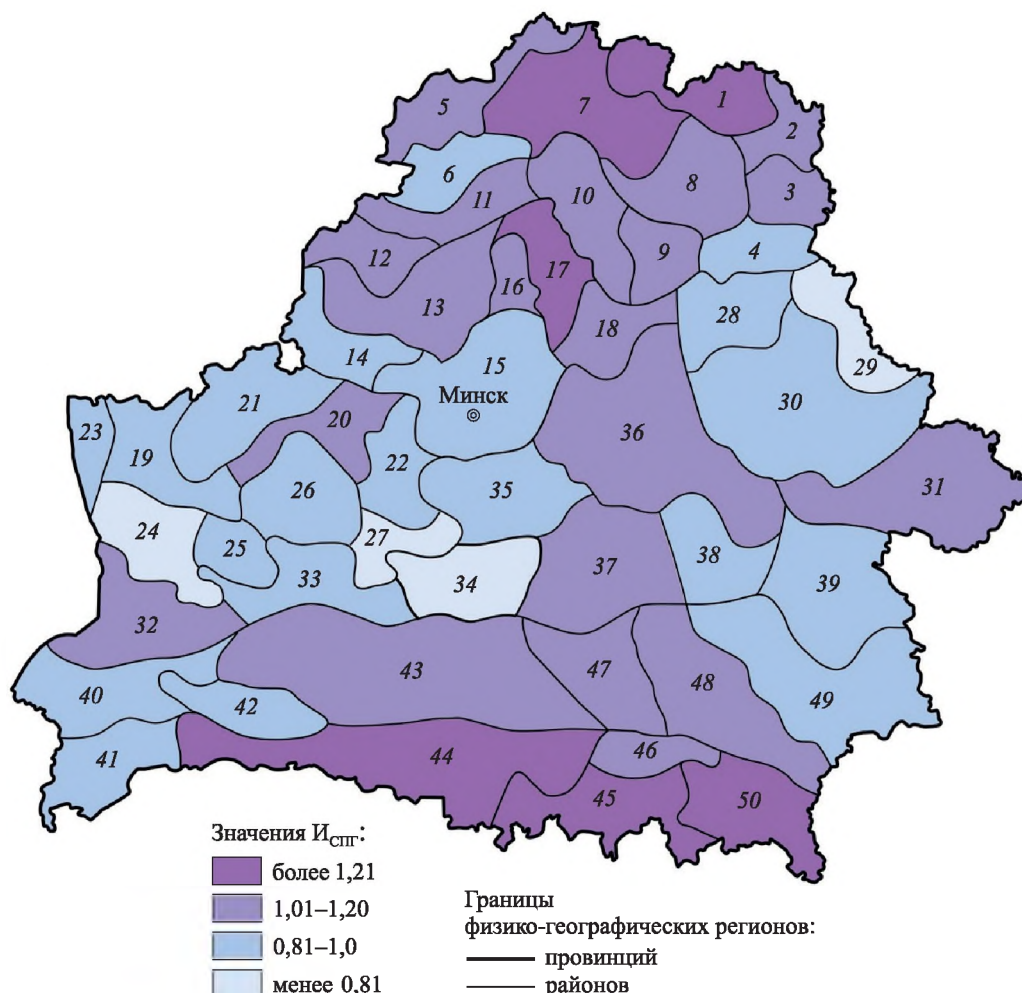


Рис. 1. Распределение ФГР Беларуси по группам в зависимости от значений $I_{СПГ}$.
Обозначенные цифрами 1–50 районы см. в табл. 1

Fig. 1. Distribution of physical and geographical regions of Belarus by groups depending on the values of index of conservation of natural geosystems.
Marked with numbers 1–50 regions see on the table 1

В группу со значением $K_{ООПТ}$ более 1,50 входят 5 ФГР. Высокие показатели обеспеченности ООПТ объясняются наличием в ФГР этой группы крупных ООПТ (заповедника или национального парка), а также заказников и памятников природы.

Группу со значением $K_{ООПТ}$ 1,21–1,50 образуют 3 ФГР. Сравнительно высокие показатели обеспеченности ООПТ в данных районах обусловлены нахождением в их пределах больших по площади заказников республиканского значения («Козьянский», «Ельня», «Красный Бор», «Налибокский», «Озёры», «Гродненская пуша» и т. д.).

В свою очередь, группу со значением $K_{ООПТ}$ 1,11–1,20 составляют 11 ФГР, расположенных в разных провинциях. Для них характерны средние показатели обеспеченности ООПТ.

Наибольшее количество ФГР (31) входит в группу со значением $K_{ООПТ}$ 1,0–1,10. Отсутствие или малое число ООПТ в этих районах объясняется высокой хозяйственной освоенностью территории страны. В то же время ФГР данной группы имеют потенциал для формирования новых ООПТ. Следует отметить, что в некоторых ФГР (Витебская возвышенность, Комаринская низменность, Суражская равнина, Ушачско-Лукомльская возвышенность, Копыльская гряда, Слуцкая равнина, Кличевско-Рогачевская равнина, Горецко-Мстиславльская возвышенность, Оршанско-Могилёвская равнина, Василевичская низменность) в настоящее время $K_{ООПТ}$ не превышает значения 1,01. В них ООПТ представлены отдельными памятниками природы либо небольшими по площади заказниками. Комаринская низменность несколько выпадает из предложенного ряда, потому что она находится на территории, наиболее загрязненной радионуклидами, и в ее пределах размещается Полесский радиационно-экологический заповедник, который не относится к ООПТ страны.

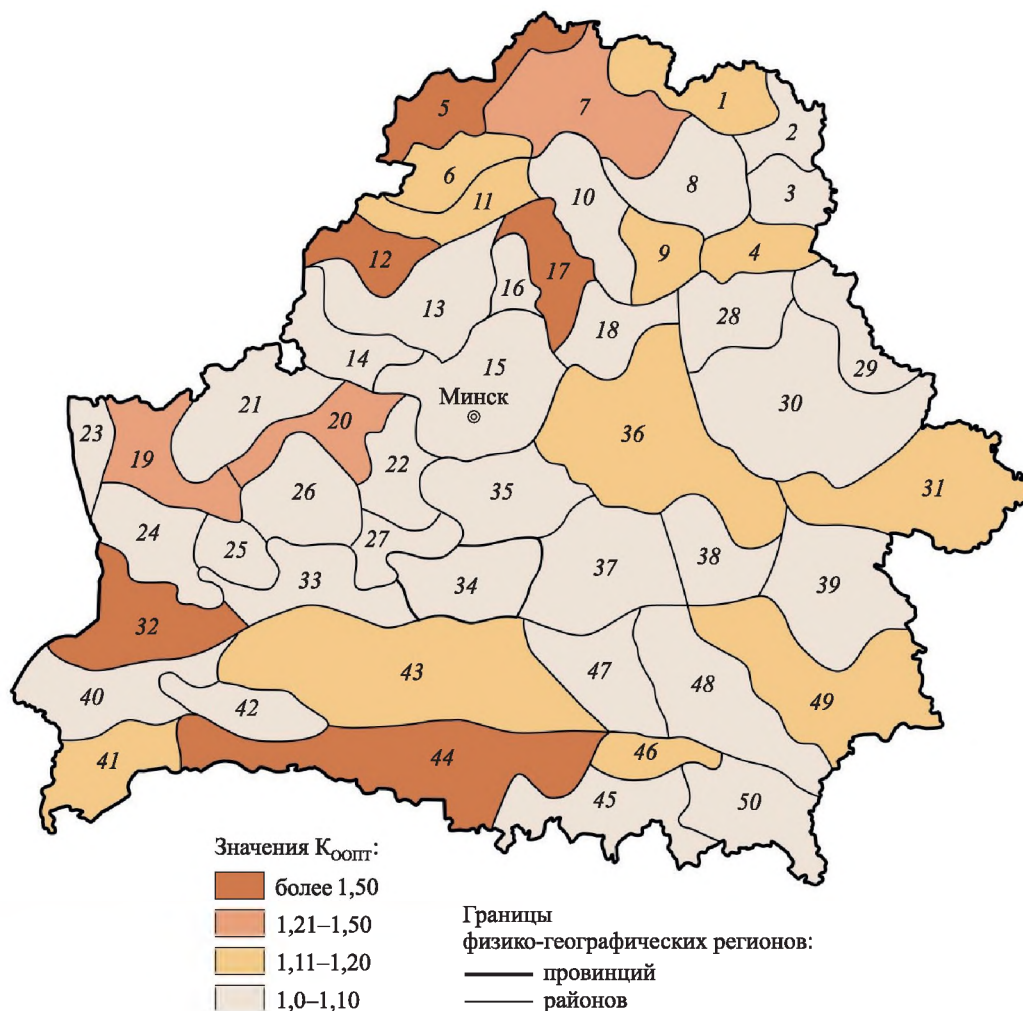


Рис. 2. Распределение ФГР Беларуси по группам в зависимости от значений $K_{\text{опт}}$.
Обозначенные цифрами 1–50 районы см. в табл. 1

Fig. 2. Distribution of physical and geographical regions of Belarus by groups depending on the values of the coefficient of provision of the territory with nature protection objects.
Marked with numbers 1–50 regions see on the table 1

Для совершенствования национальной экологической сети, поддержания старых и создания новых экологических ядер, коридоров и охранных зон, прилегающих к ним, важны сведения о природоохранном потенциале ФГР. Расчеты показали, что значения $ИП_{\text{III}}$ на территории Беларуси изменяются от 0,58 (Копыльская гряда) до 1,96 (Нарочанская равнина). Все ФГР по данному показателю дифференцируются на семь групп (рис. 3).

В группу с наиболее низкими значениями $ИП_{\text{III}}$ (менее 0,81) входят 3 ФГР, размещенных в разных физико-географических провинциях (табл. 2). Они отличаются высокой сельскохозяйственной освоенностью, поэтому в их пределах находятся относительно небольшие площади земель природного каркаса, а природоохранный потенциал характеризуется как низкий.

Группу со значением $ИП_{\text{III}}$ 0,81–1,0 составляют 14 ФГР, расположенных преимущественно в пределах Западно-Белорусской и Восточно-Белорусской провинций. Доля земель природного каркаса в них также уступает средним показателям по стране, что затрудняет формирование экологических коридоров при проектировании экологической сети.

Самое большое количество ФГР образует группу со значением $ИП_{\text{III}}$ 1,01–1,20. К ней относятся районы всех провинций, кроме Восточно-Белорусской, но наибольшее представительство характерно для ФГР Белорусской Поозерской провинции. Величина природоохранного потенциала ФГР данной группы ближе всего к среднему показателю по стране. В их пределах обычно размещены ядра экологической сети национального и регионального значения.

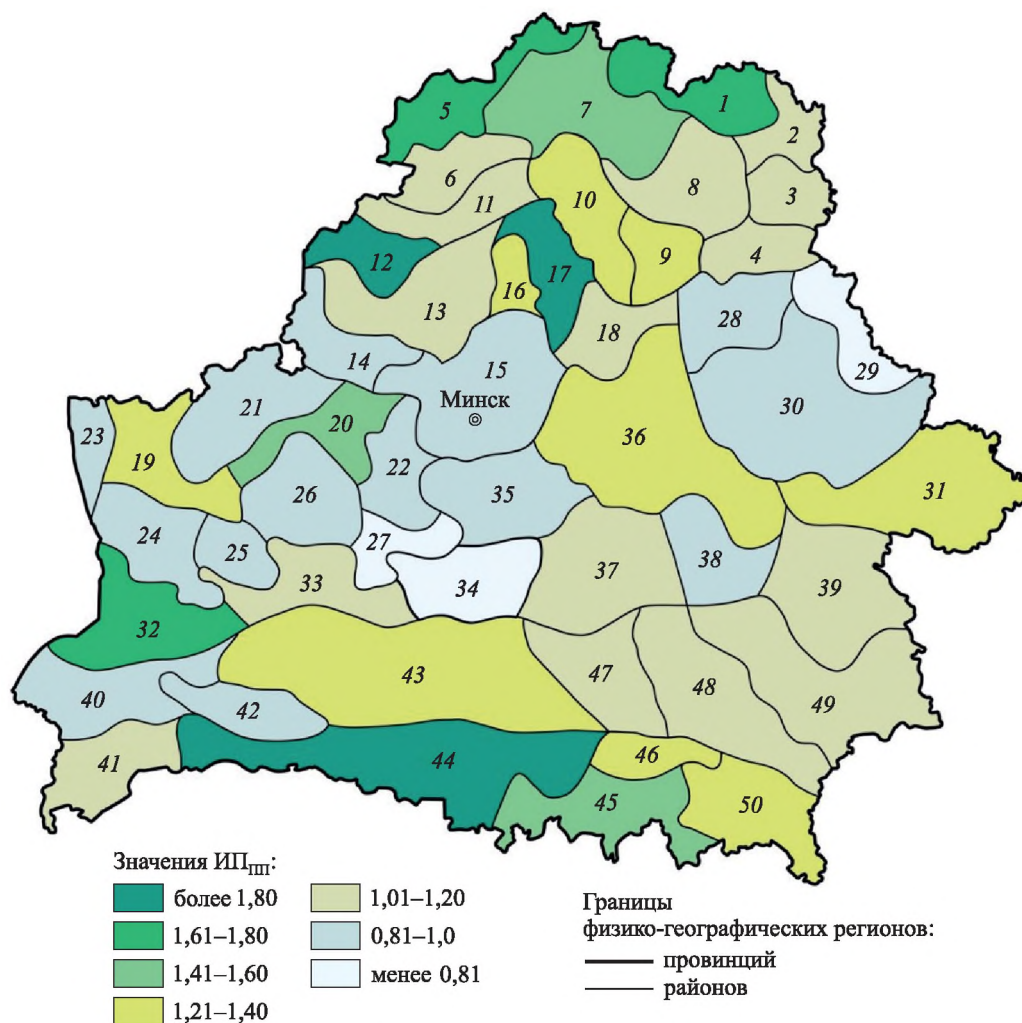


Рис. 3. Распределение ФГР Беларуси по группам в зависимости от значений ИП_{ПП}.
Обозначенные цифрами 1–50 районы см. в табл. 1

Fig. 3. Distribution of physical and geographical regions of Belarus by groups depending on the values of the integral indicator of the environmental potential.
Marked with numbers 1–50 regions see on the table 1

Таблица 2

Распределение ФГР Беларуси, входящих в различные физико-географические провинции, по группам в зависимости от значений ИП_{ПП}

Table 2

Distribution of physical and geographical regions of Belarus included in various physical and geographical provinces by groups depending on the values of the integral indicator of the environmental potential

Физико-географическая провинция	ИП _{ПП,ср}	ИП _{ПП,мин} – ИП _{ПП,макс}	Количество ФГР по группам в зависимости от значений ИП _{ПП}						
			Менее 0,81	0,81–1,0	1,01–1,20	1,21–1,40	1,41–1,60	1,61–1,80	Более 1,80
Белорусская Поозерская	1,39	1,07–1,96	0	0	6	2	1	2	1
Западно-Белорусская	1,05	0,58–2,06	1	8	2	2	1	0	1
Восточно-Белорусская	1,11	0,73–1,23	1	2	0	1	0	0	0
Предполеская	0,94	0,90–2,0	1	2	3	1	0	1	0
Полесская	1,31	0,58–2,06	0	2	4	3	1	0	1

Примечание. ИП_{ПП,ср} – среднее значение ИП_{ПП}; ИП_{ПП,мин} – минимальное значение ИП_{ПП}; ИП_{ПП,макс} – максимальное значение ИП_{ПП}.

Группу со значением $ИП_{III}$ 1,21–1,40 составляют 9 ФГР всех провинций. По 3 ФГР входят в группы со значением $ИП_{III}$ 1,41–1,60; 1,61–1,80 и более 1,80. Практически все они отличаются высокими показателями сохранности природных геосистем, большими площадями лесов и болот, наличием крупных ООПТ. В их пределах размещены ядра экологической сети европейского и национального значения.

Проведенные ранее расчеты значений природоохранного потенциала ФГР [14] позволяют проследить его динамику за последние 15–20 лет. Установлено, что практически во всех ФГР выросли показатели $И_{СП}$ и $K_{ООПТ}$, поэтому увеличились и значения $ИП_{III}$. Сохранность природных геосистем повысилась в связи с расширением площади лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью. За анализируемый период выросли размеры ООПТ, изменились их категории, что привело к увеличению значений $K_{ООПТ}$. Кроме того, в предыдущем исследовании не учитывались памятники природы местного значения.

Существенное повышение природоохранного потенциала отмечается в ФГР групп со значением $ИП_{III}$ 1,61–1,80 и более 1,80 (с крупными ООПТ). Также этот показатель сильно вырос в ФГР Белорусской Поозерской провинции, где огромными темпами повысились лесистость и закустаренность. В пределах Минской возвышенности, Слонимской возвышенной равнины, Барановичской равнины, Слуцкой равнины и Василевичской низменности значения $ИП_{III}$ немного снизились или остались на прежнем уровне.

Заключение

На формирование национальной экологической сети влияют природные особенности территории, поэтому плотность сети имеет региональные отличия. Выраженность экологических коридоров и буферных зон определяется наличием земель природного каркаса (лесных земель, луговых земель, а также земель под открытыми болотами, земель под древесно-кустарниковой растительностью и земель под водными объектами), площадь и экологическая значимость которых существенно различаются по ФГР страны.

Посредством $И_{СП}$ характеризуются территориальные особенности земель природного каркаса с учетом их экологической значимости. Его величины изменяются от 0,58 (Копыльская гряда) до 1,40 (Лельчицкая равнина) и позволяют дифференцировать ФГР на четыре группы.

С помощью $K_{ООПТ}$ можно установить специфику размещения ООПТ в пределах ФГР. Он показывает уникальность земель природного каркаса, что дает возможность выделить ООПТ различных категорий. Наиболее высокий показатель $K_{ООПТ}$ (более 1,5) свойствен для ФГР, в пределах которых располагаются ядра экологической сети европейского значения (Нарочанская равнина, Верхнеберезинская низменность, Освейско-Браславские гряды, Пружанская равнина и Среднеприпятская низменность). В ряде ФГР коэффициент близок к значению 0, поскольку в них отсутствуют ООПТ или они представлены памятниками природы.

Благодаря $ИП_{III}$ можно более полно охарактеризовать потенциальные возможности формирования экологической сети, так как он определяет особенности размещения всех ее элементов. На территории Беларуси значения этого показателя изменяются от 0,58 (Копыльская гряда) до 2,06 (Верхнеберезинская низменность). По величине $ИП_{III}$ ФГР дифференцируются на семь групп. Районы, которые относятся к группам со значением $ИП_{III}$ 1,21–1,40; 1,41–1,60; 1,61–1,80 и более 1,80, включают ядра экологической сети европейского и национального значения, водные и лесные экологические коридоры и в достаточной степени выполняют задачу по сохранению биологического разнообразия. ФГР групп со значением $ИП_{III}$ менее 0,81; 0,81–1,0 и 1,01–1,20 требуют более пристального внимания к размещению элементов экологической сети.

Библиографические ссылки

1. Бобрик МЮ, Пиловец ГИ, Тимошкова АД, Фалалеева МА, Шкарубо АД, Кирсеев ВВ. *Изменение климата: последствия, смягчение, адаптация*. Витебск: Витебский государственный университет имени П. М. Машерова; 2015. 423 с.
2. Логинов ВФ, Лысенко СА. *Современные изменения глобального и регионального климата*. Минск: Белорусская наука; 2019. 314 с.
3. Логинов ВФ, Лысенко СА, Мельник ВИ. *Изменения климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования*. Минск: Энциклопедикс; 2020. 263 с.
4. Брилевский МН. Проблема изменения климата на территории Беларуси: отрицательные и положительные аспекты для хозяйственной деятельности. *География*. 2020;6:3–13.
5. Брилевский МН. Региональные особенности изменения климата Беларуси. В: Лопух ПС, редактор. *Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках. Материалы Международной научно-практической очно-заочной конференции, посвященной 100-летию Белорусского государственного университета, 60-летию кафедры физической географии и образовательных технологий, 100-летию со дня рождения профессора О. Ф. Якушко; 24–26 марта 2021 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2021. с. 253–260.

6. Брилевский МН. Изменения температурного режима на территории Республики Беларусь в период глобального потепления. В: Керимов ИА, Широкова ВА, редакторы. *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том 12*. Москва: Институт истории естествознания и техники имени С. И. Вавилова РАН; 2022. с. 619–626.
7. Данилович ИС, Мельник ВИ, Гейер Б. Современные изменения климата Белорусского Полесья: причины, следствия, прогнозы. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2020;1:3–13. DOI: 10.33581/2521-6740-2020-1-3-13.
8. Израэль ЮА, Богдевич ИМ, редакторы. *Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия – Беларусь)*. Москва: Фонд «Инфосфера» – НИА-природа; 2009. 140 с. Совместно с Республиканским унитарным предприятием «Белкартография».
9. Стрельченко СГ, редактор. *Устойчивое развитие территорий, пострадавших от чернобыльской катастрофы: опыт Союзного государства. Материалы 33-го заседания постоянно действующего семинара при Парламентском собрании Союза Беларуси и России по вопросам строительства Союзного государства; 5–6 июня 2013 г.; Мозырь, Беларусь*. Минск: Центр системного анализа и стратегических исследований НАН Беларуси; 2013. 275 с.
10. Никифоров МЕ, Анисимова ЕИ, Гомель КВ, Домбровский ВЧ, Журавлев ДВ, Крипчук ИА и др. *Биологическое разнообразие животного мира Полесского государственного радиационно-экологического заповедника*. Минск: Белорусская наука; 2022. 407 с.
11. Витченко АН, Бакарасов ВА, Брилевский МН, Гагина НВ, Телеш ИА, Харитоновна ЛМ. *Экологическая политика Республики Беларусь и экологические риски*. Витченко АН, редактор. Минск: Издательский центр БГУ; 2011. 120 с.
12. Diaz S, Settele J, Brondizio ES, Ngo HT, Gueze M, Agard J, et al. *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services* [Internet]. Bonn: IPBES secretariat; 2019 [cited 2023 May 10]. 56 p. Available from: https://www.ipbes.net/sites/default/files/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf. DOI: 10.5281/zenodo.3553579.
13. Счастливая ИИ, Воробьев ДС. Структура природных ландшафтов и ее роль в создании схемы ландшафтного районирования Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2022;1:28–41. DOI: 10.33581/2521-6740-2022-1-28-41.
14. Брилевский МН, Гагина НВ, Морозов ЕВ. Геоэкологическая оценка природоохранного потенциала физико-географических регионов Беларуси. *Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География*. 2009;2:88–93.
15. Kondracki J. Republika Białoruska. *Geografia w szkole*. 1992;1:24–30.
16. Марцінкевіч ГІ, Кліцунова НК, Счастливая ИИ, Якушко ОФ. Теоретические проблемы и результаты комплексного географического районирования территории Беларуси. У: Пирожник П, редактор. *Выбраныя навуковыя працы Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта. Том 7, Біялогія, геаграфія*. Минск: БДУ; 2001. с. 333–356.
17. Брылеўскі ММ, Марозаў ЯУ. *Фізічная геаграфія Беларусі*. Минск: БДУ; 2021. 187 с.

References

1. Bobrik MYu, Pilovets GI, Timoshkova AD, Falaleeva MA, Shkarubo AD, Kireev VV. *Izmenenie klimata: posledstviya, smyagchenie, adaptatsiya* [Climate change: consequences, mitigation, adaptation]. Vitebsk: Vitebsk State University named after P. M. Mashev; 2015. 423 p. Russian.
2. Loginov VF, Lysenko SA. *Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Modern changes in the global and regional climate]. Minsk: Belorusskaya nauka; 2019. 313 p. Russian.
3. Loginov VF, Lysenko SA, Melnik VI. *Izmeneniya klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate changes in Belarus: causes, consequences, regulatory opportunities]. Minsk: Entsiklopediks; 2020. 263 p. Russian.
4. Bryleuski MN. [The problem of climate change on the territory of Belarus: negative and positive aspects for economic activity]. *Geografija*. 2020;6:3–13. Russian.
5. Bryleuski MN. Regional features of climate change in Belarus. In: Lopukh PS, editor. *Razvitie geograficheskikh issledovaniy v Belarusi v XX–XXI vekakh. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi ochno-zaochnoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta, 60-letiyu kafedry fizicheskoi geografii i obrazovatel'nykh tekhnologii, 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora O. F. Yakushko; 24–26 marta 2021 g.; Minsk, Belarus* [The development of geographical research in Belarus in the 20th–21st centuries. Proceedings of the International scientific and practical part-time conference dedicated to the 100th anniversary of Belarusian State University, the 60th anniversary of the department of physical geography and educational technologies and the 100th anniversary of the birth of professor O. F. Yakushko; 2021 March 24–26; Minsk, Belarus]. Minsk: Belarusian State University; 2021. p. 253–260. Russian.
6. Bryleuski MN. [Changes in the temperature regime on the territory of the Republic of Belarus during the period of global warming]. In: Kerimov IA, Shirokova VA, editors. *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza. Tom 12* [Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. Volume 12]. Moscow: S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Sciences; 2022. p. 619–626. Russian.
7. Danilovich IS, Melnik VI, Geyer B. The current climate changes in Belarusian Polesje Region: factors, consequences, projections. *Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology*. 2020;1:3–13. Russian. DOI: 10.33581/2521-6740-2020-1-3-13.
8. Izrael' YuA, Bogdevich IM, editors. *Atlas sovremennykh i prognoznnykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi (ASPА Rossiya – Belarus)* [Atlas of modern and predictive aspects of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in the affected territories of Russia and Belarus (ASPА Russia – Belarus)]. Moscow: Fond «Infosfera» – NIA-priroda; 2009. 140 p. Co-published by the Republican unitary enterprise «Belkartografiya». Russian.
9. Strel'chenko SG, editor. *Ustoichivoe razvitie territorii, postradavshikh ot chernobyl'skoi katastrofy: opyt Soyuznogo gosudarstva. Materialy 33-go zasedaniya postoyanno deistvuyushchego seminar pri Parlamentskom sobranii Soyuzna Belarusi i Rossii po voprosam stroitel'stva Soyuznogo gosudarstva; 5–6 iyunya 2013 g.; Mozyr', Belarus* [Sustainable development of territories affected by the Chernobyl disaster: the experience of the Union State. Proceedings of the 33rd meeting of the permanent seminar at the Parliamentary Assembly of the Union of Belarus and Russia on the construction of the Union State; 2013 June 5–6; Mozyr, Belarus]. Minsk: Center for System Analysis and Strategic Research of the National Academy of Sciences of Belarus; 2013. 275 p. Russian.

10. Nikiforov ME, Anisimova EI, Gomel' KV, Dombrovskii VCh, Zhuravlev DV, Krishchuk IA, et al. *Biologicheskoe raznoobrazie zhivotnogo mira Polesskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika* [Biological diversity of the animal world of the Polesky State Radiation-Ecological Reserve]. Minsk: Belorusskaya nauka; 2022. 407 p. Russian.
11. Vitchenko AN, Bakarsov VA, Bryleuski MN, Gagina NV, Telesh IA, Kharitonova LM. *Ekologicheskaya politika Respubliki Belarus' i ekologicheskie riski* [Environmental policy and environmental risks of the Republic of Belarus]. Vitchenko AN, editor. Minsk: Izdatel'skii tsentr BGU; 2011. 120 p. Russian.
12. Diaz S, Settele J, Brondizio ES, Ngo HT, Gueze M, Agard J, et al. *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services* [Internet]. Bonn: IPBES secretariat; 2019 [cited 2023 May 10]. 56 p. Available from: https://www.ipbes.net/sites/default/files/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf. DOI: 10.5281/zenodo.3553579.
13. Schastnaya II, Varabyou DS. The structure of natural landscapes and its role in the development of the landscape zoning scheme of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology*. 2022;1:28–41. Russian. DOI: 10.33581/2521-6740-2022-1-28-41.
14. Bryleuski MN, Gagina NV, Morozov EV. Geoecological's frosts an estimation of nature protection potential of physical geographical regions of Belarus. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 2009;2:88–93. Russian.
15. Kondracki J. Republika Bialoruska. *Geografia w szkole*. 1992;1:24–30.
16. Martsinkevich GI, Klitsunova NK, Shchasnaya II, Yakushko OF. [Theoretical problems and results of complex geographic zoning of the territory of Belarus]. In: Pirozhnik II, editor. *Vybranyja navukovyja pracy Belaruskaga dzjarzhawnaga wniversiteta. Tom 7, Bijalogija, geagrafija* [Selected scientific works of the Belarusian State University. Volume 7, Biology, geography]. Minsk: Belarusian State University; 2001. p. 333–356. Russian.
17. Bryleuski MN, Marozaw JaU. *Fizichnaja gieagrafija Bielarusi* [Physical geography of Belarus]. Minsk: Belarusian State University; 2021. 187 p. Belarusian.

Получена 05.04.2023 / исправлена 12.07.2023 / принята 14.08.2023.
Received 05.04.2023 / revised 12.07.2023 / accepted 14.08.2023.

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В МИРЕ

Л. О. СУШКЕВИЧ¹⁾, А. Н. ШАВЕЛЬ¹⁾, С. С. МИХАЙЛОВ¹⁾¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

На основе официальных статистических данных международных организаций в сфере энергетики (Международное агентство по атомной энергии, Международное энергетическое агентство) проведен анализ динамики развития и современного состояния атомной энергетики в мире. С использованием ретроспективного метода предложена периодизация развития отрасли и дана характеристика выделенным этапам. С помощью математико-статистических оценок, сравнительно-географического и картографического методов получена современная картина развития атомной энергетики в мире в страновом разрезе. Показано постепенное устойчивое сокращение удельного веса атомной генерации в общемировом объеме выработки электроэнергии, что происходит в результате сворачивания темпов развития данного сектора энергетики в странах Западной Европы и Японии на фоне атомофобных настроений правительств и местного населения. Однако отмечено, что продолжается активное развитие атомной энергетики в Азиатско-Тихоокеанском регионе, что подтверждается интенсивным строительством ядерных энергоблоков в Китае и Индии, а также перспективами появления новых стран на мировой карте производства атомной энергии (Беларусь, ОАЭ, Бангладеш, Египет, Турция). В условиях необходимости снижения выбросов углерода в атмосферу, а также исчерпаемости запасов углеводородного топлива и их удорожания на мировом рынке для многих стран атомная энергетика может стать единственным источником устойчивой электрогенерации в ближайшей перспективе, что позволит отрасли вернуть утраченные позиции на мировом энергетическом рынке.

Ключевые слова: мировая энергетика; производство электроэнергии; атомная электростанция; АЭС; ядерный реактор; добыча урана; динамика развития; особенности размещения.

Образец цитирования:

Сушкевич ЛО, Шавель АН, Михайлов СС. Динамика развития атомной энергетики в мире. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2023; 2:31–48 (на англ.).
EDN: LXFCAJ

For citation:

Sushkevich LO, Shavel' AN, Mikhailau SS. Dynamics and spatial features of the development of nuclear energy in the world. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2023;2:31–48.
EDN: LXFCAJ

Авторы:

Лилия Олеговна Сушкевич – кандидат географических наук; заведующий кафедрой экономической и социальной географии факультета географии и геоинформатики.

Алексей Николаевич Шавель – старший преподаватель кафедры экономической и социальной географии факультета географии и геоинформатики.

Сергей Сергеевич Михайлов – преподаватель-стажер кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Liliya O. Sushkevich, PhD (geography); head of the department of economic and social geography, faculty of geography and geoinformatics.

zhigalsk.geol@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5313-0170>

Aliaksei N. Shavel', senior lecturer at the department of economic and social geography, faculty of geography and geoinformatics.

alexshavel@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3542-9259>

Siargei S. Mikhailau, trainee lecturer at the department of soil science and geographic information systems, faculty of geography and geoinformatics.

mikhailau@bsu.by

DYNAMICS AND SPATIAL FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR ENERGY IN THE WORLD

L. O. SUSHKEVICH^a, A. N. SHAVEL'^a, S. S. MIKHAILAU^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: A. N. Shavel' (alexshavel@gmail.com)

The comprehensive analysis of the dynamics of development and the current state of nuclear energy production in the world was carried out based on the official statistics of international organisations in the energy sector (International Atomic Energy Agency, International Energy Agency). Using the retrospective method, the authors propose a periodisation of the development of the industry and give a description of the identified stages. On the basis of mathematical and statistical estimates, comparative geographic and cartographic approaches has been obtained a modern picture of the development of nuclear energy in the world in the country context. The analysis showed a gradual steady reduction in the share of nuclear generation in the global volume of electricity generation, which is taking place against the backdrop of curtailing the development of this energy sector in Western Europe and Japan against the backdrop of atomophobic sentiments of governments and the local population. However, the active development of nuclear energy in the Asia-Pacific region continues, which is confirmed by the intensive construction of nuclear power units in China and India as well as the prospects for the emergence of new countries on the world map of nuclear energy production (Belarus, United Arab Emirates, Bangladesh, Egypt, Turkey). In the context of the need to reduce carbon emissions into the atmosphere and the depletion of hydrocarbon fuel reserves, coupled with their rise in prices on the world market, for many countries nuclear energy may become the only source of sustainable power generation in the short term, which will allow the industry to regain its lost positions in the global energy market.

Keywords: world energy; electricity generation; nuclear power plant; NPP; nuclear reactor; uranium mining; development dynamics; location features.

Introduction

Energy is the basic sector of the economy of any country: the development of the entire economic complex depends on the level of development and efficiency of functioning of energy production. Considering the significant continuing differentiation of the countries of the world in terms of the level of socio-economic development, the situation in the energy sector of the states also varies greatly. This leads to the fact that there is an excess of electricity production in some countries, and in others – its shortage.

The state of the electric power industry in the countries is determined by the level of economic development, the availability and provision of states with fuel and energy resources, their investment opportunities and energy infrastructure development. According to the uneven distribution of fossil fuels, which is the basis for generating thermal energy, many countries are forced to purchase significant amounts of energy resources, which increases their energy dependence on supplier countries. In this case, the most likely alternative to fossil fuels is the use of renewable energy sources and the development of nuclear energy.

And if the development of renewable energy in the world is given priority in the context of the concept of a low-carbon economy and net-zero emissions, then in relation to nuclear energy there is an ambiguous situation associated with atomophobia and fears about possible accidents at nuclear power plants (NPPs), as well as for the time being still unresolved problem of integrated processing, storage and disposal of spent nuclear fuel.

Currently, multidirectional trends are observed in the development of nuclear energy in the world, when some countries increase the production of electricity at NPPs through the construction of new power units, while others, on the contrary, curtail the activities of already functioning facilities. This is largely due to the reasons outlined above, but still, the desire to reduce energy dependence on hydrocarbon fuel suppliers, reduce energy operation costs and greenhouse gas emissions encourage many countries to build nuclear power units and develop nuclear energy. This fact requires both rethinking and evaluation of spatial differences in the processes under consideration, which determines the relevance of this study.

The purpose of the study is to identify spatial-temporal features of the development of nuclear energy in the world. The object of the study was the global nuclear power industry cutaway by country, and the subject of the study was the development trends and spatial features of the location of NPPs in the world.

State of knowledge of the issue and research methodology

Scientific interest in nuclear energy production in the modern world is determined by a new round of its development through the coverage of countries that were not previously involved in the production of electricity at NPPs. However, in many European countries there has been a steady trend towards the shutdown of existing

reactors, and the lack of projects for the construction of new NPPs in the region is leading to a restructuring of the geographical picture of the location of nuclear power in the modern world. Therefore, the main attention to the industry is riveted in countries where the industry is developing most dynamically.

In the scientific literature, there is traditionally a consistently high interest in the economic and geographical study of nuclear energy. The most accessible scientific publications on this topic are prepared by Russian scientists. The main content of their research is devoted to an overview of certain aspects of the development and deployment of nuclear energy in the world. These are, for example, the works of S. Ju. Modnikova [1], E. O. Shorohova [2], T. A. Zhuchkova [3]. Traditionally, Russian authors pay attention to the geopolitical and economic aspects of the positioning of the Russian Federation in the global nuclear energy market: S. S. Alabjan and V. V. Rogov [4], S. Z. Zhiznin and V. M. Timokhov [5; 6]. Some studies (M. I. Romanov [7], V. V. Ivanter, V. V. Semikashv [8], A. B. Sekacheva [9], V. V. Petushkova [10]) are devoted to the study of the development of nuclear energy in certain countries of the world. E. L. Loginov studied the trends in the world's nuclear energy in the post-crisis period for the industry after the accident at the NPP «Fukushima-1» and predicted the strengthening of the role of Russia's nuclear energy complex in the global and national markets [11]. A comprehensive analysis of the world nuclear power industry with a forecast up to 2050 is presented in the B. I. Nigmatulin's article [12].

Sufficient attention has been paid to the development of nuclear energy in China in recent years. The authors of the studies (Zhang Xiaoping, Lu Dadao, Chen Mingxing, Gao Shanshan, Wu Aiping [13]) emphasise its high importance for the country and the world community, considering the international climate change agenda, the need to strengthen national energy security and increase the competitiveness of industrial production. On the basis of a comprehensive assessment of trade flows between countries associated with the operation of nuclear energy, the authors identified the competitive advantages of the industry for the existing nuclear powers. Based on the results of a comprehensive assessment of competitiveness in the nuclear power industry, the authors identified countries with the highest values of the indicator (USA, Russia, Canada, France and China), which occupy a leading position in ensuring the construction of new NPPs. In addition, the study predicts an increase in the role of the Asia-Pacific region, which in the future may become the center of nuclear energy production in the world.

The interest in the geography of nuclear energy among other scientists from far abroad does not subside. Among recent works, it can be highlighted the study of the coexistence of nuclear technology with society, and the benefits, problems and social transformations generated by this phenomenon, prepared by B. Alexis-Martin and T. Davies [14], as well as geographical studies devoted to the justification of sites for NPPs in Ghana (E. B. Agyekum, F. Amjad, F. Aslam, A. Ali [15]) and Canada (R. Almalki, J. Piwowar, J. Siemer [16]) and etc.

Belarusian researchers make their contribution to the development of modern ideas about the development of nuclear energy in the world as a whole and in Belarus in particular. It is worth noting the work of a team of authors headed by V. M. Tsilibina [17] devoted to the study of the energy efficiency of the Belarusian economy and including an analysis of the role of the Belarusian NPP (BelNPP) in raising the level of the country's socio-economic development. T. G. Zorina are being developed issues of integration of the BelNPP into the Belarusian energy system [18]. B. I. Popov's research is being carried out in the field of the formation of a comprehensive tariff policy for energy resources in the context of the commissioning of the BelNPP [19].

The methodological aspects of the study were determined by traditional approaches to the study of the global industry. On the basis of open data from international organisations in the energy sector (International Energy Agency (IEA), International Atomic Energy Agency (IAEA)) was compiled a statistical database characterising the development of nuclear energy both around the world and in the context of individual states.

A retrospective analysis of the history of nuclear energy production in the world according to the dynamics of its main indicators made it possible to periodise the development of the industry. On the basis of mapping of statistical indicators characterising the nuclear power industry in the context of the countries of the world using the *ArcGIS* software package were determined its spatial features of the location and development.

Results and discussion

Trends in the development of the electric power industry in the world and the role of nuclear energy.

The end of the 20th and the beginning of the 21st centuries were characterised by a significant increase in electricity consumption in the world (fig. 1), which was associated with the intensive development of industry in developing countries, a further increase in electricity consumption in developed countries and the gradual replacement of the use of fossil fuels by renewable electricity. During the period 1990–2020, the volume of electricity consumption in the world increased by 2.29 times (from 10.9 to 24.9 PW·h). Per capita electricity consumption over the period under review increased to a much lesser extent (by 1.56 times) from 2.06 to 2.31 MW·h per person per year, which was associated with 1.47 times increase of the world population. The highest growth rates of energy consumption were observed in the 2000s before the global financial crisis of 2008. However, in 2000–2010 the whole growth rate of energy consumption was 1.4 times.

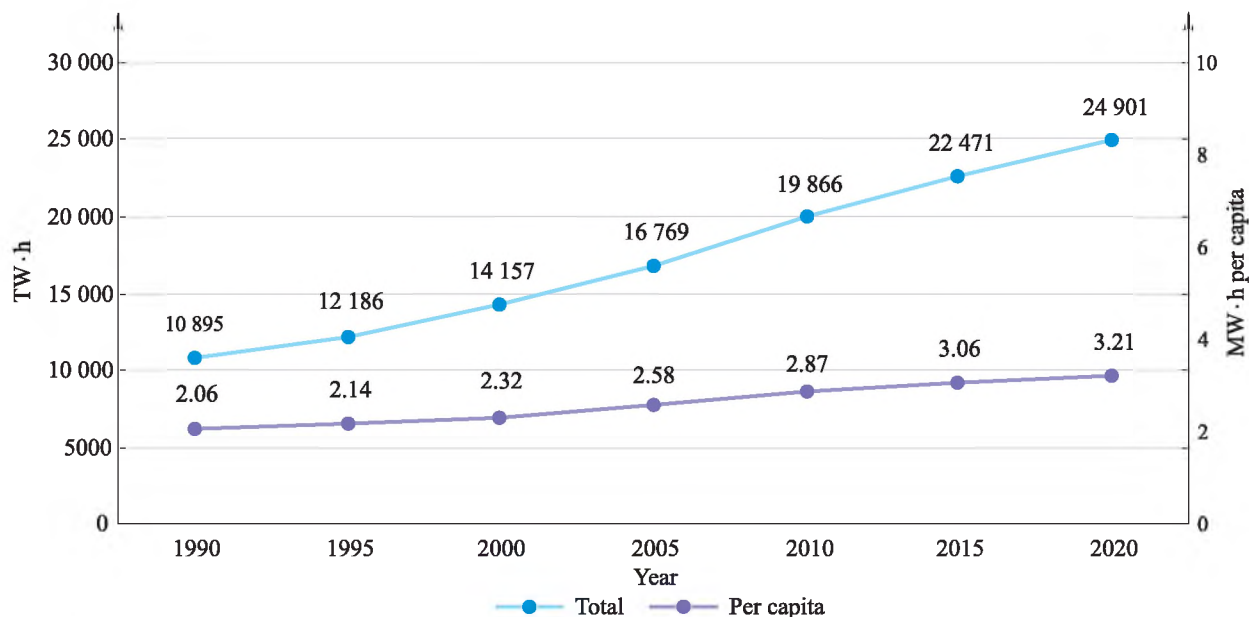


Fig. 1. Dynamics of electricity consumption in the world total (TW·h) and per capita (MW·h per capita) in 1990–2020 (compiled by the authors according to the IEA data)

The developed countries of the world had low growth rates of energy consumption in 1990–2020 (in the USA – 1.44 times, Japan – 1.17 times, Europe – 1.22 times), but developing countries at that time showed a grandiose growth (China – 12.4 times, Indonesia – 9.1 times, Turkey – 6 times, India – 5.5 times, Saudi Arabia – 5.5 times, Brazil – 2.5 times)¹.

However, as mentioned above, the level of development of the electric power industry in the countries of the world varies greatly. Among the indicators that characterise these disproportions, one can pay attention to electricity consumption per capita (fig. 2) – the most important macroeconomic indicator that demonstrates the degree to which the population is provided with electricity. The level of electricity consumption in a country depends on its availability, market demand, tariffs, breadth of electricity use and other factors.

In 2020 world average value of this indicator was 3.21 MW·h per person per year. At the forefront are such countries as Iceland, Norway, Bahrain, Qatar, Kuwait, Finland, Canada, where consumption is more than 15 MW·h per person. In addition to them, the USA, Sweden, the countries of Western Europe, Gulf states and Australia are distinguished by significant volumes of electricity consumption. The lowest indicators of electricity consumption are typical for the countries of Africa, overpopulated South Asia and individual countries of Latin America.

Another important indicator is the electricity intensity of GDP, which reflects the ratio between the consumption of electricity and the volume of the country's GDP. This indicator, along with the energy intensity of GDP, characterises the energy efficiency of the economy in the country. The value of this indicator depends on many factors, including the level of industrial development, the degree of electrification of production processes, transport infrastructure and the domestic sector, the structure of the economy, etc. In accordance with the provisions of the concept of sustainable development in order to achieve maximum energy efficiency of the economy it is necessary to maintain a balance electricity and energy conservation. Therefore, the value of the GDP electricity intensity indicator should simultaneously correspond to the possibilities of economic growth and ensure the rational use of energy resources. As practice shows in contrast to the energy intensity of GDP, high values of the electricity intensity of GDP are observed in highly developed countries and low values – in developing countries (fig. 3). This is due to the fact that electricity is a universal type of energy that can be easily and quickly transmitted over long distances, and thereby satisfy the need for timeliness, reliability and quality of the supplied energy.

The global value of this indicator in 2020 was 187 kW·h per 1000 US dollars. The highest value of this indicator is in Iceland – 971 kW·h per 1000 US dollars, Bhutan – 532, Bahrain – 441, Tajikistan – 429, Kyrgyzstan – 414 kW·h per 1000 US dollars. The lowest value is in most African countries (Sierra Leone – 9 kW·h per 1000 US dollars, Chad – 8 kW·h per 1000 US dollars), which indicates the low power supply of countries and the still weak use of electricity in production. The surplus of electricity production in a number of countries makes it possible to actively develop energy-intensive industries (for example, electric steelmaking, smelting of non-ferrous metals such as aluminum, magnesium, titanium, refining of non-ferrous metals, etc.).

¹Energy statistics data browser // International Energy Agency : website. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser> (date of access: 02.05.2023).

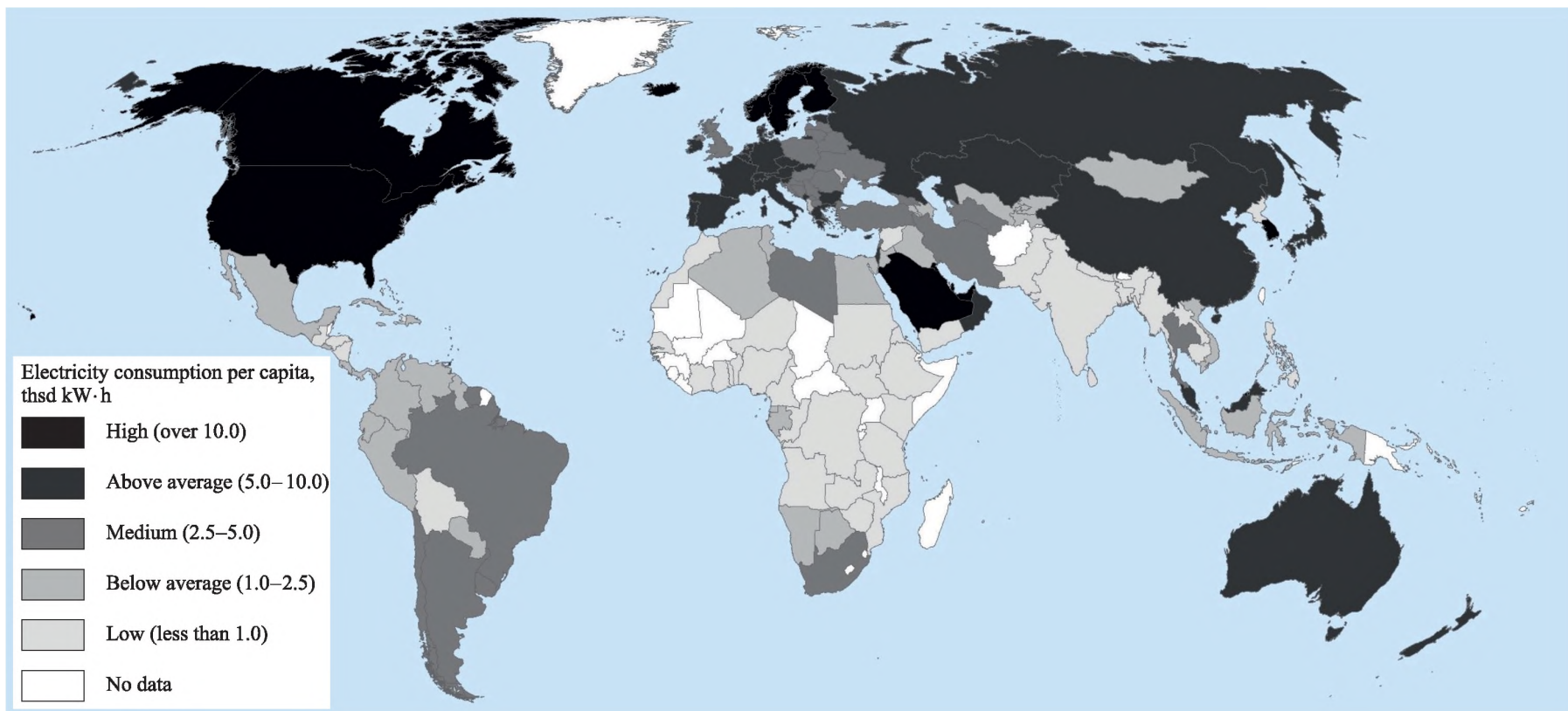
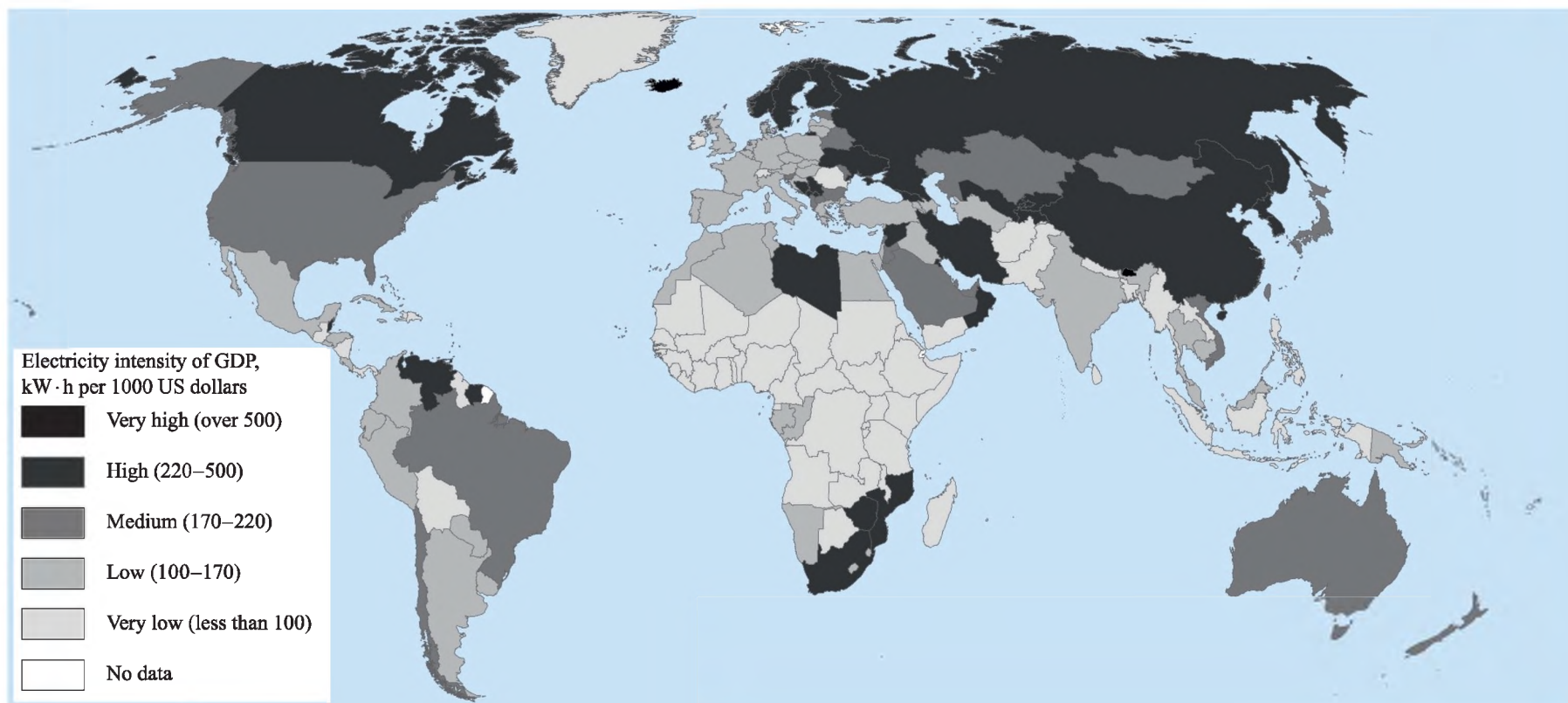


Fig. 2. Electricity consumption per capita by countries in 2020
(compiled by the authors according to the IEA data)



*Fig. 3. Electricity intensity of GDP by countries in 2020
(compiled by the authors according to the IFA data)*

Periodisation of the development of nuclear energy in the world. Nuclear power, which has been developed since the beginning of the second half of the 20th century, is currently one of the most important subsector of the world energy.

The «atomisation» of the world's electric power industry took place gradually, since only a limited number of countries in the world possessed the necessary technologies and their growth was rather slow. The maximum growth rates of nuclear energy were observed in the 1970s and the first half of the 1980s. After major nuclear accidents at the NPP «Three Mile Island» (1979), Chernobyl NPP (1986) and NPP «Fukushima-1» (2011), the development of nuclear energy was drastically slowed down. But in recent years the nuclear industry has gradually begun to recover, which manifested both in the construction of new facilities and in the expansion of its geographical representation.

A retrospective analysis of the development of nuclear energy in the world allows us to periodise its development, highlighting the following stages:

- pioneering development of nuclear energy (first-built reactors) (1954–1961);
- widespread use of nuclear energy (1962–1970);
- mass development and intensification of nuclear energy (1971–1985);
- deceleration of the development and curtailment of nuclear energy (1986–2008);
- limited renovation of the nuclear power industry (2009 – present).

During the period of pioneering development of nuclear energy (1954–1961), 19 nuclear reactors were put into operation (on the average of 2.5 reactor plants per year). Only Russia (USSR), the USA, United Kingdom and France possessed the technologies for creating nuclear reactors (fig. 4), which limited the geography of the distribution of NPPs [20]. The average capacity of the commissioned power units was less than 100 MW.

At the stage of widespread use of nuclear energy (1962–1970), 75 reactors were launched (on the average of 8.5 reactors per year). The average capacity of the introduced power units amounted to just over 200 MW. In 1970 NPPs operated in 15 states [20].

During the period of mass development and intensification of the industry (1971–1985), a total of 334 nuclear reactors were commissioned (on the average of almost 21 reactors per year). At that time the energy crisis contributed to the intensification of the construction of NPPs, which led to an increase in the prices of fossil fuels [20]. The number of countries operating nuclear reactors has grown to 26, and the average unit capacity of power units commissioned has approached 1000 MW. During this period (in 1979), the first major accident in the nuclear industry occurred at the NPP «Three Mile Island» in the USA, which slightly slowed down the development of the industry (in 1979 only 8 reactor plants were put into operation).

The turning point in the development of nuclear energy in the world was the nuclear disaster at the Chernobyl NPP (1986) in the USSR, after which the construction of new power units in the world was almost completely curtailed for a certain time. At first, only power units were put into operation, which were in a fairly high degree of construction readiness, but at the same time, the construction of a number of power units was completely frozen.

The period that began after the tragedy at the Chernobyl NPP can be described as the stage of deceleration of the development and curtailment of nuclear energy (1986–2008). If in 1984 and 1985 34 nuclear reactors were put into operation, then already in 1986 – 23 reactors, and in 1991 – only 4 reactors [20]. The end of the period can be called 2008, when for the first time in the history of nuclear energy in the world not a single nuclear reactor was launched at NPPs. Although the intensification of the construction of NPPs began in 2007, and in subsequent years the number of nuclear reactors under construction has steadily grown (in 2010, the construction of 16 nuclear reactors was laid down).

The curtailment of the mass commissioning of new nuclear reactors is also associated with the cyclical development of the industry, which is called the «anti-nuclear trend» [11]. Its essence lies in the periodic reduction in the commissioning of nuclear energy capacities, which occurs due to the freezing of previously adopted programmes for the development of nuclear energy against the backdrop of major nuclear accidents. Against this background, many developed countries make decisions to terminate the operation of existing NPPs or refuse to build new ones (for example, Japan, Germany, Italy, Switzerland). At the same time, there is a group of countries that abandon plans for the further development of nuclear energy, subject to the tightening of safety parameters for the operation of NPPs.

The current stage of the limited renovation of the nuclear power industry (2009 – present) is characterised by an increasing interest in nuclear power generation not in traditional «nuclear» countries, but in countries that have not previously used the possibilities of generating electricity at NPPs. The number of countries in which NPPs are operating or being built has increased to 38 units. The annual commissioning of nuclear reactors has practically reached the value of 6 units per year. As of 2021, 56 reactors with a total capacity of 58.1 GW were under construction. Safer pressurised water reactors have appeared (for example, the Russian NPP-2006 project of generation 3+) with a nominal unit power of 1200–1400 MW and with the potential to increase up to 1600 MW.

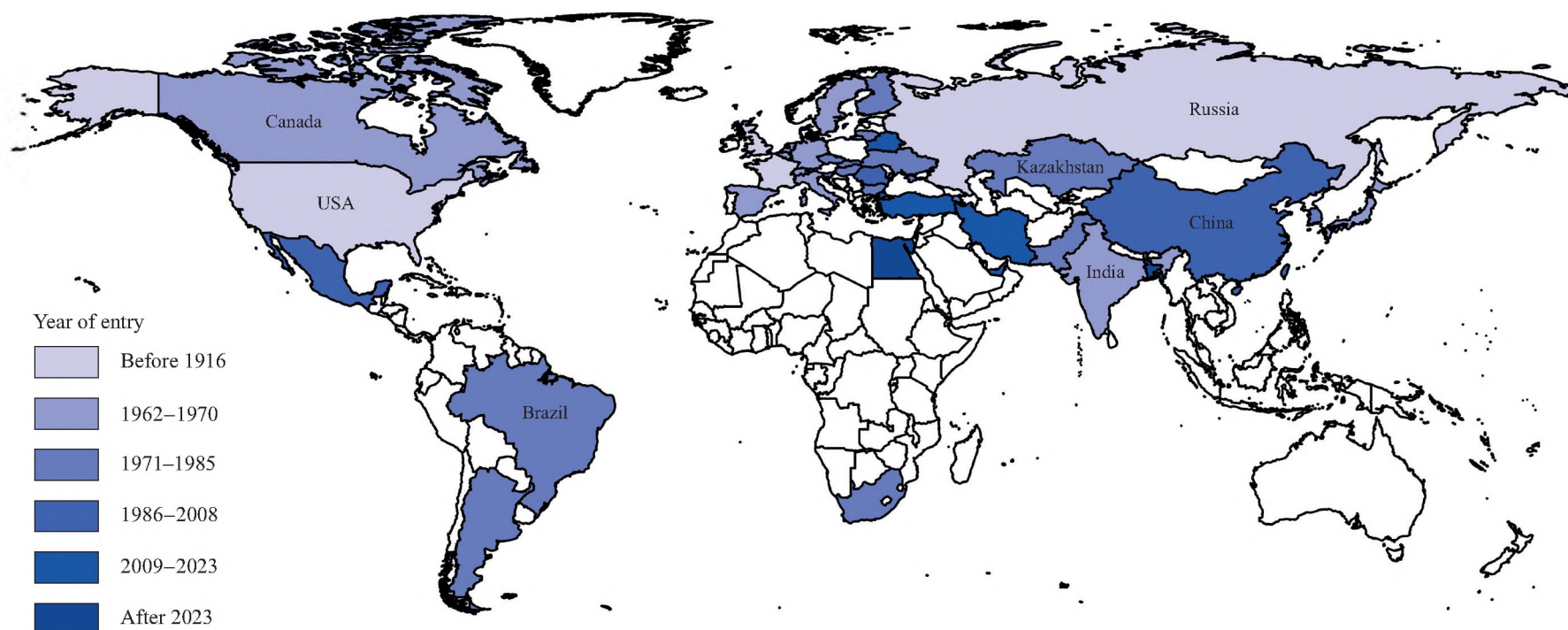


Fig. 4. Periods for countries to become nuclear power producers
(compiled by the authors according to the IAEA² data)

²Country nuclear power profiles // International Atomic Energy Agency : website. URL: <https://cnpp.iaea.org/pages/index.htm> (date of access: 03.05.2023)

Development trends and spatial features of nuclear power production in the modern world. Despite the anti-nuclear public opinion, the production of electricity at NPPs in the world grew until 2007 inclusive. However, the global financial crisis of 2008 and then the accident at the NPP «Fukushima-1», led to a reduction in the production of nuclear electricity. This was due, among other things, to the shutdown of NPPs in Japan and some EU countries. Nuclear generation in 2020 accounts for 2674 TW·h, which is the fourth position in the global electricity balance after coal, natural gas and hydroelectric power plants (fig. 5).

The maximum share of nuclear generation in the global electrical balance was observed in the middle of 1990s – 17.5 %, after which it began to decline and in 2020 amounted to only 10.0 % of global electricity production.

However, despite the decline in the share of electricity generation in the world, nuclear power in the structure of world energy supply currently retains its significant role. This is due to the fact that nuclear energy is a unique technology that, despite existing risks, is able to provide a reliable, relatively inexpensive and environmentally responsible energy supply that is consistent with the leading concepts and strategies of global and national socio-economic development. Among such concepts stand out the concept of sustainable development, the concept of «green square», the concept of low-carbon economy, the concept of green economy, etc., which are interconnected with each other. They are based on key components that are influenced by the development of nuclear energy: the socio-economic sphere, energy, ecology and technology development. Nuclear energy provides enterprises with relatively cheap electricity and solves the acute issue of reducing greenhouse gas emissions into the atmosphere, which is why it is increasingly becoming the basis for the stability of energy markets, and hence the entire country's industry. The low share of the fuel component in the cost of nuclear generation, about 10–15 %, allows the consumer to predict prices for the entire life cycle, which is almost 100 years.

In addition to macroeconomic effects from the development of nuclear energy, a positive impact is also observed for the region where it is located in the form of accelerating the pace of socio-economic development. Nuclear energy is a possible solution to the energy problem, because nuclear fuel has a huge energy intensity: 1 kg of uranium enriched to 4 %, with complete burnup, releases energy equivalent to burning about 100 t of high-quality coal or 60 t of oil [21]. There is also the possibility of reusing nuclear fuel. However, the uranium market is very specific and deserves separate consideration.

The nuclear fuel market has significant differences from the organic fuel market. It includes not only the extraction and transportation of raw materials to the place of consumption, but consists of a whole chain of sequentially repeating processes that make up the nuclear fuel cycle. It includes uranium mining, purification from impurities, enrichment, production of nuclear fuel and production of electricity based on it, soaking, long-term storage, processing and disposal of spent nuclear fuel.

The raw material basis of nuclear fuel is natural uranium. According to the data of World Nuclear Association, the world reserves of uranium in 2020 amounted to 6147.8 thsd t. They are characterised by uneven distribution. More than half (56.4 %) of all reserves are located in four countries: Australia (26.2 %), Kazakhstan (14.0 %), Canada (8.7 %) and Russia (7.5 %). Namibia (7.3 %), South Africa (5.2 %), Brazil (4.5 %), Niger (4.5 %) and China (4.0 %) also have large uranium reserves.

Uranium mining in the world has an unstable dynamic, which is associated with the cyclical development of nuclear energy and the instability of prices on the world market for this resource. In 1990, 42.0 thsd t of uranium ores were mined, but subsequently, until 2007, uranium mining was practically in the range of 30–40 thsd t per year. After that, a gradual increase in production began, the peak of which fell on 2016 (62.2 thsd t) and was associated with a decrease in prices for uranium raw materials. However, starting from 2017, uranium prices began to grow, therefore, subsequently, its production decreased significantly (by 1.3 times) and in 2020 amounted to 47.7 thsd t³.

The main «players» in the uranium market are the countries in whose territory its main reserves are concentrated. The list of leading countries in uranium mining has been reshuffled (previously the United States, South Africa, Canada, France, Gabon were in the leading positions), and the geography of production has also expanded. In 2020, Kazakhstan ranked first in the world in terms of uranium production (annual production volume is 19.5 thsd t). It is followed by Australia (6.2 thsd t), Namibia (5.4 thsd t), Canada (3.9 thsd t), Uzbekistan (3.5 thsd t), Niger (3.0 thsd t), Russia (2.9 thsd t), China (1.9 thsd t).

The largest uranium mining companies in the world are «Kazatomprom» (Kazakhstan, 10.7 thsd t), «Orano» (France, 4.5 thsd t), «Uranium One» (Russia, 4.3 thsd t), «CGN» (China, 3.7 thsd t), «Navoi Mining» (Uzbekistan, 3.5 thsd t), «CNNC» (China, 3.3 thsd t), «BHP» (Australia, 3.3 thsd t), «Cameco» (Canada, 3.0 thsd t), «ARMZ» (Russia, 2.8 thsd t).

³World mineral statistics data [Electronic resource] // British Geological Survey : website. URL: <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/wms.cfc?method=searchWMS> (date of access: 28.02.2023).

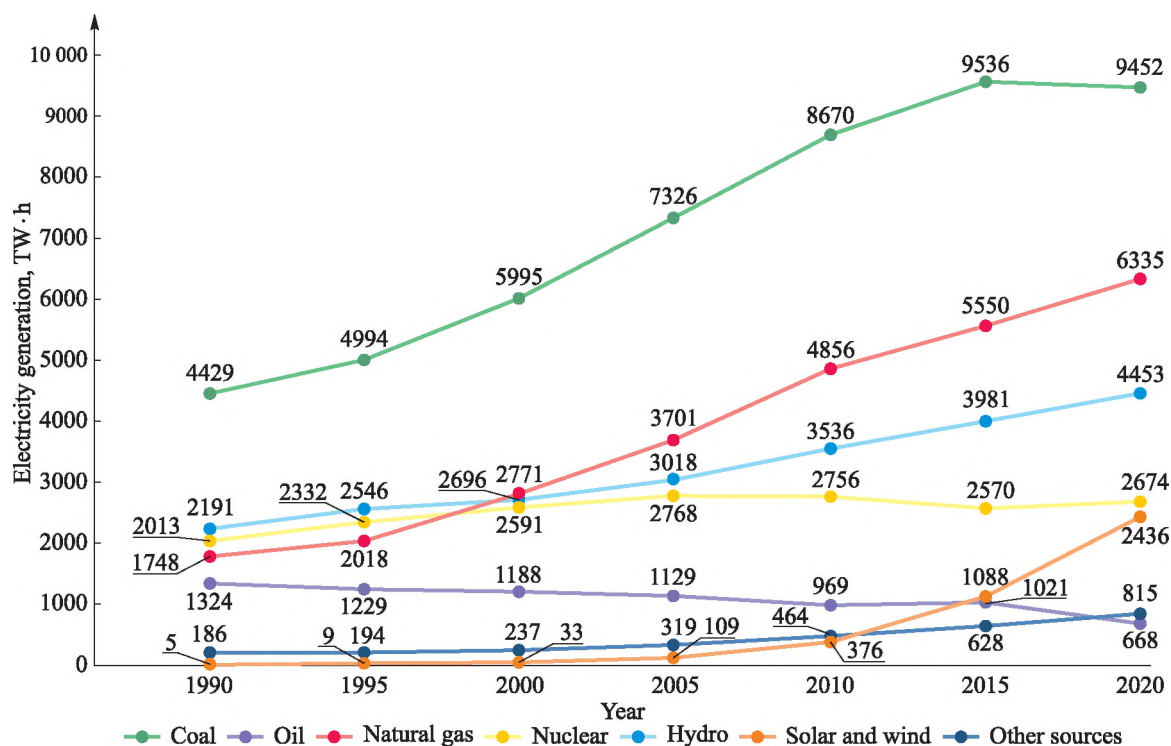


Fig. 5. Electricity generation by source in 1990–2020
(compiled by the authors according to the IEA data)

The development of the world natural uranium market is due to several fundamental factors. First, the increase in demand for uranium is associated with the restart of Japanese NPPs, as well as the commissioning of new power units in China, India, the Republic of Korea and other countries where there is no infrastructure component of the uranium raw material base. Secondly, the decline in uranium supply is due to the intensive development of existing deposits and the cost of developing new ones. Thirdly, there is a reduction in the involvement of secondary sources of uranium as the most liquid part of them is used. Fourth, there is an increase in long-term contracting. In addition, given the prospects for the commissioning of new nuclear power facilities until 2025, there is a need to develop new deposits with a higher cost, which will lead to a further increase in uranium prices [22].

The market for the production of direct nuclear fuel is segmented, which is due to the manufacture of nuclear fuel for specific types of reactors in accordance with standards. A limited number of companies are represented here, the largest of which are manufacturers of rods for «light water» reactors: «TVEL» (Russia), «Westinghouse» (USA), «Framatome-FBFC» (France); manufacturers of rods for «heavy water» reactors – «Cameco and GNF-Canada» (Canada), «DAE Nuclear Fuel Complex» (India). This situation characterises the high monopolisation of the nuclear fuel market.

In addition to the monopolisation of the nuclear fuel market, the limited number of countries possessing technologies for the development and construction of nuclear power units is indicative. This largely determines the geopolitical factor in relation to the cooperation of countries in the development of nuclear energy, which can be seen in the fig. 6. Traditional allies help their partners develop nuclear energy, and also get the opportunity to earn money on construction (capital investments in the construction of NPPs are among the highest in the energy industry) and create a positive international image for themselves. In relation to the availability of technologies and capabilities for the production of nuclear reactors and the construction of NPPs, the countries of the world can be divided into three groups:

- exporting countries of technologies in nuclear power engineering (France, Germany, Russia, USA, Republic of Korea). This group of countries is both the developer of their own nuclear reactors with the corresponding industrial facilities, and also exports their own nuclear technologies for the construction of NPPs abroad;
- self-sufficient countries (Canada, China, India, Japan, Sweden, United Kingdom). This group of countries are developers and manufacturers of their own nuclear reactors, but they have not exported their own nuclear technologies;
- importing countries of nuclear technologies (Turkey, Egypt, Brazil, etc.). This group of countries is represented by new members of the «club» of nuclear powers. They do not have NPP construction technologies and import them from the countries of the first group.

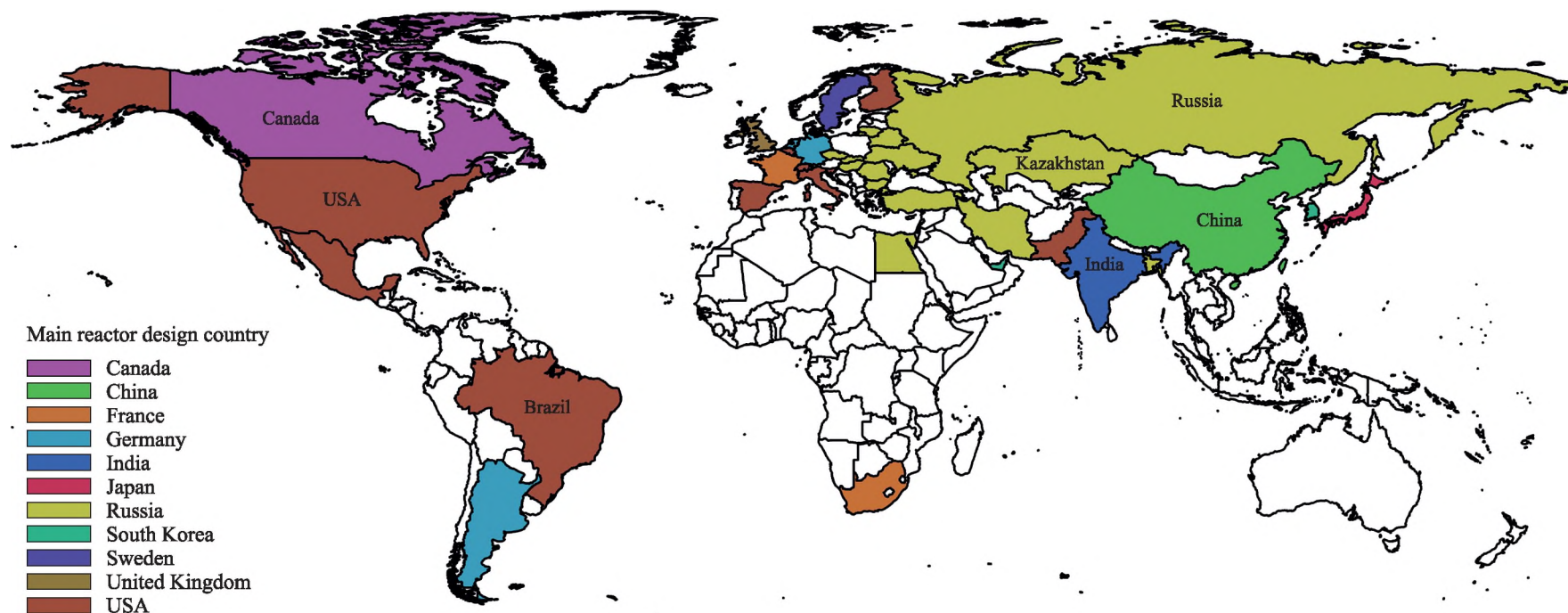


Fig. 6. Geographical pattern of the distribution of states with NPPs, depending on the dominant origin of reactor facilities
(compiled by the authors according to the IAEA data)

The spread of nuclear energy in the macroregions of the world is uneven, which is associated with the availability of energy resources, technological development, growing demand for electricity and other factors. In the regional structure of electricity generation (fig. 7), the largest share of nuclear energy is observed in Europe (21.6 %), which is associated with the intensive development of the industry in past periods against the background of a shortage of its own fossil fuel resources. In addition, a high share of electricity generation is typical for North America (17.9 %) and the CIS countries (15.6 %). In other regions, the share of nuclear generation remains significantly below the global average.

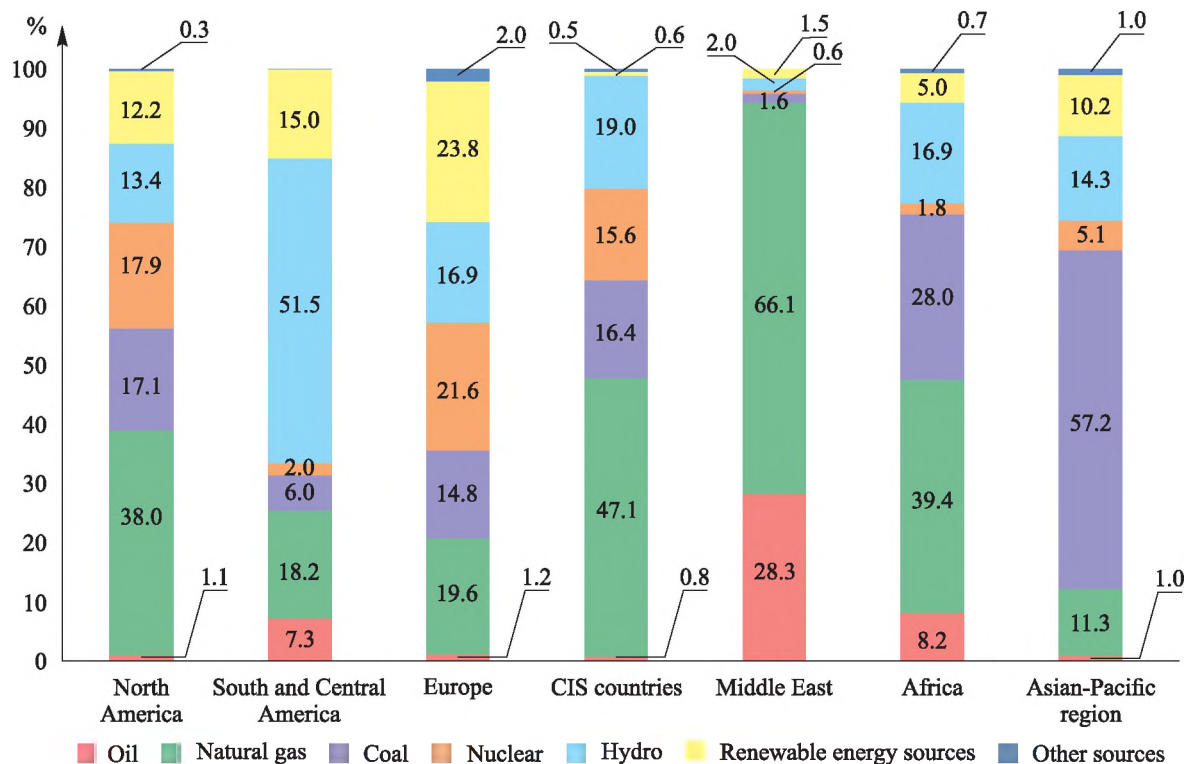


Fig. 7. Electricity generation by source in regions in 2020
(compiled by the authors according to the IEA data)

According to the dynamics of NPP development in macroregions they can be divided into three groups. The regions with the stabilisation of the development of nuclear energy include North America, where after the 2000s electricity production stabilised at 935 bln kW·h. The regions with a decrease in energy generation at NPPs include Europe, where for the period from 2004 (the maximum generation was recorded – 1122.7 bln kW·h) to 2020, there was a drop of 25.4 %. The remaining regions form the third group – with the growth of electricity production at NPPs (Africa, South and Central America, the Middle East, a group of CIS countries and the Asia-Pacific region).

At the country level the largest producers of nuclear energy in the world are the USA, China, France, Russia and the Republic of Korea (fig. 8). The first three countries account for more than half of all nuclear power generation, the first five – about 70 %, the first ten – about 85 %. This indicates a high level of concentration of nuclear power generation, but at the same time, the number of countries with NPPs has increased compared to 1990 from 28 to 33 units.

In total up to the beginning of 2021 there are 442 functioning nuclear reactors in the world (fig. 9). The USA has the largest fleet of nuclear reactors (93 units), followed by France (56 units), China (50 units), Russia (38 units), Japan (33 units). The vast majority of NPPs are located in the Northern Hemisphere and are concentrated mainly in developed countries. At the same time, it is worth noting the intensive development of nuclear energy in the states with which the prospects of this industry are associated – China, India and the Republic of Korea. In the Southern Hemisphere, NPPs operate only in Argentina, Brazil and South Africa. The only macroregion of the world where there is no nuclear power is Australia and Oceania.

Among all countries operating NPPs, only in nine of them, nuclear energy is the dominant energy source in the production of electrical energy (fig. 9): France (66.7 %), Slovakia (53.4 %), Ukraine (52.8 %), Hungary (46.0 %), Bulgaria (40.8 %), Belgium (38.7 %), Czech Republic (37.4 %), Slovenia (37.0 %), Fin-

land (33.9 %), Sweden (30.0 %). The share of NPPs in the electricity balance of countries is shown in fig. 9. Among the nuclear power countries, China stands out. Its peculiarity lies in the fact that a huge NPP capacity (47.5 GW) is concentrated here, and the country is in second place in the world in terms of nuclear energy generation. However, the share of NPPs in the structure of electricity generation is insignificant and amounts to only 4.9 %.

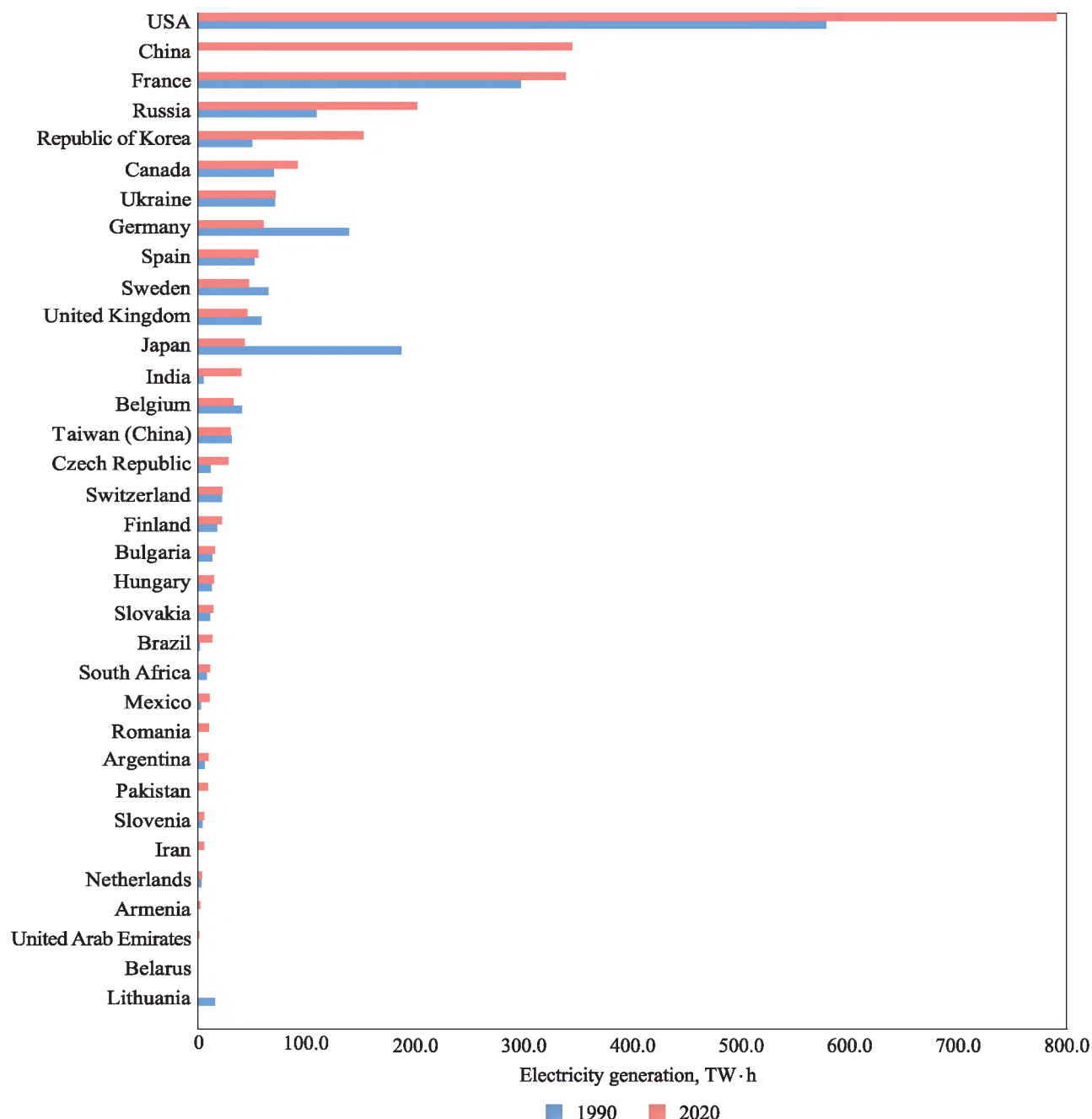


Fig. 8. Electricity generation at NPPs by countries in 1990 and 2020
(compiled by the authors according to the IAEA data)

Trends reflecting the dynamics of the role of nuclear energy in the countries of the world are shown in fig. 10. This map shows that in the highly developed countries of Western Europe, Japan, Sweden and Lithuania, there is a tendency to reduce electricity generation and the share of NPPs in the energy production structure. These trends are due to the refusal to use the nuclear industry in energy production and the transition to alternative energy sources (wind farms, solar power plants, etc.). In the South Africa, there is a slight decrease in electricity generation and the share of nuclear energy in total electricity generation, this is due to the modernisation of 2 nuclear reactors at the only NPP «Koeberg» in order to extend its operation life until 2050.

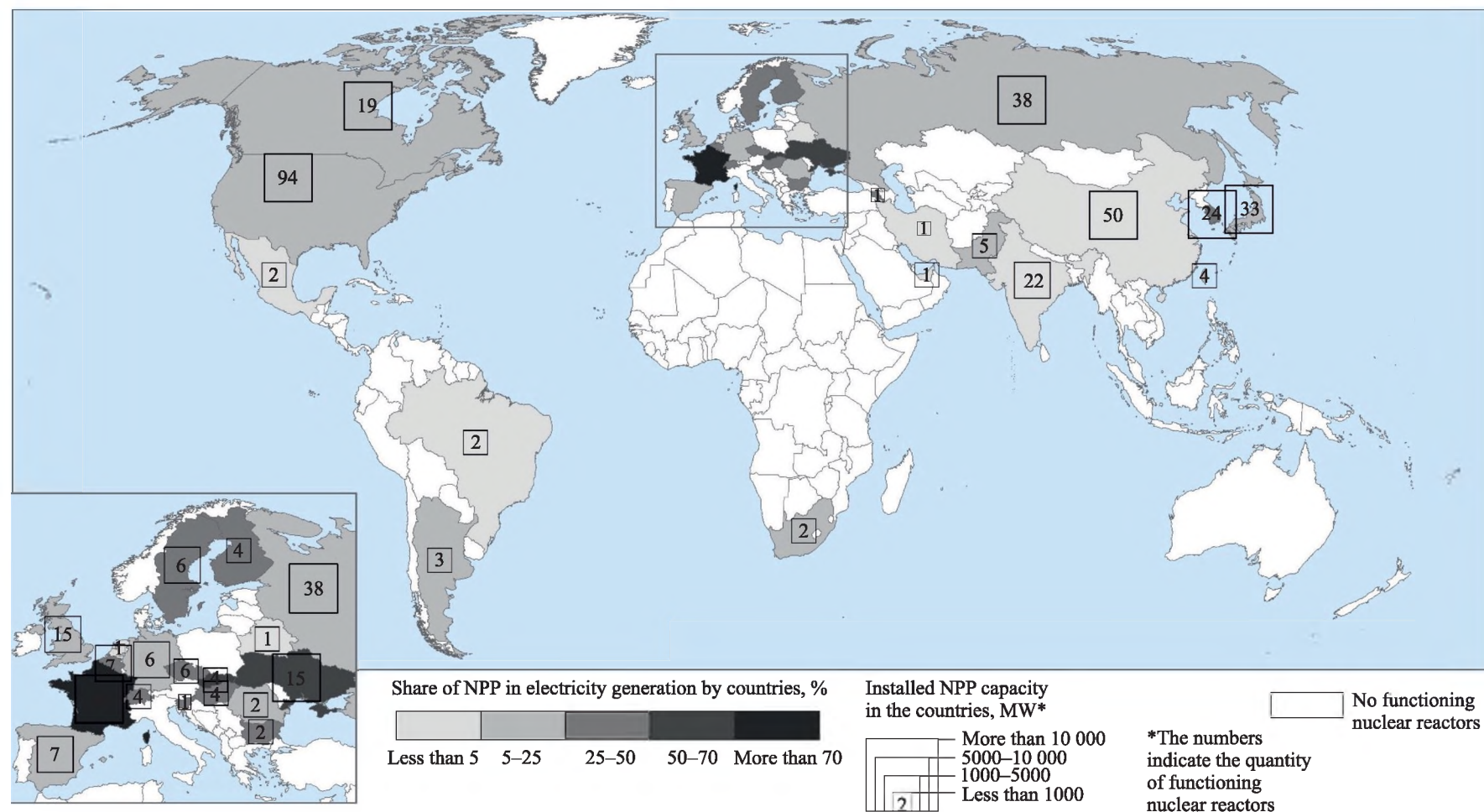


Fig. 9. Nuclear power development indicators by countries in 2020
(compiled by the authors according to the IAEA data)

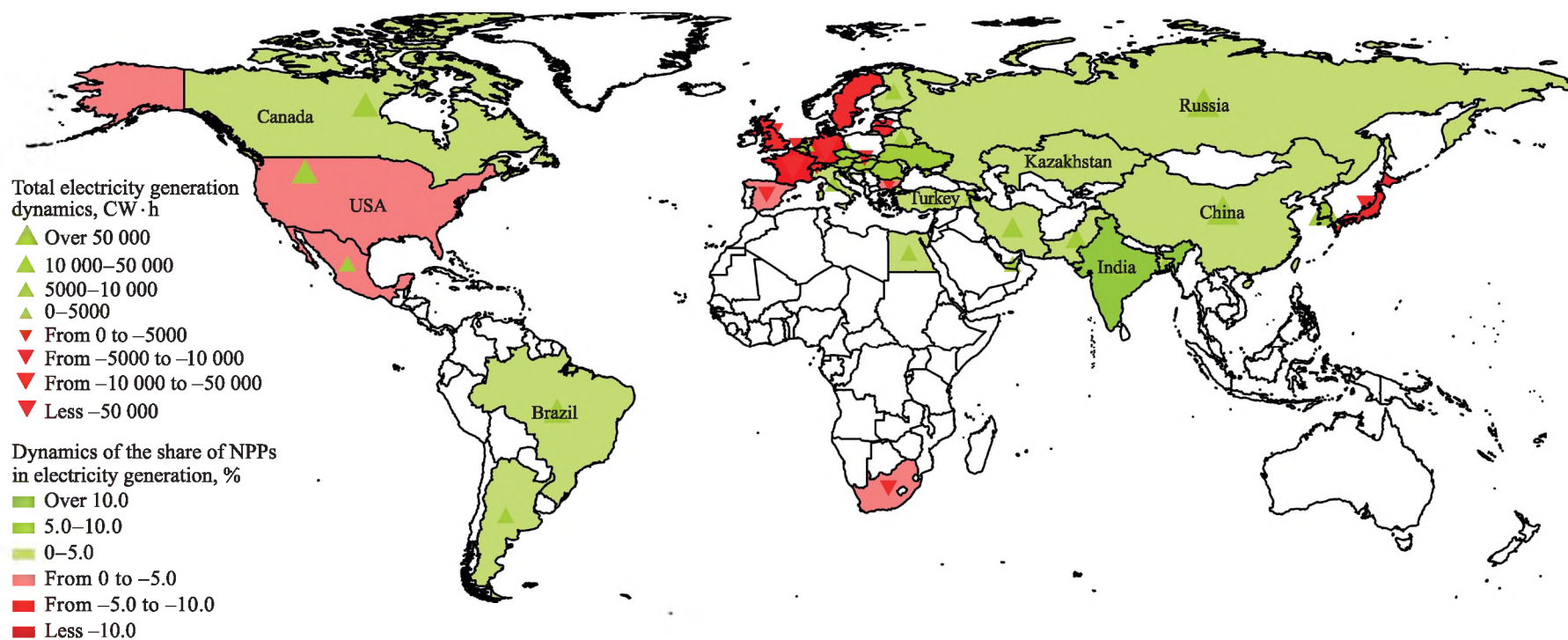


Fig. 10. Dynamics of nuclear power generation by countries in 2000–2020
(compiled by the authors according to the IAEA data)

Separately, it is worth highlighting a group of countries, including the USA, the Republic of Korea and Mexico, where there is a tendency to increase electricity generation, but at the same time, there is a decrease in the share of NPPs in the structure of its production, which is associated with a more significant increase in electricity generation from other sources.

In the third group of countries, there is a general trend towards an increase in electricity generation and the share of NPPs in the energy production structure. It is especially worth noting such countries as the China, Russia and India, where high rates of development of nuclear energy are observed.

The largest NPP in the world in terms of installed capacity according to IAEA data is «Kashiwazaki-Kariva» (Japan). It includes 7 reactors with a total capacity of 7965 MW, but after Fukushima disaster they are operational suspended. In second place is the South Korean NPP «Kori», which also consists of 7 reactors with a total capacity of 489 MW. It is the largest operating NPP in the world. In third place is Bruce NPP (Canada). The capacity of its 8 reactors is 6358 MW. The largest NPP in the post-Soviet space is the Zaporozhye NPP (Ukraine), which is currently temporarily stopped. It consists of 6 nuclear reactors with a total capacity of 5700 MW. The most powerful NPP in Russia is Leningrad – 4 nuclear reactors with a total capacity of 4017 MW.

At present, there is a certain kind of renaissance of nuclear energy. In 2020, 5 nuclear power units with a total capacity of 5521 MW were connected to the power grid, including the first power unit of the Belarusian NPP, construction of new power units began in China (3 units) and Turkey (1 unit). Currently, the largest number of nuclear reactors under construction is characteristic of China (18 units), India (7 units), Turkey (4 units). Three reactors are being built in the Russia, the Republic of Korea, and the United Arab Emirates. However, the depletion of hydrocarbon resources, the need to green the energy sector and the economic efficiency of NPPs (faster payback compared to thermal power plants) lead to an appeal to the development of nuclear energy. So, even after the accident at a NPP in Japan, a number of developed countries (USA, United Kingdom, France, Sweden), countries of Eastern Europe (Bulgaria, Hungary, Poland, Czech Republic), CIS countries (Armenia, Belarus, Kazakhstan, Ukraine), Asian countries (Bangladesh, Vietnam, Indonesia, India, Iran, China, the Republic of Korea, Taiwan, Turkey) confirmed their plans for the development of nuclear power, albeit with the condition of tightening the parameters for ensuring safe operation. In many of these countries, NPPs are being built, expanded or will be built. The largest program for the development of nuclear energy belongs to China, and India, Russia, the Republic of Korea, and others also have significant plans for nuclear energy.

Since 2020 Belarus has been among the atomic powers. The country attaches great importance to the development of nuclear energy, which should increase the energy security of the national economy. The installed capacity of the BelNPP, located in the northern part of the Grodno region near the town of Ostrovets and consisting of two power units, is 2400 MW. After the launch of the second power unit at maximum capacity, it is predicted that about 40 % of the electricity in the country will be generated at the expense of NPP. This will replace about 4.5 bln m³ of natural gas and reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere, which should bring both economic and environmental benefits not only for Belarus, but for the entire European region.

Conclusions

Thus, nuclear energy has established itself as a steadily developing industry that has firmly taken its place in the global electricity production. The modern image of nuclear energy is formed mainly by developed countries, followed by rapidly developing economies of the world (China, India, Republic of Korea). The Russia is emerging as a world leader in the export of nuclear technology and the construction of NPPs outside its territory.

The dynamics of the development of the world nuclear power industry is subject to cyclicity, like many other economic processes. However, the cause of crises in the industry, unlike other areas of the economy, are man-made disasters – accidents at NPPs that violate the global ecological balance and threaten the existence of the world community. This provokes a revision of national energy policies and adjustment of programs and plans for the development of the energy industry.

At the present stage, three trends can be distinguished in the prospects for the development of nuclear energy in countries:

- reducing the development of nuclear energy mainly in developed countries;
- continued development of nuclear energy in developed countries that are leaders in nuclear energy and possess nuclear technologies, and developing countries that are advanced in terms of economic growth;
- the emergence of new players, mainly among developing economies, seeking to ensure their energy security through nuclear energy.

In the future, the ratio of these trends will determine the level of development of the world nuclear energy.

Библиографические ссылки

1. Модникова СЮ. Мировая атомная энергетика: обзор текущего состояния и перспектив развития отрасли. *Инновации и инвестиции*. 2015;12:46–49. EDN: WITCGH.
2. Шорохова ЕО. Обзор развития атомной энергетики в регионах мира. *Инновации и инвестиции*. 2016;1:58–61. EDN: WHTJST.
3. Жучкова ТА. Развитие атомной энергетики в мире. *Инновации и инвестиции*. 2018;10:122–125. EDN: QNSPTJ.
4. Алабян СС, Рогов ВВ. Международная специализация России на мировом рынке оборудования для атомных электростанций. *Российский внешнеэкономический вестник*. 2010;8:48–55. EDN: PBWHTF.
5. Жизнин СЗ, Тимохов ВМ. Геополитические и экономические аспекты развития ядерной энергетики. *Вестник МГИМО-университета*. 2015;4:64–73. DOI: 10.24833/2071-8160-2015-4-43-64-73.
6. Жизнин СЗ, Тимохов ВМ. Экономические аспекты развития ядерно-водородной энергетики в мире и в России. *Альтернативная энергетика и экология (ISJAE)*. 2020;1–6:40–59. EDN: SSIUVS.
7. Романов МИ. Международная конкурентоспособность атомной энергетики России. *Инновации и инвестиции*. 2020;11:85–90. EDN: QVXXNG.
8. Ивантер ВВ, Семикашев ВВ. Роль атомной промышленности в экономике страны и стоящие перед ней вызовы. *Энергетическая политика*. 2017;3:3–11. EDN: ZREKNZ.
9. Секачева АБ. Тенденции, особенности и проблемы развития атомной энергетики Франции. *Мир новой экономики*. 2021;15(3):85–96. DOI: 10.26794/2220-6469-2021-15-3-85-96.
10. Петушкова ВВ. Атомная энергетика КНР в свете глобальных экологических проблем. *Экономические и социальные проблемы России*. 2021;1:106–124. DOI: 10.31249/espr/2021.01.06.
11. Логинов ЕЛ. Атомный энергопромышленный комплекс в мировой энергетике: стратегические тренды в посткризисный период. *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2012;8(28):2–10. EDN: PAOBYF.
12. Нигматуллин БИ. Атомная энергетика в мире. Состояние и прогноз до 2050 года. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2019;25(4):6–22. DOI: 10.18721/JEST.25401.
13. Zhang Xiaoping, Lu Dadao, Chen Mingxing, Gao Shanshan, Wu Aiping. Comprehensive analysis of world geography of nuclear power industry. *Geographical Research*. 2021;40(3):673–688. Chinese. DOI: 10.11821/dlyj020200746.
14. Alexis-Martin B, Davies T. Towards nuclear geography: zones, bodies, and communities. *Geography Compass*. 2017;11(9):e12325. DOI: 10.1111/gec3.12325.
15. Agyekum EB, Amjad F, Aslam F, Ali A. Application of weighted linear combination approach in a geographical information system environment for nuclear power plant site selection: the case of Ghana. *Annals of Nuclear Energy*. 2021;162:108491. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108491.
16. Almalki R, Piwowar J, Siemer J. Geographical considerations in site selection for small modular reactors in Saskatchewan. *Geosciences*. 2019;9(9):402. DOI: 10.3390/geosciences9090402.
17. Цилибина ВМ, Трубицына ЕВ, Бурима ЛЯ, Жигальская ЛЮ. Экономические инструменты увеличения электропотребления с учетом ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС. *Экономика. Бизнес. Финансы*. 2019;5:31–36.
18. Зорина ТГ. Интеграция Белорусской АЭС в энергосистему: влияние на национальную безопасность и экономическое развитие. *Экономика и управление*. 2015;4:17–28.
19. Попов БИ. Сравнительная оценка себестоимости электроэнергии Белорусской АЭС. *Энергетическая стратегия*. 2016;5:17–21.
20. Char NL, Csik BJ. Nuclear power development: history and outlook. *IAEA Bulletin*. 1987;3:19–25.
21. Ананьева АГ, Онький БН, Бородин АО. Роль ядерной энергетики в современном мире. Безопасность и стоимость. *ЮНИДО в России*. 2011;4:59–63.
22. Осецкая ММ, Украинцев ВФ. Текущие тенденции на мировом рынке ядерной энергетики. *Пространственная экономика*. 2018;1:154–169. DOI: 10.14530/se.2018.1.154-169.

References

1. Modnikova SJu. [World nuclear energy: overview of the current state and prospects for the development of the industry]. *Innovatsii i investitsii*. 2015;12:46–49. Russian. EDN: WITCGH.
2. Shorohova EO. [Overview of the development of nuclear energy in the regions of the world]. *Innovatsii i investitsii*. 2016;1:58–61. Russian. EDN: WHTJST.
3. Zhuchkova TA. [Development of nuclear energy in the world]. *Innovatsii i investitsii*. 2018;10:122–125. Russian. EDN: QNSPTJ.
4. Alabyan SS, Rogov VV. [International specialisation of Russia in the world market of equipment for nuclear power plants]. *Rossiiskii vneshneekonomicheskii vestnik*. 2010;8:48–55. Russian. EDN: PBWHTF.
5. Zhiznin SZ, Timokhov VM. Geopolitical and economic aspects of nuclear energy. *MGIMO Review of International Relations*. 2015;4:64–73. Russian. DOI: 10.24833/2071-8160-2015-4-43-64-73.
6. Zhiznin SZ, Timokhov VM. [Economic aspects of nuclear and hydrogen energy development in the world and Russia]. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2020;1–6:40–59. Russian. EDN: SSIUVS.
7. Romanov MI. International competitiveness of nuclear industry of Russia. *Innovatsii i investitsii*. 2020;11:85–90. Russian. EDN: QVXXNG.
8. Ivanter VV, Semikashev VV. Nuclear industry role in national economy and challenges it faces. *Energeticheskaya politika*. 2017;3:3–11. Russian. EDN: ZREKNZ.
9. Sekacheva AB. Trends, features and problems of the development of nuclear energy in France. *The World of New Economy*. 2021;15(3):85–96. Russian. DOI: 10.26794/2220-6469-2021-15-3-85-96.
10. Petushkova VV. China's nuclear power production in light of global environmental problems. *Ekonomicheskie i sotsial'nye problemy Rossii*. 2021;1:106–124. Russian. DOI: 10.31249/espr/2021.01.06.
11. Loginov EL. [Nuclear power industry complex in the global energy sector: strategic trends in the post-crisis period]. *National Interests: Priorities and Security*. 2012;8(28):2–10. Russian. EDN: PAOBYF.

12. Nigmatulin BI. Nuclear industry in the world. State and forecast up to 2050. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2019;25(4):6–22. Russian. DOI: 10.18721/JEST.25401.
13. Zhang Xiaoping, Lu Dadao, Chen Mingxing, Gao Shanshan, Wu Aiping. Comprehensive analysis of world geography of nuclear power industry. *Geographical Research*. 2021;40(3):673–688. Chinese. DOI: 10.11821/dlyj020200746.
14. Alexis-Martin B, Davies T. Towards nuclear geography: zones, bodies, and communities. *Geography Compass*. 2017;11(9):e12325. DOI: 10.1111/gec3.12325.
15. Agyekum EB, Amjad F, Aslam F, Ali A. Application of weighted linear combination approach in a geographical information system environment for nuclear power plant site selection: the case of Ghana. *Annals of Nuclear Energy*. 2021;162:108491. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108491.
16. Almalki R, Piwowar J, Siemer J. Geographical considerations in site selection for small modular reactors in Saskatchewan. *Geosciences*. 2019;9(9):402. DOI: 10.3390/geosciences9090402.
17. Tsilibina VM, Trubitsyna EV, Burima LYa, Zhigal'skaya LO. [Economic tools for increasing electricity consumption considering the commissioning of the Belarusian NPP]. *Ekonomika. Biznes. Finansy*. 2019;5:31–36. Russian.
18. Zorina TG. [Integration of the Belarusian NPP into the energy system: impact on national security and economic development]. *Ekonomika i upravlenie*. 2015;4:17–28. Russian.
19. Popov BI. [Comparative assessment of the cost of electricity of the Belarusian NPP]. *Energeticheskaya strategiya*. 2016;5:17–21. Russian.
20. Char NL, Csik BJ. Nuclear power development: history and outlook. *IAEA Bulletin*. 1987;3:19–25.
21. Anan'eva AG, Onykii BN, Borodin AO. [The role of nuclear energy in the modern world. Safety and cost]. *YUNIDO v Rossii*. 2011;4:59–63. Russian.
22. Osetskaya MM, Ukraintsev VF. Current trends in the nuclear power global market. *Prostranstvennaya ekonomika*. 2018;1:154–169. Russian. DOI: 10.14530/se.2018.1.154-169.

Получена 17.04.2023 / исправлена 25.09.2023 / принята 02.11.2023.
Received 17.04.2023 / revised 25.09.2023 / accepted 02.11.2023.

СВЯЗЬ МЕЖДУ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ И НЕБЛАГОПРИЯТНЫМИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ ЯВЛЕНИЯМИ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В ПЕРИОД ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

И. С. ДАНИЛОВИЧ^{1), 2)}, Е. С. БЕРЕЖКОВА²⁾

¹⁾Институт природопользования НАН Беларуси, ул. Франциска Скорины, 10, 220114, г. Минск, Беларусь

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

Представлены результаты оценки связи между индексами (модами) атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе (индекс Северо-Атлантического колебания, индекс Арктического колебания и индекс Скандинавского блокирования) и числом дней с неблагоприятными явлениями погоды (интенсивные осадки, метели и грозы). Получены статистически значимые коэффициенты корреляции. Показано, что выпадение интенсивных осадков зимой на территории Беларуси сопряжено с преобладанием положительной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний, а также с перемещением североатлантических циклонов. Повторяемость метелей, напротив, является более высокой при установлении отрицательной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний. Летом интенсивные осадки частично связаны с доминированием отрицательной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний, а также с выходами южных циклонов. Наибольшая повторяемость гроз отмечается при установлении положительной фазы Скандинавского блокирования.

Ключевые слова: интенсивные осадки; метели; грозы; опасные явления; индексы (моды) атмосферной циркуляции; циклоны.

Образец цитирования:

Данилович ИС, Бережкова ЕС. Связь между атмосферной циркуляцией и неблагоприятными метеорологическими явлениями на территории Беларуси в период изменения климата. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2023;2:49–57.
EDN: MCNOAM

For citation:

Danilovich IS, Berezhkova KS. Relationship between atmospheric circulation and natural hazards over the territory of Belarus during the period of climate change. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2023;2:49–57. Russian.
EDN: MCNOAM

Авторы:

Ирина Сергеевна Данилович – кандидат географических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории климатических исследований Центра геоэкологии и климатологии¹⁾, доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики²⁾.
Екатерина Сергеевна Бережкова – старший преподаватель кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Irina S. Danilovich, PhD (geography), docent; leading researcher at the laboratory of climate research, Center of Geoecology and Climatology^a, associate professor at the department of general geography of the Earth and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics^b.
irinadanilovich@yandex.ru
<https://orcid.org/0000000267927279>
Katsiaryna S. Berezhkova, senior lecturer at the department of general geography of the Earth and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics.
katarina0704@tut.by

RELATIONSHIP BETWEEN ATMOSPHERIC CIRCULATION AND NATURAL HAZARDS OVER THE TERRITORY OF BELARUS DURING THE PERIOD OF CLIMATE CHANGE

I. S. DANILOVICH^{a, b}, K. S. BEREZHKOVA^b

^a*Institute for Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
10 Francyska Skaryny Street, Minsk 220114, Belarus*

^b*Belarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

Corresponding author: K. S. Berezhkova (katarina0704@tut.by)

The study presents an assessment of the relationship between atmospheric circulation indices (modes) in the Atlantic-European sector (North Atlantic Oscillation index, Arctic Oscillation index, and Scandinavian Blocking index) and natural hazards, such as heavy precipitation, blizzards and thunderstorms. Statistically significant correlation coefficients were detected for these modes and events. It is shown that the intense precipitation over the territory of Belarus in winter is associated with the positive phase of the North Atlantic and Arctic Oscillations and North Atlantic cyclones tracks. However, snowstorms frequency is higher at the negative phase of the North Atlantic and Arctic Oscillations. In summer, intense precipitation is partly associated with the negative phase of North Atlantic and Arctic Oscillations and the southern cyclones outlets. The greatest frequency of thunderstorms is observed with positive phase of the Scandinavian Blocking.

Keywords: heavy precipitation; blizzards; thunderstorms; natural hazards; atmospheric circulation indices (modes); cyclones.

Введение

В условиях изменения климата, повышения температуры и влажности воздуха в последние десятилетия отмечается увеличение числа неблагоприятных явлений погоды. С 1980 г. их повторяемость на территории Европы выросла вдвое [1]. Возникновение экстремальных метеорологических явлений связано с циркуляцией атмосферы. Увеличение количества водяного пара усиливает адиабатический нагрев и способствует повышению интенсивности внетропических циклонов [2]. Например, за 1958–2009 гг. в Северном полушарии над Северной Атлантикой возросла активность интенсивных циклонов зимой [3]. Северная Европа чаще других регионов страдает от экстремальных зимних явлений, таких как снегопады, залоги холодного воздуха, зимние бури и сильные снегопады. Сильные ветры и метели наиболее распространены над Атлантикой и в прибрежных районах.

Еще одним фактором формирования метеорологических экстремумов выступает атмосферное блокирование, которое сопряжено с установлением обширного антициклона над территорией Европы, что нарушает западный перенос воздушных масс в средних широтах. Атмосферное блокирование приводит к отрицательным аномалиям осадков в районе антициклона и их положительным аномалиям на фронтальных разделах барических систем [4]. Вместе с тем повышение температуры и влажности воздуха способствует возникновению положительных трендов конвективных процессов в атмосфере над Южной, Центральной и Северной Европой [5], с которыми связаны наиболее интенсивные опасные метеорологические явления.

Среди неблагоприятных атмосферных явлений наиболее заметный рост показателей, зафиксированный на территории Европы в последние десятилетия, характерен для гроз (увеличиваются число и интенсивность летних гроз [6], особенно над Центральной и Южной Европой [7]). Интенсивность града в этом регионе отличается отсутствием значимых трендов за 30-летний период, уменьшается число случаев выпадения града большого размера, но одновременно с этим увеличивается диаметр крупинки града [8]. На территории Польши возросло число дней с туманом (на 5 дней за 10 лет) и грозами (на 2 дня за 10 лет), однако отсутствуют значимые тенденции в отношении количества дней с градом и гололедом [9]. Результаты анализа данных о горизонтальной видимости показывают, что в Европе частота возникновения условий плохой видимости (0–8 км) при таких явлениях, как туман, мгла и дымка, снизилась за последние 30 лет. Это обусловлено изменениями в аэрозольной нагрузке и облачности [10].

Сильные ветры в Северной и Центральной Европе в основном связаны с циклонами, возникающими над Северной Атлантикой и Северным морем [11], а циклоны, зарождающиеся над Средиземным морем, могут вызывать сильные ветры над Южной Европой [12]. На большей части территории Европы отмечается уменьшение среднегодовых значений ветра [13; 14] в результате более частого установления блокирующих антициклонов над Северо-Восточной Атлантикой и снижения зонального переноса. Но несмотря на падение скорости ветра в Центральной и Восточной Европе [15; 16], возрастает повторяемость шквалов и смерчей в Украине [16] и Польше [17].

На территории Беларуси в период потепления климата, который пришелся на 1989–2020 гг., увеличилась повторяемость числа дней с гололедом, грозами, градом и интенсивными осадками [18; 19]. В летний период на большинстве метеорологических станций страны было зафиксировано, что суточные максимумы осадков, обусловленные в основном конвективными процессами, возросли на 20–25 % [20]. Снижается повторяемость числа дней с туманом, метелями, низкой видимостью и сильным ветром [18]. На фоне общего падения скорости ветра на территории Беларуси максимальный порыв ветра сократился на 1–5 м/с в зимний период, но увеличился на 1–3 м/с в летний сезон, что было зарегистрировано на большинстве метеорологических станций. Это объясняется усилением в теплое время года конвективных процессов в атмосфере [21].

В связи с необходимостью анализа разнонаправленных трендов повторяемости неблагоприятных явлений погоды в Беларуси и различных условий их формирования целью работы выступает установление связи между атмосферной циркуляцией в Атлантико-Европейском секторе и повторяемостью отдельных метеорологических явлений (грозы, град, интенсивные осадки, туман, гололед, метели, видимость менее 1 км, ветер со скоростью 14 м/с и более) на территории страны в период трансформации климата.

Материалы и методы исследования

В работе использованы данные о повторяемости случаев интенсивных осадков (более 15 мм за 12 ч), гроз, града, тумана, сильного ветра (14 м/с и более), низкой видимости (менее 1 км), гололеда и метелей, отмеченных на территории Беларуси. Исходные сведения представлены в виде числа дней с каждым перечисленным явлением за месяц, зарегистрированных на 42 метеорологических станциях наблюдательной сети Белгидромета, за период с 1975 по 2022 г.

Связь между атмосферной циркуляцией и повторяемостью неблагоприятных явлений погоды на территории Беларуси установлена на основании месячных значений индексов (мод) атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе: индекса Северо-Атлантического колебания (далее – индекс NAO), индекса Арктического колебания (далее – индекс АО) и индекса Скандинавского блокирования (далее – индекс SCAND) – за период с 1975 по 2022 г.

В качестве основного метода исследования применен корреляционный анализ. Для всех анализируемых показателей по данным за соответствующие месяцы вычислены коэффициенты корреляции (r) между значениями индексов атмосферной циркуляции и осредненным по стране числом дней с неблагоприятными метеорологическими явлениями, зафиксированных на каждой станции. В целях оценки уровня статистической значимости (p) коэффициентов корреляции использован t -критерий Стьюдента. Статистические расчеты и подготовка графического материала выполнены с помощью библиотек pandas, NumPy, SciPy, Matplotlib языка программирования Python (3.11).

Результаты и их обсуждение

Атмосферная циркуляция в Атлантико-Европейском секторе играет важную роль для регионального климата Европы. Индексы атмосферной циркуляции – показатели глобальной изменчивости атмосферы, которые характеризуют трансформации региональных процессов. Основным фактором изменения регионального климата является Северо-Атлантическое колебание [22], определяющее интенсивность западного переноса воздушных масс в зависимости от градиента давления между Азорским антициклоном и Исландским циклоном. Долгосрочные тенденции Северо-Атлантического колебания, которые проявлялись в 1899–2018 гг., отличаются непостоянством и высокой межгодовой и междекадной изменчивостью. С середины 1960-х гг. наблюдается положительная тенденция к более зональной циркуляции с мягкими и влажными зимами и повышенной повторяемостью штормов в Центральной и Северной Европе [23]. Однако после середины 1990-х гг. наметилась тенденция к более меридиональной циркуляции и более холодным периодам зимой, что обусловлено движением воздушных масс восточного или северного направления (отрицательные значения индекса NAO).

Для Беларуси прослеживается статистически значимая связь между значениями индекса NAO и температурой воздуха с декабря по март, при этом величины r составляют 0,45–0,55 [24; 25]. Преобладание положительной фазы Северо-Атлантического колебания в 1960–90-х гг. коррелирует с более заметным ростом (на 2,4 °C) температуры в зимнее время года на территории страны по сравнению с летним сезоном. Но с 2000-х гг. прослеживается обратная тенденция: более интенсивно повышается температура воздуха летом [26]. В режиме увлажнения в зимний сезон увеличиваются (на 3–5 мм за 10 лет) положительные величины трендов сезонных сумм осадков [27]. Однако в мае, августе и сентябре отмечается тенденция к уменьшению количества осадков [28]. Выпадение осадков, в том числе осадков интенсивного характера, связано с циклонической деятельностью, а в теплый период года оно

сопряжено и с конвекцией в атмосфере. С 1970-х гг. повышается частота возникновения циклонов в Северной и Центральной Европе [29; 30], особенно повторяемость североатлантических циклонов в зимний сезон, что привело к увеличению количества осадков в Северной Европе и их снижению в Центральной Европе.

На рис. 1, *а*, представлен график связи между значениями индекса NAO и осредненным по стране числом случаев выпадения интенсивных осадков, зафиксированных на 42 метеорологических станциях Беларуси, в зимний период. Величина r составляет 0,60 (при $p < 5\%$). Зимой при положительных значениях индекса NAO длинные волны в атмосфере (господствующий западный поток воздушных масс в средних широтах, который является волнообразным) характеризуются малой амплитудой. Пути циклонов, перемещающихся вдоль длинных волн, пролегают практически прямолинейно с запада на восток, они блокируют заток холодных воздушных масс на территорию Европы и обуславливают выпадение осадков на всем пути следования. В холодное время года в основном именно мощные североатлантические циклоны, сформированные у восточных побережий Северной Америки, приносят обильные осадки на территорию Беларуси [31]. При отрицательных значениях индекса NAO увеличивается амплитуда волн и преобладает меридиональный тип атмосферной циркуляции, для которого характерны как выходы южных циклонов, способных принести обильные осадки на территорию страны, так и затoki холодного арктического воздуха с антициклоном и отсутствие осадков.

В летний сезон связь между значениями индекса NAO и числом дней с интенсивными осадками является более слабой, чем в зимний период (рис. 1, *б*). Величина r составляет $-0,43$ (при $p < 5\%$). Отрицательные значения индекса NAO и их менее тесная связь с анализируемыми показателями объясняются увеличением интенсивности выпадения осадков летом. Это обусловлено прохождением южных циклонов (25 % (без учета фронтальных разделов) от общего объема выпадающих осадков) и конвективными явлениями в атмосфере (10–12 % от общего объема осадков, выпадающих в теплый сезон, а именно с мая по август) [31].

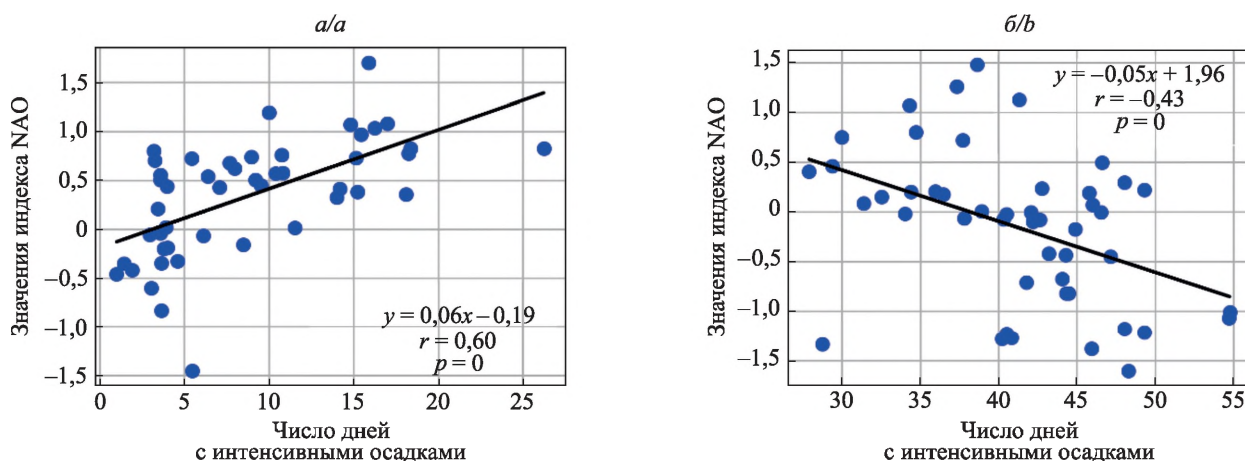


Рис. 1. График связи между значениями индекса NAO и числом дней с интенсивными осадками с декабря по март (*а*) и с июня по август (*б*)

Fig. 1. Graph of the relationship between NAO index values and the number of days with heavy precipitation from December to March (*a*) and from June to August (*b*)

Арктическое колебание представляет собой разнонаправленное смещение атмосферного давления между Арктикой и средними широтами северной части Тихого океана и Атлантики. При установлении положительной фазы Арктического колебания ведущий поток средних широт направлен на север, тем самым количество вторгаемого в средние широты холодного воздуха уменьшается, тогда как при доминировании отрицательной фазы струйное течение сдвигается на юг, что позволяет арктическому воздуху проникать в средние широты [32].

С начала 2000-х гг. преобладают отрицательная фаза Арктического колебания и меридиональный тип циркуляции в Атлантико-Европейском секторе. Зимой увеличение количества осадков на территории Беларуси связано с повышением повторяемости возникновения южных циклонов, которые приносят обильные осадки [31]. Величина r между значениями индекса АО и осредненным числом случаев интенсивных осадков составляет 0,71 (при $p < 5\%$) (рис. 2, *а*).

В теплый сезон на территории Беларуси зафиксированы отрицательные тренды летних сумм осадков в отдельные месяцы, что можно объяснить снижением циклонической активности летом, уменьшением частоты возникновения циклонов и усилением засушливости климата во время установления отрицательной фазы Арктического колебания и роста повторяемости меридиональных типов циркуляции. Величина r между значениями индекса АО и числом случаев интенсивных осадков составляет $-0,46$ (при $p < 5\%$) (рис. 2, б). Однако на территории Беларуси отмечается рост суточных максимумов осадков, обусловленный конвективными процессами в атмосфере [20].

Возникновение метелей вызвано преобладанием отрицательной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний и установлением меридионального типа атмосферной циркуляции, при котором отмечаются выходы южных циклонов. С южными циклонами связана наибольшая повторяемость метелей на территории страны [33]. На рис. 3 представлены графики связи между значениями индекса NAO (рис. 3, а) и индекса АО (рис. 3, б) и числом дней с метелями. Величины r составляют $-0,54$ и $-0,43$ соответственно (при $p < 5\%$) и указывают на высокую повторяемость дней с метелями при низких значениях индексов NAO и АО.

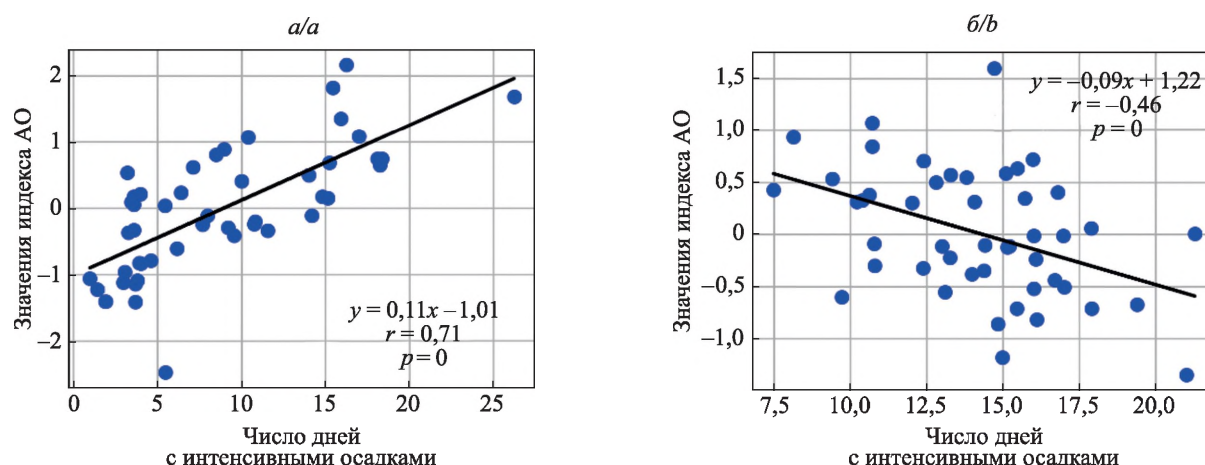


Рис. 2. График связи между значениями индекса АО и числом дней с интенсивными осадками с декабря по март (а) и с июня по август (б)

Fig. 2. Graph of the relationship between AO index values and the number of days with heavy precipitation from December to March (a) and from June to August (b)

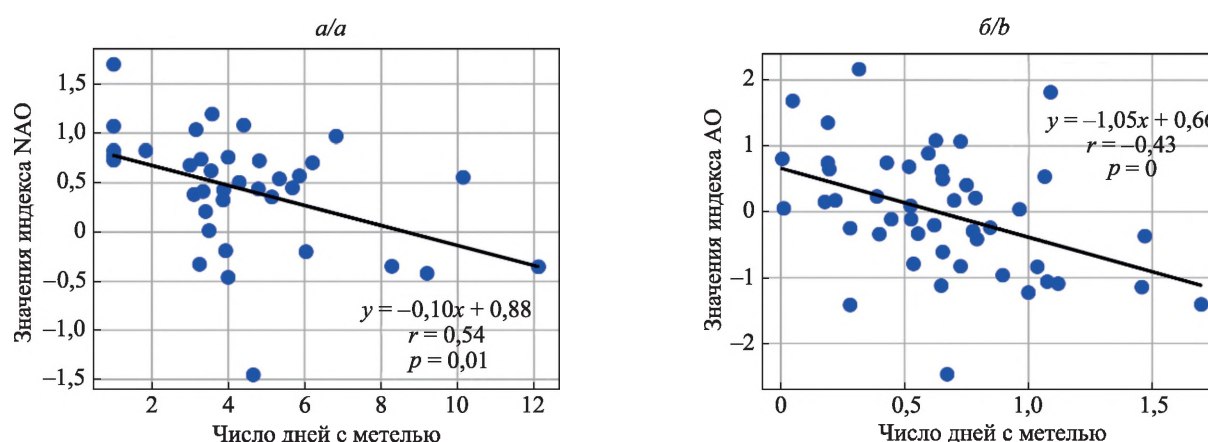


Рис. 3. График связи между значениями индексов NAO (а) и АО (б) и числом дней с метелями с декабря по март

Fig. 3. Graph of the relationship between NAO (a) and AO (b) index values and the number of days with blizzards from December to March

Но в последние десятилетия эта связь ослабевает за счет изменения в режиме выпадения твердых осадков и характеризуется значимым снижением продолжительности выпадения осадков в твердой фазе из-за устойчивого повышения температуры воздуха.

С помощью индекса SCAND можно описать погоду в Европе и выделить характерные закономерности, наблюдаемые в разное время года. Он в значительной степени определяется диполем давления между Южной Европой и Скандинавией. Влияние атмосферного блокирования на повторяемость неблагоприятных явлений на территории Беларуси в основном прослеживается в теплый период года, оно связано с установлением засушливых погодных условий.

При доминировании отрицательной фазы Скандинавского блокирования область низкого давления сосредоточена в Северной Европе, а область высокого давления – на большей части Центральной и Южной Европы. Сухая погода фиксируется во многих регионах Европы вплоть до северной части Северо-Европейской равнины, а более влажная, чем обычно, погода отмечается только на крайнем севере континента. Такое распределение давления свидетельствует о возникновении в Европе обширного антициклона, с которым связаны продолжительные периоды дефицита осадков. Как показано в публикации [4], с антициклонами сопряжены засухи, повторяемость которых в Беларуси растет в последние десятилетия. На территории страны эта тенденция выражается в сокращении продолжительности выпадения осадков летом на 15–20 % за последние 30 лет, что было зафиксировано на большинстве метеорологических станций. В то же время суточные максимумы осадков летом выросли на 20–25 % [27].

На рис. 4 представлены графики связи между значениями индекса SCAND и осредненным по стране числом дней с грозами, которые сопровождаются интенсивными осадками. Величины r составляют 0,42; 0,44 и 0,34 в мае (рис. 4, а), июне (рис. 4, б) и июле (рис. 4, в) соответственно (при $p < 5\%$). Иными словами, при высоких значениях индекса SCAND наблюдается большое количество дней с грозами на территории Беларуси.

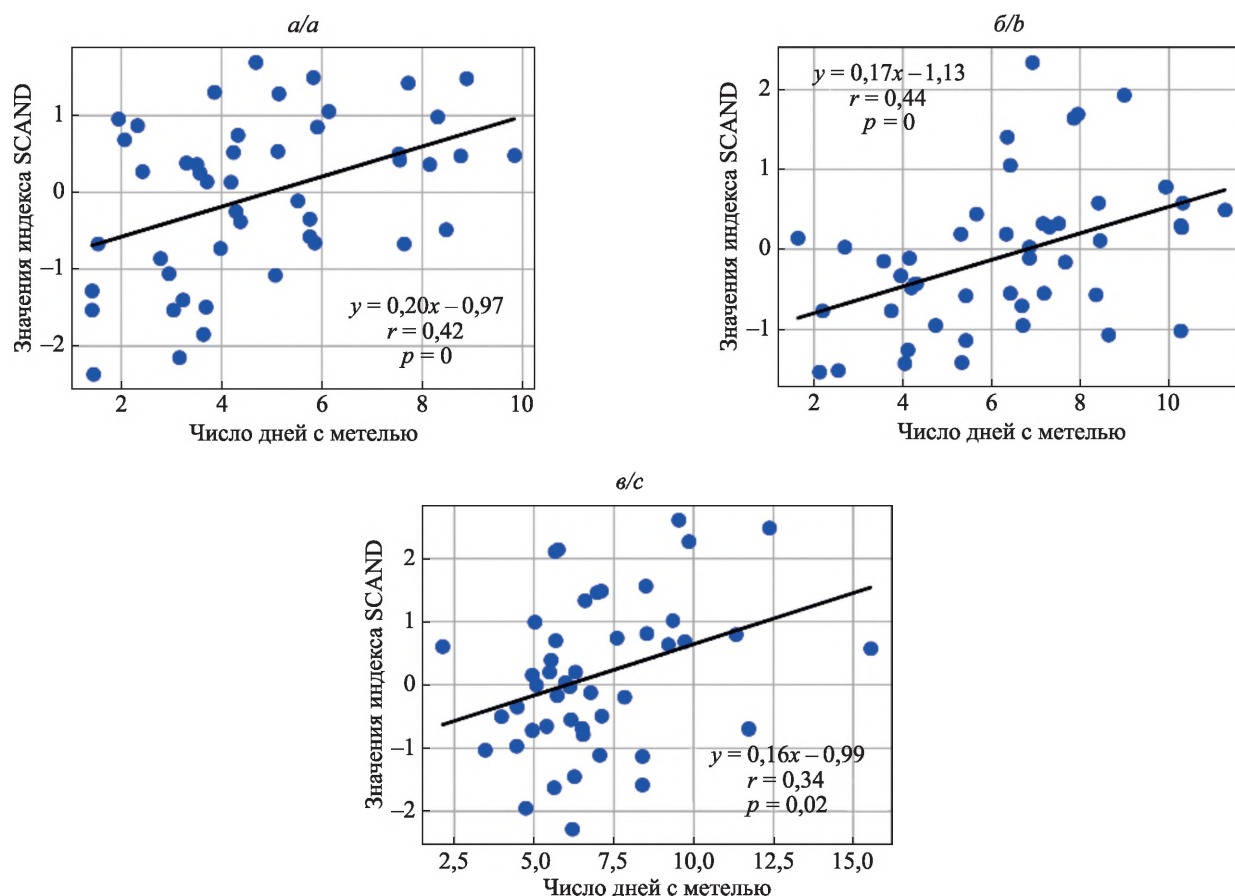


Рис. 4. График связи между значениями индекса SCAND и числом дней с грозами в мае (а), июне (б) и июле (в)

Fig. 4. Graph of the relationship between SCAND index values and the number of days with thunderstorms in May (a), June (b) and July (c)

Невысокая, но статистически значимая связь между атмосферным блокированием и числом гроз объясняется распространением области высокого давления на большей части Европы. Она характеризуется низкими величинами индекса SCAND и высокой частотой установления длительных антициклонов (продолжительностью не менее 5 дней), влияющих на погоду летом в Беларуси [21] и способствующих усилению засушливых условий. При положительных значениях индекса SCAND в теплый сезон над территорией Европы преобладает область низкого давления, отмечается более влажная погода и в условиях высоких температур и неустойчивой стратификации в атмосфере формируются интенсивные осадки в сопровождении грозовой деятельности.

Заключение

В результате оценки корреляции между величинами индексов атмосферной циркуляции (NAO, AO и SCAND) и количеством дней с неблагоприятными явлениями погоды на территории Беларуси установлена статистически значимая связь первых с повторяемостью случаев интенсивных осадков, метелей и гроз, т. е. явлений, формирующихся преимущественно вследствие циклонической деятельности. Туман, град, низкая видимость, дымка и сильный ветер сопряжены с более локальными условиями их возникновения – неустойчивой стратификацией атмосферы, инверсиями, которые не могут быть описаны с помощью показателей изменчивости крупномасштабной циркуляции.

Выпадение интенсивных осадков зимой на территории Беларуси отмечается при установлении положительной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний и перемещении мощных североатлантических циклонов через Европу. Повторяемость метелей, напротив, является более высокой при доминировании отрицательной фазы Северо-Атлантического и Арктического колебаний, когда формируются условия для выходов южных циклонов. Летом установлена обратная связь между значениями индексов NAO и AO и числом дней с интенсивными осадками, что обусловлено преобладанием меридиональных типов циркуляции и отрицательных фаз Северо-Атлантического и Арктического колебаний и вызвано более высокой повторяемостью южных циклонов, приносящих осадки на территорию Беларуси. Повторяемость гроз во многом связана с частотой блокирования ведущего потока в атмосфере в результате установления обширных и длительных антициклонов. При доминировании положительной фазы Скандинавского блокирования и преобладании области низкого давления на значительной части территории Европы отмечается более высокая повторяемость гроз в Беларуси.

Библиографические ссылки

1. European Academies' Science Advisory Council. *Extreme weather events in Europe* [Internet]. 2018 [cited 2023 January 12]. Available from: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Extreme_Weather/EASAC_Extreme_Weather_2018_web.pdf.
2. Shaw TA, Baldwin M, Barnes EA, Caballero R, Garfinkel CI, Hwang Y-T, et al. Storm track processes and the opposing influences of climate change. *Nature Geoscience*. 2016;9(9):656–664. DOI: 10.1038/ngeo2783.
3. Lehmann A, Getzlaff K, Harlas J. Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009. *Climate Resources*. 2011;46(2):185–196. DOI: 10.3354/cr00876.
4. Sousa PM, Trigo RM, Barriopedro D, Soares PMM, Ramos AM, Liberato MLR. Responses of European precipitation distributions and regimes to different blocking locations. *Climate Dynamic*. 2017;48(3–4):1141–1160. DOI: 10.1007/s00382-016-3132-5.
5. Taszarek M, Allen JT, Brooks HE, Pilgij N, Czernecki B. Differing trends in the United States and European severe thunderstorm environments in a warming climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2021;102(2):296–322. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0004.1.
6. Skultety F, Jarosova M, Rostas J. Dangerous weather phenomena and their effect on en-route flight delays in Europe. *Transportation Research Procedia*. 2021;59:174–182. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.11.109.
7. Taszarek M, Kendzierski S, Pilgij N. Hazardous weather affecting European airports: climatological estimates of situations with limited visibility, thunderstorm, low-level wind shear and snowfall from ERA5. *Weather and Climate Extremes*. 2020;28:100243. DOI: 10.1016/j.wace.2020.100243.
8. Hulton F, Schultz DM. Climatology of Large Hail in Europe: characteristics of the European Severe Weather Database. *EGU-sphere* [Internet]. 2023 [cited 2023 April 30]. Available from: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2023/egusphere-2023-176>. DOI: 10.5194/egusphere-2023-176.
9. Arazny A, Laszyca E. Selected meteorological phenomena posing a hazard to aviation: a case study on Bydgoszcz airport, central Poland. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. 2020;18:61–71. DOI: 10.2478/bgeo-2020-0005.
10. Vautard R, Yiou P, van Oldenborgh GJ. Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nature Geoscience*. 2009;2(2):115–119. DOI: 10.1038/ngeo414.
11. Donat MG, Renggli D, Wild S, Alexander LV, Leckebusch GC, Ulbrich U. Reanalysis suggests long-term upward trends in European storminess since 1871. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(14):L14703. DOI: 10.1029/2011GL047995.
12. Nissen KM, Leckebusch GC, Pinto JG, Renggli D, Ulbrich S, Ulbrich U. Cyclone causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns. *Natural Hazards, Earth System Science*. 2010;10:1379–1391. DOI: 10.5194/nhess-10-1379-2010.
13. von Storch H, Lehmann A, Maraun D, editors. *Second assessment of climate change for the Baltic Sea Basin*. Cham: Springer; 2015. 501 p. DOI: 10.1007/978-3-319-16006-1.

14. Copernicus Climate Change Service. *European state of the climate – 2019* [Internet]. 2020 [cited 2023 February 15]. Available from: https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2020-04/ESOTC2019_summary.pdf.
15. Ministry of the Environment of the Republic of Latvia. *Fourth National Communication of the Republic of Latvia to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Riga: Ministry of the Environment of the Republic of Latvia; 2006. 160 p.
16. Balabukh V, Lavrynenko O, Bilaniuk V, Mykhnovych A, Pylypovych O. Extreme weather events in Ukraine: occurrence and changes. In: Sallis PJ, editor. *Extreme weather* [Internet]. 2018 [cited 2022 September 9]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/61828>. DOI: 10.5772/intechopen.77306.
17. Kozuchowski K, Zmudzka E. Ocieplenie w Polsce: skala i rozkład sezonowy zmian temperatury powietrza w drugiej połowie XX wieku. *Przegląd Geofizyczny*. 2001;46(1–2):81–90.
18. Бережкова ЕС, Лопух ПС. Трендовые риски, связанные с опасными метеорологическими явлениями, в гражданской авиации на территории Беларуси. *Географія*. 2023;1:3–7.
19. Переверженцев ЮП, Лопух ПС, Гледко ЮА, Бережкова ЕС, Ван Хао, Шлендер ТВ. Особенности климатических изменений на европейской территории Союзного государства России и Беларуси в начале XXI в. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2022;2:69–87. DOI: 10.33581/2521-6740-2022-2-69-87.
20. Данилович ИС, Логинов ВФ. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси. *Центральноазиатский журнал географических исследований*. 2021;1–2:35–48.
21. Данилович ИС, Костюченко ИВ. Трансформация ветрового режима на территории Беларуси в условиях изменяющегося климата. *Географія*. 2023;2:8–16.
22. Hurrell JW, Kushnir Y, Ottersen G, Visbeck M. An overview of the North Atlantic Oscillation. In: Hurrell JW, Kushnir Y, Ottersen G, Visbeck M, editors. *In the North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact*. Washington: American Geophysical Union; 2003. p. 1–35. DOI: 10.1029/134GM01.
23. Gillett NP, Fyfe JC. Annular mode changes in the CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letter*. 2013;40:1189–1193. DOI: 10.1002/grl.50249.
24. Логинов ВФ, редактор. *Изменения климата Беларуси и их последствия*. Минск: Тонтик; 2003. 330 с.
25. Логинов ВФ, Данилович ИС, Китаев ЛМ, Актенъева ЕМ. Современные и ожидаемые гидроклиматические изменения в бассейнах Балтийского и Арктических морей в пределах территорий Беларуси и России. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2022;66(3):338–347. DOI: 10.29235/1561-8323-2022-66-3-338-347.
26. Логинов ВФ, Лысенко СА, Мельник ВИ. *Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования*. Минск: Энциклопедикс; 2020. 264 с.
27. Данилович ИС, Пискунович НГ. Экстремальные проявления в режиме увлажнения на территории Беларуси в условиях трансформации климата. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2021;2:32–44. DOI: 10.33581/2521-6740-2021-2-32-44.
28. Мельник ВИ, Бужков ИВ, Чернышов ВД. Изменения количества и вида атмосферных осадков в холодный период на территории Беларуси в условиях современного потепления климата. *Природопользование*. 2019;2:44–51.
29. Sepp M, Post P, Jaagus J. Long-term changes in the frequency of cyclones and their trajectories in Central and Northern Europe. *Hydrology Research*. 2005;36(4):297–309. DOI: 10.2166/nh.2005.0023.
30. Partasenok IS, Groisman Pya, Chekan GS, Melnik VI. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus. *Environmental Research Letters*. 2014;9(9):095005. DOI: 10.1088/1748-9326/9/9/095005.
31. Данилович ИС, Логинов ВФ, Беганский АВ. Влияние циклогенеза в Атлантико-Европейском секторе на пространственно-временное распространение атмосферных осадков в Беларуси. *Природные ресурсы*. 2023;1:5–11.
32. Thompson DW, Wallace JM. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode. *Science*. 2001;293:85–89. DOI: 10.1126/science.1058958.
33. Сумах ЕН, Семёнова ИГ. Циклоническая активность и повторяемость опасных явлений погоды над территорией Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2019;2:79–93. DOI: 10.33581/2521-6740-2019-2-79-93.

References

1. European Academies' Science Advisory Council. *Extreme weather events in Europe* [Internet]. 2018 [cited 2023 January 12]. Available from: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Extreme_Weather/EASAC_Extreme_Weather_2018_web.pdf.
2. Shaw TA, Baldwin M, Barnes EA, Caballero R, Garfinkel CI, Hwang Y-T, et al. Storm track processes and the opposing influences of climate change. *Nature Geoscience*. 2016;9(9):656–664. DOI: 10.1038/ngeo2783.
3. Lehmann A, Getzlaff K, Harlas J. Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009. *Climate Resources*. 2011;46(2):185–196. DOI: 10.3354/cr00876.
4. Sousa PM, Trigo RM, Barriopedro D, Soares PMM, Ramos AM, Liberato MLR. Responses of European precipitation distributions and regimes to different blocking locations. *Climate Dynamic*. 2017;48(3–4):1141–1160. DOI: 10.1007/s00382-016-3132-5.
5. Taszarek M, Allen JT, Brooks HE, Pilguy N, Czernecki B. Differing trends in the United States and European severe thunderstorm environments in a warming climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2021;102(2):296–322. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0004.1.
6. Skultety F, Jarosova M, Rostas J. Dangerous weather phenomena and their effect on en-route flight delays in Europe. *Transportation Research Procedia*. 2021;59:174–182. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.11.109.
7. Taszarek M, Kendzierski S, Pilguy N. Hazardous weather affecting European airports: climatological estimates of situations with limited visibility, thunderstorm, low-level wind shear and snowfall from ERA5. *Weather and Climate Extremes*. 2020;28:100243. DOI: 10.1016/j.wace.2020.100243.
8. Hulton F, Schultz DM. Climatology of Large Hail in Europe: characteristics of the European Severe Weather Database. *EGU-sphere* [Internet]. 2023 [cited 2023 April 30]. Available from: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2023/egusphere-2023-176>. DOI: 10.5194/egusphere-2023-176.
9. Arazny A, Laszyca E. Selected meteorological phenomena posing a hazard to aviation: a case study on Bydgoszcz airport, central Poland. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. 2020;18:61–71. DOI: 10.2478/bgeo-2020-0005.

10. Vautard R, Yiou P, van Oldenborgh GJ. Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nature Geoscience*. 2009;2(2):115–119. DOI: 10.1038/ngeo414.
11. Donat MG, Renggli D, Wild S, Alexander LV, Leckebusch GC, Ulbrich U. Reanalysis suggests long-term upward trends in European storminess since 1871. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(14):L14703. DOI: 10.1029/2011GL047995.
12. Nissen KM, Leckebusch GC, Pinto JG, Renggli D, Ulbrich S, Ulbrich U. Cyclone causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns. *Natural Hazards, Earth System Science*. 2010;10:1379–1391. DOI: 10.5194/nhess-10-1379-2010.
13. von Storch H, Lehmann A, Maraun D, editors. *Second assessment of climate change for the Baltic Sea Basin*. Cham: Springer; 2015. 501 p. DOI: 10.1007/978-3-319-16006-1.
14. Copernicus Climate Change Service. *European state of the climate – 2019* [Internet]. 2020 [cited 2023 February 15]. Available from: https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2020-04/ESOTC2019_summary.pdf.
15. Ministry of the Environment of the Republic of Latvia. *Fourth National Communication of the Republic of Latvia to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Riga: Ministry of the Environment of the Republic of Latvia; 2006. 160 p.
16. Balabukh V, Lavrynenko O, Bilaniuk V, Mykhnovych A, Pylypovych O. Extreme weather events in Ukraine: occurrence and changes. In: Sallis PJ, editor. *Extreme weather* [Internet]. 2018 [cited 2022 September 9]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/61828>. DOI: 10.5772/intechopen.77306.
17. Kozuchowski K, Zmudzka E. Ocieplenie w Polsce: skala i rozkład sezonowy zmian temperatury powietrza w drugiej połowie XX wieku. *Przegląd Geofizyczny*. 2001;46(1–2):81–90.
18. Berezhkova ES, Lopuch PS. [Trend risks associated with hazardous meteorological phenomena in civil aviation on the territory of Belarus]. *Географія*. 2023;1:3–7. Russian.
19. Perevedentsev YuP, Lopuch PS, Hledko YA, Berezhkova KS, Van Khao, Schlender TV. Features of climate change in the European territory of the Union State of Russia and Belarus of the beginning of the 21st century. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2022;2:69–87. Russian. DOI: 10.33581/2521-6740-2022-2-69-87.
20. Danilovich IS, Loginov VF. Current and expected climate changes over the territory of Belarus. *Central Asian Journal of the Geographical Researches*. 2021;1–2:35–48. Russian.
21. Danilovich IS, Kostyuchenko IV. [Transformation of the wind regime on the territory of Belarus in a changing climate]. *Географія*. 2023;2:8–16. Russian.
22. Hurrell JW, Kushnir Y, Ottensen G, Visbeck M. An overview of the North Atlantic Oscillation. In: Hurrell JW, Kushnir Y, Ottensen G, Visbeck M, editors. *In the North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact*. Washington: American Geophysical Union; 2003. p. 1–35. DOI: 10.1029/134GM01.
23. Gillett NP, Fyfe JC. Annular mode changes in the CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letter*. 2013;40:1189–1193. DOI: 10.1002/grl.50249.
24. Loginov VF, editor. *Izmeneniya klimata Belarusi i ikh posledstviya* [Climate changes in Belarus and their consequences]. Minsk: Tonpik; 2003. 330 p. Russian.
25. Loginov VF, Danilovich IS, Kitaev LM, Akent'eva EM. Current and projected hydroclimatic changes in the Baltic and Arctic Sea basins in the territories of Belarus and Russia. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2022;66(3):338–347. Russian. DOI: 10.29235/1561-8323-2022-66-3-338-347.
26. Loginov VF, Lysenko SA, Melnik VI. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, possibilities for regulation]. Minsk: Entsiklopediks; 2020. 264 p. Russian.
27. Danilovich IS, Piskunovich NG. Precipitation extremes over territory of Belarus under current climate change. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2021;2:32–44. Russian. DOI: 10.33581/2521-6740-2021-2-32-44.
28. Melnik VI, Buyakov IV, Chernyshev VD. Changes in the amount and type of precipitation in the cold period in the territory of Belarus under conditions of modern climate warming. *Nature Management*. 2019;2:44–51. Russian.
29. Sepp M, Post P, Jaagus J. Long-term changes in the frequency of cyclones and their trajectories in Central and Northern Europe. *Hydrology Research*. 2005;36(4):297–309. DOI: 10.2166/nh.2005.0023.
30. Partasenok IS, Groisman Pya, Chekan GS, Melnik VI. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus. *Environmental Research Letters*. 2014;9(9):095005. DOI: 10.1088/1748-9326/9/9/095005.
31. Danilovich IS, Loginov VF, Begansky AV. Influence of cyclogenesis in the Atlantic-European sector on the spatial and temporal distribution of atmospheric precipitation in Belarus. *Natural Resources*. 2023;1:5–11. Russian.
32. Thompson DW, Wallace JM. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode. *Science*. 2001;293:85–89. DOI: 10.1126/science.1058958.
33. Sumak KM, Semenova IG. The cyclonic activity and frequency of dangerous weather phenomena over the territory of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2019;2:79–93. Russian. DOI: 10.33581/2521-6740-2019-2-79-93.

Получена 27.04.2023 / принята 19.06.2023.
Received 27.04.2023 / accepted 19.06.2023.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АЦИДОТРОФНЫХ ОЗЕР БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Н. Ю. СУХОВИЛО¹⁾, А. И. МОРОЗ¹⁾, А. А. НОВИК¹⁾, Д. Б. ВЛАСОВА¹⁾

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

Ацидотрофные озера – уникальные для территории Беларуси водоемы, которые характеризуются минимальными значениями концентрации веществ, растворенных в водной массе. Они обладают высокой чувствительностью к изменению природно-климатических условий на водосборах и к антропогенной трансформации водного, гидрохимического и термического режимов, но при этом достаточно слабо реагируют на восстановительные мероприятия. Озера подобного типа являются местами обитания представителей редких и охраняемых видов флоры и фауны. Изучение современного состояния ацидотрофных озер позволит установить намечающиеся тенденции эвтрофирования на ранних этапах и принять меры, направленные на предотвращение деградации данных лимносистем и исчезновения представителей охраняемых видов аквафлоры. Анализировался гидрохимический режим ацидотрофных озер Беларуси в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия на их водосборы. Исследование гидрохимических показателей восьми ацидотрофных озер Беларуси показало, что по сравнению с концом 1970-х – началом 1980-х гг. в них повысился уровень минерализации воды и концентрации аммоний-иона, а также снизились значения содержания кислорода, растворенного в водной массе, и прозрачность. В озерах Свитязь и Белое (Лунинский район) летом у дна формируется сероводородная зона. Это свидетельствует об ухудшении экологического состояния ацидотрофных озер. Результаты исследования могут быть применены для управления водными экосистемами, при их восстановлении, оптимизации хозяйственного использования водосборов озер, а также в образовательном процессе в целях подготовки специалистов – гидрометеорологов и геоэкологов.

Ключевые слова: ацидотрофное озеро; водосбор; гидрохимический режим; экологическое состояние; изменение климата; антропогенное воздействие.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта X22M-069.

Образец цитирования:

Суховило НЮ, Мороз АИ, Новик АА, Власова ДБ. Гидрохимический режим ацидотрофных озер Беларуси в условиях климатических изменений и антропогенной нагрузки. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2023;2:58–69.
EDN: LDQHRD

For citation:

Sukhovilo NYu, Maroz AI, Novik AA, Vlasova DB. Hydrochemical regime of Belarus acidotrophic lakes under conditions of climatic changes and anthropogenic load. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2023; 2:58–69. Russian.
EDN: LDQHRD

Авторы:

Нина Юрьевна Суховило – кандидат географических наук; заведующий научно-исследовательской лабораторией озероведения факультета географии и геоинформатики.

Алексей Игоревич Мороз – студент факультета географии и геоинформатики. Научный руководитель – кандидат географических наук Т. Г. Табальчук.

Алексей Александрович Новик – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики.

Дарья Борисовна Власова – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории озероведения факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Nina Yu. Sukhovilo, PhD (geography); head of the laboratory of lake research, faculty of geography and geoinformatics.
sukhovilony@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-0629-126X>

Aliaksei I. Maroz, student at the faculty of geography and geoinformatics.

alexiusmoroz@gmail.com

Aliaksei A. Novik, PhD (geography), docent; associate professor at the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics.

novika@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0002-9416-6313>

Daria B. Vlasova, junior researcher at the laboratory of lake research, faculty of geography and geoinformatics.

vlasovadb@bsu.by

<https://orcid.org/0009-0008-6026-0310>

HYDROCHEMICAL REGIME OF BELARUS ACIDOTROPHIC LAKES UNDER CONDITIONS OF CLIMATIC CHANGES AND ANTHROPOGENIC LOAD

N. Yu. SUKHOVILO^a, A. I. MAROZ^a, A. A. NOVIK^a, D. B. VLASOVA^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: N. Yu. Sukhovilo (sukhovilony@bsu.by)

Acidotrophic lakes are unique reservoirs for the territory of Belarus, which are characterised by a minimum concentration of dissolved substances. They are very sensitive to changes in natural and climatic conditions in watersheds and anthropogenic transformation of water, hydrochemical and thermal regimes, but at the same time they react rather weakly to restoration measures. Lakes of this type are habitats for rare and protected species of flora and fauna. The study of the current state of acidotrophic lakes will make it possible to identify emerging trends in eutrophication at an early stage and to take measures aimed at preventing the degradation of these limnosystems and the disappearance of protected species of aquaflora. The purpose of the study is the analysis of hydrochemical regime of acidotrophic lakes in Belarus under the conditions of climate change and anthropogenic impact on their watersheds. An analysis of the hydrochemical parameters of eight acidotrophic lakes in Belarus showed that, compared with the late 1970s – early 1980s there was an increase in water mineralisation, ammonium ion concentration, a decrease in the concentration of dissolved oxygen and transparency. In the lakes Svityaz and Beloe (Luninets district), a hydrogen sulfide zone forms near the bottom in summer. This testifies to the deterioration of the ecological state of acidotrophic lakes. The results of the study can be used for the management of aquatic ecosystems, during their restoration, optimisation of the economic use of lake catchment areas, in the educational process in the training of hydrometeorologists and geoecologists.

Keywords: acidotrophic lake; catchment; hydrochemical regime; ecological state; climate change; anthropogenic impact.

Acknowledgements. The research was funded by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research according to the research project X22M-069.

Введение

Среди всего многообразия озер, различающихся как строением котловин, видом водного питания, химическим составом вод, так и уровнем продуцирования, особняком стоят озера, которые имеют низкую продуктивность, специфические черты аazonального характера (водораздельное положение водосборов), малые размеры, гидрологическую замкнутость, верховые болота на водосборе, а также небольшие показатели минерализации и активной реакции воды.

Термин «ацидотрофные озера» впервые был введен А. Ф. Тинеманом в 1928 г. Под этим понятием подразумевались низкопродуктивные озера со значениями водородного показателя ниже 5,5. В 1933 г. Шинкичи Йошимура разделил ацидотрофные озера на два типа: в озерах первого типа кислая реакция среды обусловлена особенностями подстилающих пород, а в озерах второго типа – биологическими процессами. К данной классификации позднее был добавлен третий тип озер, закисление которых вызвано выпадением кислотных дождей, т. е. влиянием антропогенного фактора [1]. Позже Б. М. Александров при разработке типологии озер на основе биологических показателей выделил так называемые ацидотрофные (ацидные) озера. В первую очередь он полагался на количественные (продукционные) критерии развития флоры и фауны, но не рассматривал видовой состав гидробионтов [2].

В последние годы исследование ацидотрофных озер проводится в основном гидробиологами, оно направлено на установление особенностей функционирования отдельных сообществ и их адаптации к кислой реакции среды обитания. Одним из наиболее изученных является оз. Крейтер (штат Орегон, США), имеющее вулканическое происхождение [3, p. 180].

В СССР первые исследования ацидотрофных водоемов связаны с деятельностью С. Н. Скадовского, Г. Г. Винберга и др. В качестве характерных черт закисленных водоемов указывались низкие значения содержания кальция, полное или почти полное отсутствие гидрокарбонатов, а также сульфатный класс вод. В дальнейшем особенности структуры и специфика функционирования биоты болотных гумифицированных водоемов, в том числе ацидотрофных, анализировались главным образом на примере озер Карелии и Ленинградской области, где они получили наиболее широкое распространение [4; 5].

В 1994 г. был издан сборник трудов Института биологии внутренних вод имени И. Д. Папанина [6]. В нем описаны особенности экосистем озер с кислой реакцией среды Дарвинского государственного природного биосферного заповедника (Вологодская и Ярославская области, Россия), где закисление

имело как естественные, так и антропогенные причины с преобладанием первых. Авторами сборника чаще рассматривались озера, расположенные в пределах верховых болот, что несколько отличает их от объектов настоящего исследования.

В Беларуси ацидотрофные водоемы, размещенные вне крупных верховых болот, обнаружили в 1970-х гг. в ходе паспортизации озер. Впервые комплексно были описаны подобные озера, определены состав водной массы, гидрологические и гидробиологические особенности этих водоемов [7]. При паспортизации объектов выявлено, что практически все озера имеют на водосборе небольшой верховой болотный массив, который служит источником образования гумусовых кислот. В классификации, предложенной О. Ф. Якушко, они отнесены к озерам первого типа – глубоким небольшим мезотрофным озерам с признаками олиготрофии [8]. Однако такое утверждение не совсем обоснованно, так как, несмотря на схожесть некоторых классификационных признаков, максимальная глубина подобных водоемов редко превышает 10 м. В настоящее время на территории Беларуси отдельные ацидотрофные озера изучаются в контексте выявления закономерностей распространения представителей охраняемых видов аквафлоры, в основном полушника озерного (*Isoetes lacustris* L.) и лобелии Дортмана (*Lobelia dortmanna* L.) [9].

Среди всех водоемов страны озера ацидотрофного типа считаются наименее распространенными. М. И. Петрова уточнила особенности расположения этих водоемов, а также определила параметры и характеристики среды ацидотрофных озер Беларуси [10].

На некоторых ацидотрофных озерах имеются пункты наблюдения за состоянием высшей водной растительности Национальной системы мониторинга окружающей среды. Кроме образцов самой водной растительности, отбираются пробы воды и донных отложений для анализа их химического состава. Исследования, которые проводятся в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды, осуществляются раз в 5–10 лет, но в основном охватывают ключевые участки и являются единичными и несистематичными¹.

Из-за слабого характера водообмена и низких значений концентрации веществ, растворенных в водной массе, ацидотрофные озера сильно уязвимы к изменению окружающей среды, которое обусловлено как климатическими сдвигами, так и антропогенной нагрузкой. Это может привести к исчезновению представителей охраняемых видов водной флоры и фауны. По этой причине необходимо детально изучить среду распространения представителей охраняемых видов растений в целях своевременного выявления изменений в химическом составе воды, гидрологическом, газовом и температурном режимах [11].

Актуальность исследования ацидотрофных озер продиктована несколькими причинами – исключительно редкой встречаемостью уникальных для территории Беларуси водоемов данного типа и их высокой уязвимостью к внешнему климатическому и антропогенному воздействию. Трансформации, которые происходят в ацидотрофных озерах, приводят к исчезновению и сокращению числа представителей обитающих в них редких и реликтовых видов, таких как полушник озерный и лобелия Дортмана, – биоиндикаторов изменения климата, загрязнения и эвтрофикации вод.

Цель исследования – анализ гидрохимического режима ацидотрофных озер Беларуси в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия на их водосборы.

Материалы и методы исследования

Исходными сведениями послужили данные натурных наблюдений и фондовые материалы научно-исследовательской лаборатории озероведения факультета географии и геoinформатики Белорусского государственного университета за период с 1971 по 2022 г., которые включают информацию о морфометрических и гидрохимических параметрах ацидотрофных озер, особенностях их водосборов и характере водообмена². Применялись полевой, лабораторный, сравнительно- и эколого-географический методы, а также методы системного анализа и математической статистики (регрессионный, корреляционный анализ).

Из общего количества известных ацидотрофных озер исследованы восемь модельных водоемов, имеющих типичные признаки. Они различаются морфометрией, генезисом котловин, химическим составом воды и степенью биогенной нагрузки, поэтому достаточно полно отражают природные особенности ацидотрофных озер Беларуси. Географическое положение объектов исследования представлено на рис. 1.

¹Проведение наблюдений за ресурсами водной растительности, а также за средой ее произрастания : отчет о НИР / БГУ ; рук. Б. П. Власов. Минск, 2000–2016. № ГР 20164690.

²Комплексное лимнологическое обследование озерных водоемов Белоруссии : отчет о НИР / БГУ ; рук. О. Ф. Якушко. Минск, 1971–1980. ХД-ЛЮЗ-671717 ; Проведение наблюдений за ресурсами водной растительности... ; Власов Б. П., Якушко О. Ф., Гигевич Г. С. Озера Беларуси : справочник. Минск : Минсктиппроект, 2004. 284 с.



Рис. 1. Картограмма расположения объектов исследования.
Обозначения: I – Поозерье; II – Центральная Беларусь; III – Полесье
Fig. 1. Map of the location of research objects.
Designations: I – Poozerie; II – Central Belarus; III – Polesie

Большинство анализируемых озер приурочены к Полоцкой озерно-ледниковой низине, однако оз. Свитязь расположено на Новогрудской конечно-моренной возвышенности, оз. Ильгиния – в пределах Свенцянских ледниковых гряд, а оз. Белое (Лунинецкий район) – на Логишинской водно-ледниковой равнине.

Озера имеют ледниковое, реже карстовое (озера Свитязь и Белое (Лунинецкий район)) происхождение, относятся к числу неглубоких и небольших по площади водоемов. Их котловины характеризуются простым строением: округлой или овальной формой, плавной береговой линией, воронкообразной подводной частью. Узкая, пологая литораль занимает 10–20 % от площади акватории, она сложена песком и заиленным песком. Неширокий, крутой сублиторальный склон образован опесчаненным илом. Ложе плоское. Берега ацидотрофных озер Поозерья чаще всего крутые, сложенные песком и торфом, заросшие водно-болотной растительностью. Пойма не выражена. Склоны котловин (высота 5–10 м) на отдельных участках крутые, но чаще пологие, они образованы песком, в основном покрыты лесом. Водосборы озер имеют малую площадь – от 0,25 км² (оз. Ильгиния) до 2,02 км² (оз. Чербомысло). Максимальной площадью обладает водосбор оз. Свитязь (9,04 км²). Рельеф преимущественно крупнохолмистый, пологоволнистый, склоны чаще сложены песком, покрыты сосновым лесом. На водосборе почти всех озер расположены небольшие массивы верховых болот, примыкающих к акватории. Гидрологическая сеть на водосборах озер не развита, практически все водоемы не имеют впадающих водотоков.

Уровеньный режим озер стабильный. За многолетний период, по данным наблюдений, отмечаются незначительные колебания уровня воды в годовом цикле.

В приходной части водного баланса преобладают приток грунтовых вод и осадки на зеркало озера, а в его расходной части доминирует испарение с поверхности озер. Из оз. Свитязь вытекает р. Своротва, остальные озера являются бессточными. Водообмен замедленный. Основные морфометрические характеристики исследуемых озер приведены в таблице.

Морфометрические характеристики исследуемых озер

Morphometric characteristics of studied lakes

Озеро	Район	Характеристики							
		Площадь, км ²	Объем, млн м ³	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Открытость	Глубинность	Площадь водосбора, км ²	Период водообмена, лет
Белое	Лунинецкий	0,23	1,75	17,0	7,6	0,03	99,13	0,31	44,80
Белое	Полоцкий	1,0	8,42	19,6	8,4	0,12	8,40	1,80	21,05
Большое Островито	Полоцкий	0,48	1,50	6,0	3,1	0,15	3,97	1,12	6,0

Окончание таблицы
Ending of the table

Озеро	Район	Характеристики							
		Площадь, км ²	Объем, млн м ³	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Открытость	Глубинность	Площадь водосбора, км ²	Период водообмена, лет
Бредно	Верхнедвинский	0,21	0,54	4,6	1,9	0,15	20,36	0,30	6,90
Глубокое	Полоцкий	0,42	2,20	11,5	5,2	0,08	6,93	1,94	3,58
Ильгиния	Мядельский	0,08	0,43	15,6	5,1	0,02	179,89	0,25	8,07
Свитязь	Новогрудский	2,24	7,76	15,0	3,4	0,52	5,80	9,04	5,0
Чербомысло	Полоцкий	0,50	1,67	6,9	3,3	0,15	4,18	2,02	3,71

Гидрохимический режим озер формируется под влиянием характера питания (атмосферные осадки), гидрологических особенностей, состава приточных вод и морфометрического строения котловины. Небольшая площадь водосбора и отсутствие поверхностного притока способствуют стабильности химического состава водной массы в течение вегетационного сезона. Значительные глубины озер при их малой площади содействуют установлению в теплое время года прямой температурной стратификации³.

Донные отложения водоемов характеризуются четко выраженным поясным распределением и обнаруживают закономерность, определяемую формой котловины и расположением глубин. Минеральные осадки мелководной прибрежной зоны озер представлены песком и заиленным песком. Литораль и сублиторальный склон высланы песком, ширина полосы изменяется от нескольких метров в озерах Бредно, Чербомысло, Глубокое и Большое Островито до 70–100 м в озерах Белое (Полоцкий район) и Свитязь. В сублиторали и на границе с ней к песчаным осадкам примешиваются алевроитовые частицы и формируется опесчаненный ил. Последний образует сплошную непрерывную полосу шириной от 10–25 м в озерах Чербомысло, Большое Островито и Бредно до 100–200 м в озерах Свитязь, Белое (Лунинецкий район) и Белое (Полоцкий район). Наименьшая ширина залегания ила отмечена вдоль пологих и заболоченных берегов. С глубиной песок замещается заиленным песком и опесчаненным илом. В глубоководной части озерного ложа распространены тонкодетритовые сапропели⁴. Этот тип осадков занимает до 80 % от площади дна озер. Основным источником накопления органического вещества сапропелей служат главным образом планктонные организмы и остатки высших растений.

Все озера отличаются слабым развитием жизни. Видовой состав гидробионтов бедный, продукция низкая. Высшая водная растительность в озерах не получила широкого распространения. Она представлена полупогруженными растениями, занимающими литоральную зону на глубине от 0,2 до 0,7 м (различные виды осоки (*Carex* sp.), тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), ситняг болотный (*Eleocharis palustris* (L.) Roem. & Schult.). Тростник образует сильно разреженные заросли на отдельных участках литорали у самого уреза воды. В этом же поясе местами вдоль берегов озер Свитязь, Белое (Лунинецкий район) и Бредно встречается редкий, охраняемый вид – лобелия Дортмана. Растения с плавающими листьями в озерах развиты слабо или отсутствуют. Среди них наиболее распространены кувшинка чисто-белая (*Nymphaea candida* J. Presl & C. Presl), кубышка желтая (*Nuphar lutea* (L.) Sm.), рдест плавающий (*Potamogeton natans* L.), горец земноводный (*Polygonum amphibium* L.). Кувшинка и горец встречаются единичными экземплярами в заливах. Погруженные растения не отличаются видовым разнообразием, они представлены в основном элодеей канадской (*Elodea canadensis* Michx.), полушником озерным, а также различными видами рдестов (*Potamogeton* sp.) и мхов (*Fontinalis* sp.). Охраняемый вид полушник озерный произрастает в прибрежной части всех озер на глубине от 0,7 до 3,3 м. Видовой состав фитопланктона крайне беден, преобладают зеленые водоросли. Зоопланктон и зообентос также характеризуются слабым развитием. В зоопланктоне оз. Бредно отмечено наличие редкого для озер Беларуси голопедия горбатого (*Holopedium gibberum* Zaddach), который обитает в слабоминерализованных водах. Озера относятся к хириноидно-олигохетному типу.

Анализируемые озера являются слабопродуктивными водоемами, их ихтиофауна классифицируется как окунево-щучья. Из рыб здесь водятся щука (*Esox lucius* L.), окунь (*Perca fluviatilis* L.), плотва (*Rutilus rutilus* L.), карась (*Carassius carassius* L.) и линь (*Tinca tinca* L.).

³Проведение наблюдений за ресурсами водной растительности...

⁴Там же.

Результаты и их обсуждение

Под влиянием специфических условий на водосборах (высокая лесистость, наличие небольшого болотного массива, преобладание песчаных покровных отложений) в изучаемых озерах сформировался гидрохимический режим, отличающийся от зонального, характерного для большинства водоемов Беларуси. Среди уникальных свойств ацидотрофных озер следует отметить низкую минерализацию воды, малые значения концентрации других веществ, растворенных в водной массе, кислую реакцию среды и невысокую цветность.

Газовый режим озер тесно связан с их морфометрией, трофическим статусом и термической стратификацией. На рис. 2 отражены кривые вертикального распределения кислорода, растворенного в воде озер Белое (Лунинецкий район), Белое (Полоцкий район), Бредно и Глубокое, а также показатели термической стратификации этих водоемов в период летней стагнации 2022 г.

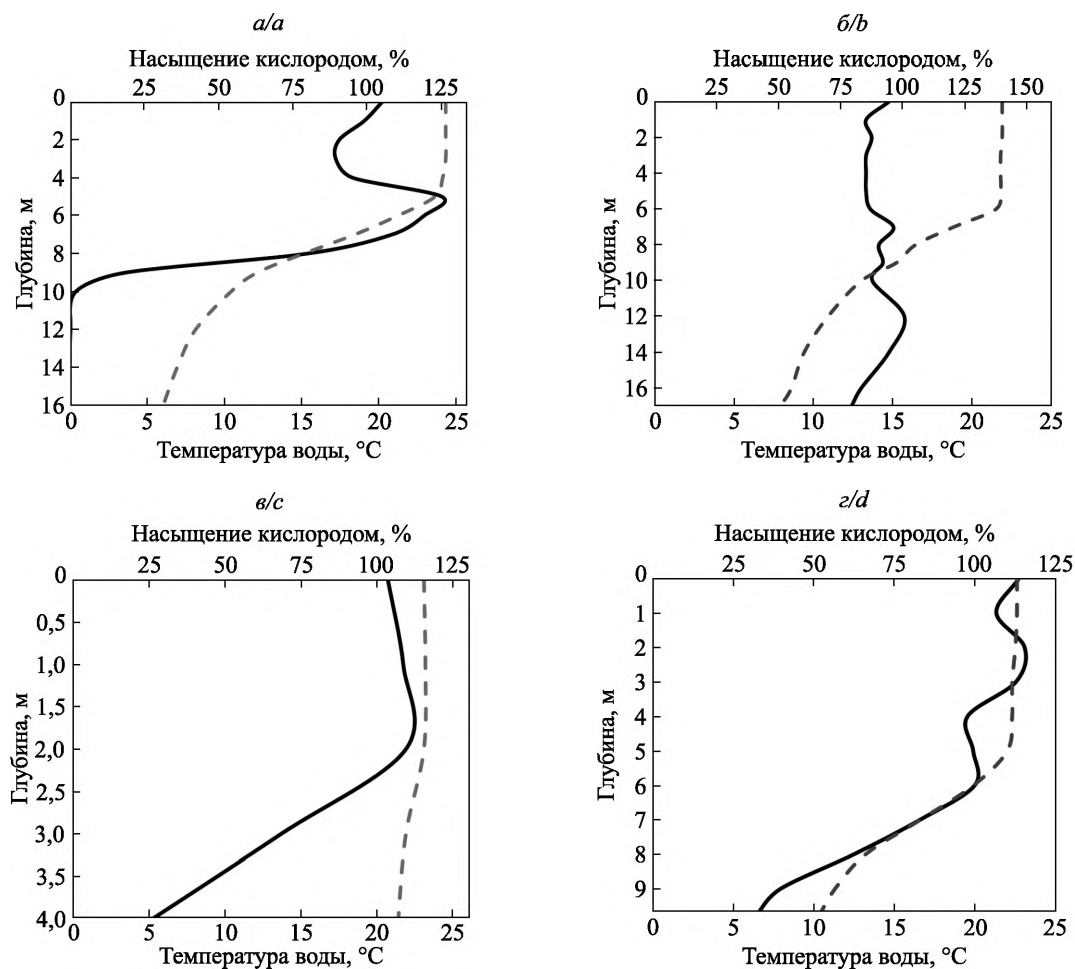


Рис. 2. Вертикальное распределение кислорода, растворенного в воде озер Белое (Лунинецкий район) (а), Белое (Полоцкий район) (б), Бредно (в) и Глубокое (г), и термическая стратификация этих водоемов в период летней стагнации 2022 г.

Сплошной линией обозначен уровень насыщения воды кислородом, пунктирной – температура воды

Fig. 2. Vertical distribution of oxygen dissolved in the water of lakes Beloe (Luninets District) (a), Beloe (Polotsk District) (b), Bredno (c), and Glubokoe (d) and thermal stratification of these reservoirs during the summer period of 2022.

The solid line indicates the level of water saturation with oxygen, the dotted line indicates the water temperature

Характеристикой силы температурной стратификации является термическая устойчивость озер. Ее степень определяется на основании того, какую работу необходимо совершить для перевода озера в состояние гомотермии в адиабатических условиях. Максимальное значение (270 Дж/м²) термической устойчивости водной массы во время наблюдений за температурой воды с 1971 по 2022 г. было зафиксировано в оз. Белое (Лунинецкий район). Несмотря на большую глубину оз. Белое (Полоцкий район), показатель

термической устойчивости его водной массы был ниже (196 Дж/м^2). Это связано с лучшими условиями вертикального и горизонтального водообмена оз. Белое (Полоцкий район) вследствие большой площади его водной поверхности (площадь водоемов различается в 4,5 раза). В мелководных нестратифицированных озерах показатель термической устойчивости был близок к значению 0. Так, в оз. Бредно эта величина составила $2,0 \text{ Дж/м}^2$, а в оз. Чербымысло – $7,66 \text{ Дж/м}^2$.

Хотя полевое обследование озер в 2022 г. проводилось при относительно невысоких температурах воздуха (до $+22^\circ\text{C}$), был отмечен рост значений термической устойчивости в большинстве водоемов. Исключение составляет оз. Свитязь, полевые исследования которого проходили при температуре воздуха около $+18^\circ\text{C}$, а также оз. Чербымысло, которое достаточно активно перемешивалось ветром. В нестратифицированных озерах Бредно и Большое Островито показатели термической устойчивости изменились незначительно, в оз. Глубокое они возросли с $11,87$ до $35,64 \text{ Дж/м}^2$ (в 3 раза), а в оз. Белое (Лунинецкий район) достигли $281,3 \text{ Дж/м}^2$. Усиление температурной стратификации приводит к изменению газового режима водоемов и формированию вертикальной неоднородности химического состава воды.

Примером водоема с выраженной термической стратификацией, но с отсутствующей кислородной стратификацией является оз. Белое (Полоцкий район). Температура воды в нем понижается на 14°C – с $21,9^\circ\text{C}$ у поверхности до $7,9^\circ\text{C}$ у дна, в то время как значения содержания кислорода, растворенного в водной массе, колеблются в пределах 79–100 %.

При близких показателях глубины и схожем характере температурной стратификации кислородная стратификация в оз. Белое (Лунинецкий район) существенно отличается от кислородной стратификации в оз. Белое (Полоцкий район). В приповерхностном слое воды наблюдается состояние, близкое к кислородному насыщению. Максимальный показатель концентрации кислорода отмечен на нижней границе эпилимниона (125 %). Глубже 10 м расположена зона аноксии с сероводородом. В оз. Свитязь, где в гипolimнионе также отсутствует растворенный кислород, вода начинает приобретать запах сероводорода с глубины 9 м.

В оз. Бредно, несмотря на отсутствие термической стратификации, формируется достаточно четко выраженная кислородная стратификация со снижением значений концентрации кислорода, растворенного в водной массе, с $9,2 \text{ мг/дм}^3$ на глубине 2 м до $2,1 \text{ мг/дм}^3$ у дна (или с 107,5 до 23,8 %).

В свою очередь, в оз. Глубокое присутствует как температурное, так и кислородное расслоение водной массы, однако уровень насыщения воды кислородом у дна не опускается ниже $3,6 \text{ мг/дм}^3$ (или 32 %).

Следует отметить, что с момента первого полевого обследования кислородный режим акидотрофных озер ухудшился: в большинстве водоемов появилась отсутствовавшая ранее кислородная стратификация, а в озерах Свитязь и Белое (Лунинецкий район) в гипolimнионе сформировалась сероводородная зона, что свидетельствует о неблагоприятном экологическом состоянии озер.

Минерализация воды в акидотрофных озерах на протяжении всего периода исследования была низкой и изменялась от $5,4 \text{ мг/дм}^3$ по состоянию на 2001 г. в оз. Бредно до $65,5 \text{ мг/дм}^3$ по состоянию на 2022 г. в оз. Белое (Полоцкий район). Вода озер относится к гидрокарбонатному классу кальциевой и магниевой групп. На рис. 3 представлены значения концентрации главных ионов в поверхностном слое воды акидотрофных озер Беларуси с июля по август 2022 г.

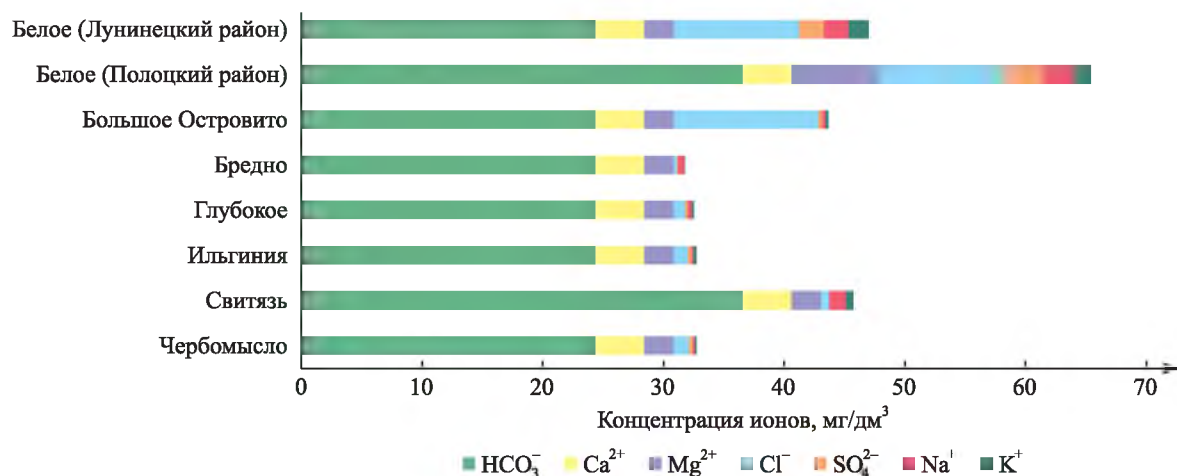


Рис. 3. Концентрация главных ионов в поверхностном слое воды исследуемых озер с июля по август 2022 г.

Fig. 3. Concentration of main ions in surface water layer of studied lakes from July to August 2022

Из рис. 3 видно, что озера Чербомысло, Бредно, Глубокое и Ильгиния характеризуются очень близкими величинами минерализации (около 30–32 мг/дм³) и схожим ионным составом воды. Более высокая минерализация воды в оз. Большое Островито обусловлена повышенными значениями концентрации в ней хлорид-ионов, источник поступления которых еще предстоит уточнить, поскольку минеральные удобрения и песчано-солевые смеси в пределах залесенного слабо освоенного водосбора не используются, а ближайшие промышленные предприятия располагаются более чем в 35 км от водоема. В озерах Белое (Лунинецкий район) и Свитязь относительно высокая минерализация воды вызвана их активным рекреационным использованием, а в оз. Белое (Полоцкий район) – более хорошей по сравнению с другими водоемами сельскохозяйственной освоенностью водосбора.

На рис. 4 отражена динамика показателей относительного содержания главных ионов в воде оз. Бредно. За последние 45 лет состав воды изменился. В 1978–2001 гг. вода относилась к сульфатному классу кальциевой группы, а в 2008 г. – к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. В 2013 г. состав воды соответствовал гидрокарбонатному классу магниевой группы. В данный момент вода относится к гидрокарбонатному классу кальциевой группы.

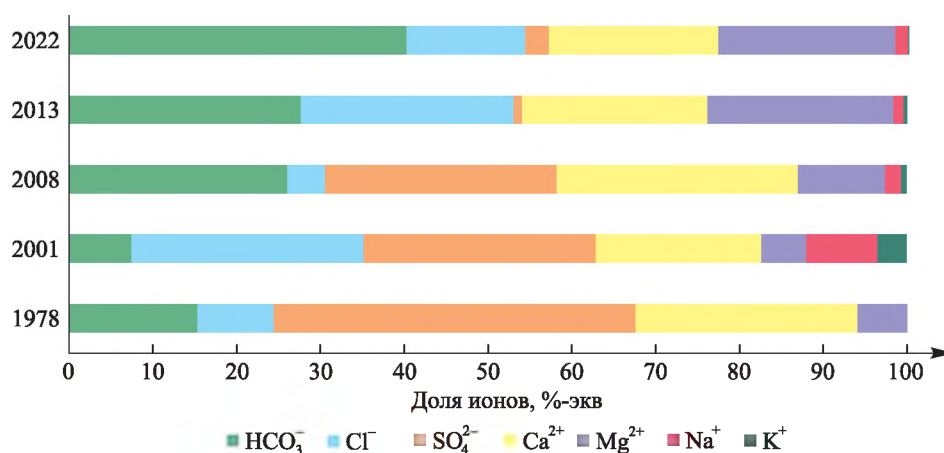


Рис. 4. Динамика показателей относительного содержания главных ионов в воде оз. Бредно с 1978 по 2022 г.

Fig. 4. The dynamic of indicators of the relative content of main ions in Bredno Lake from 1978 to 2022

За период изучения химического состава воды acidотрофных озер Беларуси значения минерализации воды в них увеличились. В оз. Бредно за 20 лет они возросли в 6 раз, в озерах Большое Островито, Белое (Полоцкий район) и Белое (Лунинецкий район) – примерно в 2 раза, а в оз. Свитязь – в 1,5 раза.

Показатели концентрации биогенных элементов в воде анализируемых озер существенно различаются. Значения содержания фосфат-иона во всех озерах, за исключением гипolimниона оз. Белое (Лунинецкий район), находились на уровне ниже чувствительности метода измерения. В оз. Белое (Лунинецкий район) они составили 0,021 мг/дм³. Показатель концентрации нитрит-иона не превысил порог чувствительности метода определения (0,003 мг/дм³) ни в одной точке отбора проб воды. Значения содержания нитрат- и аммоний-ионов в воде модельных acidотрофных озер Беларуси с июля по август 2022 г. приведены на рис. 5.

При достаточном количестве растворенного в воде кислорода преобладает нитратная форма азота, а при его дефиците – аммонийная. В исследуемых водоемах данная закономерность соблюдается. Так, в озерах Чербомысло, Белое (Полоцкий район), Глубокое и Ильгиния доминирует нитратная форма азота, а в остальных водоемах – аммонийная. В оз. Белое (Лунинецкий район) отмечено превышение значений предельно допустимой концентрации аммонийного азота для хозяйственно-питьевого водоснабжения в 1,6 раза, для рыборазведения в 6,3 раза. Основной причиной увеличения данного показателя является большой неконтролируемый поток отдыхающих, особенно в выходные дни. Превышения значений предельно допустимой концентрации нитратного азота обнаружено не было.

Величины водородного показателя в acidотрофных озерах Беларуси за период проведения полевых исследований менялись от 4,2 в оз. Глубокое до 8,4 в оз. Белое (Лунинецкий район) (рис. 6).

Изменение величин водородного показателя свидетельствует об ослаблении болотного питания изученных озер и переходе отдельных из них из acidотрофных водоемов в эвтрофные. В многолетнем

разреже наиболее сильный рост значений водородного показателя (с 6,5 в 1989 г. до 8,4 в 2022 г.) наблюдается в оз. Белое (Лунинецкий район). Это привело к резкому сокращению в водоеме площадей распространения полужника озерного, что говорит о трансформации озера из ацидотрофного состояния в эвтрофное. В зимний период 2023 г. значение водородного показателя снизилось до 5,4. Поскольку оз. Белое (Лунинецкий район) расположено южнее, чем остальные объекты настоящего исследования, его можно использовать в качестве модельного водоема при изучении трансформации лимносистем в условиях изменяющегося климата.

Интегральным показателем, позволяющим достаточно быстро визуально оценить экологическое состояние водоема, является прозрачность воды (рис. 7). Как правило, световодные ацидотрофные озера характеризуются высокой прозрачностью. Озера Белое (Полоцкий район) и Глубокое выделяются наибольшей для водоемов Беларуси прозрачностью, что свидетельствует о хорошем качестве их вод. Летом 2022 г. показатели прозрачности воды в объектах исследования колебались от 2,1 м в оз. Бредно до 6,5 м в оз. Белое (Полоцкий район). Наиболее высокая (9,5 м) прозрачность в вегетационный период была зафиксирована в оз. Глубокое 17 июня 1977 г., это является рекордной величиной для озер Беларуси.

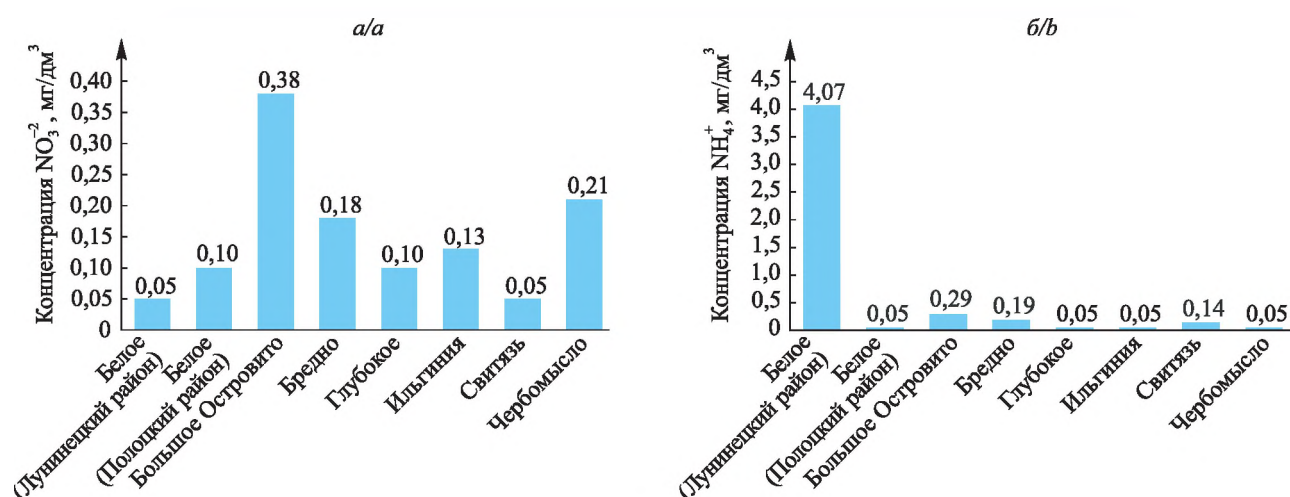


Рис. 5. Концентрация нитрат-ионов (а) и аммоний-ионов (б) в поверхностном слое воды исследуемых озер с июля по август 2022 г.

Fig. 5. Concentration of nitrate-ions (a) and ammonium-ions (b) in surface water layer of studied lakes from July to August 2022

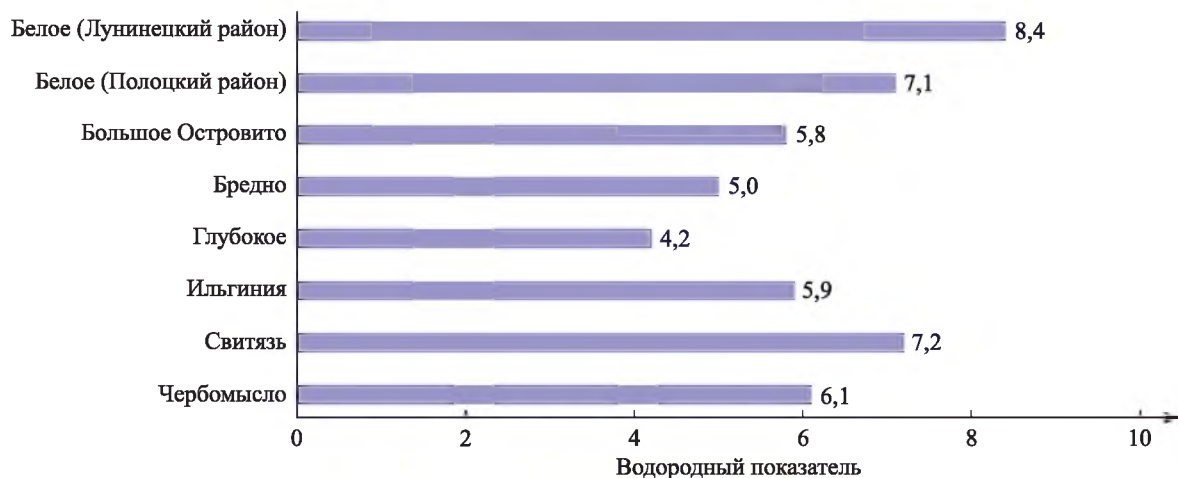


Рис. 6. Величины водородного показателя в воде исследуемых озер с июля по август 2022 г.

Fig. 6. Hydrogen index values in water of studied lakes from July to August 2022

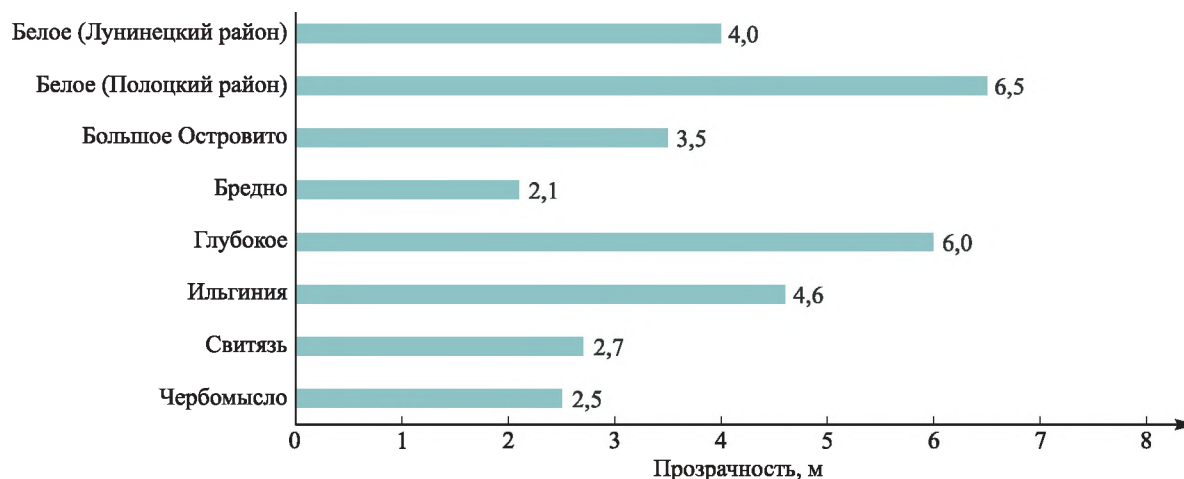


Рис. 7. Прозрачность воды, измеренная с помощью диска Секки, в исследуемых озерах с июля по август 2022 г.

Fig. 7. Transparency measured with a Secchi depth in studied lakes from July to August 2022

В зимний период из-за низких температур воды и короткого светового дня биомасса фитопланктона, как правило, снижается, что приводит к повышению прозрачности воды. Так, в оз. Белое (Полоцкий район) 16 февраля 2023 г. значение этого показателя достигало 10,0 м, а в оз. Свитязь 14 февраля 2023 г. – 4,2 м, что более чем в 1,5 раза выше прозрачности летом.

Наиболее существенное снижение прозрачности воды за период наблюдений произошло в оз. Свитязь (с 7,0 до 2,5 м), также сильно сократились эти показатели в озерах Глубокое (с 9,5 до 6,0 м) и Бредно (с 4,6 до 2,1 м). Рост прозрачности с 4,2 до 6,5 м отмечен в оз. Белое (Полоцкий район).

Цветность воды является важным показателем ее качества и определяется долей содержания в водоеме фульвокислот, соединений трехвалентного железа и гумусовых кислот. В открытой части водоемов у поверхности вода восьми исследованных озер Беларуси характеризуется низкой и очень низкой цветностью (от 5° до 50°). В придонном слое, а также у берегов, примыкающих к болотным массивам, цветность воды в периоды интенсивного болотного питания может быть несколько выше.

Для учета всего комплекса параметров, отражающих химический состав воды ацидотрофных озер Беларуси, выполнен кластерный анализ, который позволил разделить их на три кластера (рис. 8). В качестве входных данных использовались значения водородного показателя, цветности и прозрачности воды, а также концентрации главных ионов и биогенных элементов.

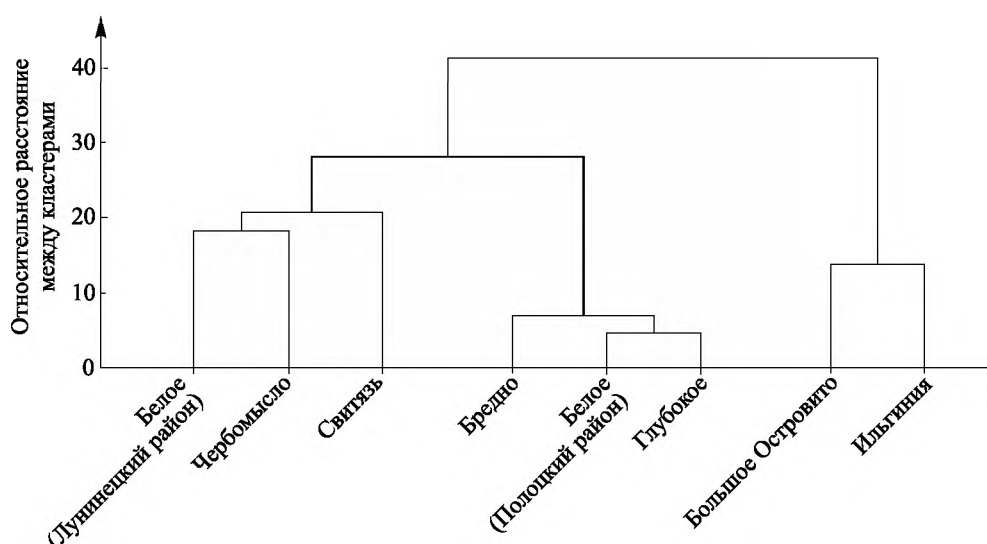


Рис. 8. Результаты кластерного анализа химического состава воды исследуемых озер

Fig. 8. The results of cluster analysis of chemical composition of water in studied lakes

Первый кластер образуют озера, подверженные антропогенному воздействию сильнее остальных водоемов (озера Белое (Лунинецкий район), Свитязь и Чербомысло). Второй кластер формируют озера, которые в большей степени отличаются ненарушенным химическим составом воды, однако испытывают влияние хозяйственной деятельности человека (озера Бредно, Белое (Полоцкий район) и Глубокое). Озера третьего кластера обладают составом воды, близким к естественному, поскольку они расположены в слабо освоенных и удаленных от поселений районах (оз. Большое Островито) либо в заповедной зоне Национального парка «Нарочанский» с ограничением хозяйственной деятельности (оз. Ильгиния).

Заключение

За прошедшие десятилетия химический состав водной массы кислототрофных озер Беларуси претерпел серьезные изменения. Большинство из исследованных в 2022 г. водоемов данного типа не являются классическими кислототрофными водоемами со значениями водородного показателя ниже 5,5. Как правило, они колебались в пределах 4,2–7,2. Реакция воды в оз. Белое (Лунинецкий район) была слабощелочной.

Увеличение минерализации воды, значений концентрации аммоний-иона, снижение показателей содержания кислорода, растворенного в водной массе, и прозрачности воды свидетельствуют об ухудшении экологического состояния кислототрофных озер Беларуси. Основной причиной таких изменений является хозяйственная деятельность человека. Рост числа отдыхающих на всех озерах, за исключением оз. Ильгиния, повлек за собой дополнительный приток биогенных элементов. Туристические стоянки и кемпинги, разбитые на озерах Чербомысло, Большое Островито и Глубокое, не оборудованы водонепроницаемыми выгребными ямами. Недостаточная информированность населения приводит к тому, что мытье посуды и выполнение гигиенических процедур с использованием синтетических поверхностно-активных веществ часто осуществляются многочисленными отдыхающими непосредственно в озерах.

Для предотвращения дальнейших негативных изменений в исследуемых озерах рекомендуется соблюдать режим охраны с ограничением использования водоемов в рекреационных целях путем регулирования численности отдыхающих. Кроме уменьшения антропогенной нагрузки в теплый период года, предлагается проведение аэрации водной массы глубоких озер для обогащения гипolimниона кислородом. В случае роста величин водородного показателя и достижения им значения выше 7,5 необходимо снизить уровень кислотности водоемов. Это позволит обезопасить представителей охраняемых видов макрофитов, зоопланктона и ихтиофауны.

Результаты проведенного исследования могут быть применены для управления водными экосистемами, при планировании их рационального использования, подготовке рекомендаций по восстановлению подобных водоемов, при оптимизации хозяйственной деятельности на водосборах озер, а также в образовательном процессе в целях обучения специалистов – гидрологов и гидроэкологов.

Библиографические ссылки

1. Larson DW. *On reconciling lake classification with the evolution of four oligotrophic lakes in Oregon* [dissertation]. Corvallis: Oregon State University; 1970. 145 p.
2. Александров БМ. К познанию малых озер южной Карелии в типологическом и гидробиологическом отношениях. *Труды Карельского отделения ГосНИОРХ*. 1968;5(1):246–256.
3. Hildrew AG. *Freshwater acidification: natural history, ecology and environmental policy*. Oldendorf: International Ecology Institute; 2018. 194 p.
4. Скадовский СН. Предварительное сообщение о результатах гидробиологического и физико-химического исследования Петровских озер Тверской губернии. В: Скадовский СН, редактор. *Применение методов физической химии к изучению биологии пресных вод*. Москва: Государственный институт народного здравоохранения; 1928. с. 215–239 (Труды Звенигородской гидрофизиологической станции Института экспериментальной биологии ГИНЗа).
5. Скадовский СН. Физико-химический режим Петровских озер и общее заключение. *Зоологический журнал*. 1933;12(3):3–34.
6. Комов ВТ, редактор. *Структура и функционирование экосистем кислотных озер*. Санкт-Петербург: Наука; 1994. 248 с. (Труды Института биологии внутренних вод имени И. Д. Папанина; выпуск 70 (73)).
7. Курлович НН. Новые местонахождения и основные условия произрастания полушника озерного в озерах Белоруссии. *Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География*. 1979;1:53–56.
8. Якушко ОФ. *Озероведение: география озер Белоруссии*. Минск: Вышэйшая школа; 1981. 223 с.
9. Власов БП. Особенности уникальных озер Беларуси как формирующая основа ресурсов реликтовых видов *Isoetes* L. и *Lobelia dortmanna* L. *Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География*. 2014;1:62–67.
10. Петрова МИ, Власов БП. Типизация озер Белорусского Поозерья на основании абиотических показателей. *Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География*. 2008;2:77–81.
11. Власов БП, Джус МА, Юхимук АН, Власова АБ. Реликтовый вид полушник озерный (*Isoetes lacustris* L.): интегральный подход к изучению и проблемы сохранения генетического ресурса вида в Беларуси. В: Национальный парк «Нарочанский». *Современное состояние и перспективы развития особо охраняемых природных территорий (ООПТ)*. Минск: Бинера; 2019. с. 175–181.

References

1. Larson DW. *On reconciling lake classification with the evolution of four oligotrophic lakes in Oregon* [dissertation]. Corvallis: Oregon State University; 1970. 145 p.
2. Alexandrov BM. [To the knowledge of small lakes in southern Karelia in typological and hydrobiological relations]. *Trudy Karel'skogo otdeleniya GosNIORKh*. 1968;5(1):246–256. Russian.
3. Hildrew AG. *Freshwater acidification: natural history, ecology and environmental policy*. Oldendorf: International Ecology Institute; 2018. 194 p.
4. Skadovskii SN. [Preliminary report on the results of hydrobiological and physico-chemical studies of the Petrovsky lakes of the Tver province]. In: Skadovskii SN, editor. *Primenenie metodov fizicheskoi khimii k izucheniyu biologii presnykh vod* [Application of methods of physical chemistry to the study of biology of freshwater water]. Moscow: Gosudarstvennyi institut narodnogo zdoravookhraneniya; 1928. p. 215–239 (Trudy Zvenigorodskoi gidrofiziologicheskoi stantsii Instituta eksperimental'noi biologii GINZa). Russian.
5. Skadovskii SN. [Physical and chemical regime of Petrovsky lakes and general conclusion]. *Zoologicheskii zhurnal*. 1933;12(3): 3–34. Russian.
6. Komov VT, editor. *Struktura i funkcionirovanie ekosistem atsidnykh ozer* [Structure and functioning of ecosystems of acid lakes]. Saint Petersburg: Nauka; 1994. 248 p. (Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod imeni I. D. Papanina; vypusk 70 (73)). Russian.
7. Kurlovich NN. [New locations and basic conditions for the growth of the lacustrine mulberry in the lakes of Belarus]. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 1979;1:53–56. Russian.
8. Yakushko OF. *Ozerovedenie: geografiya ozer Belorussii* [Lake science: geography of lakes in Belarus]. Minsk: Vyshejsheja shkola; 1981. 223 p. Russian.
9. Vlasov BP. Features of unique lakes of Belarus as forming basis of resources of relict species *Isoetes* L. and *Lobelia dortmanna* L. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 2014;1:62–67. Russian.
10. Petrova MI, Vlasov BP. The typification of Belarusian Poozerie's lakes. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 2008;2:77–81. Russian.
11. Vlasov BP, Dzhus MA, Yukhimuk AN, Vlasova AB. The relict species lake quillwort (*Isoetes lacustris* L.): an integrative approach to the study and problems of genetic resource of species conservation in Belarus. In: Narochansky National Park. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya osobo okhranyaemykh prirodnnykh territorii (OOPT)* [Current state and prospects for the development of specially protected natural areas (PNAs)]. Minsk: Biner; 2019. p. 175–181. Russian.

Получена 30.03.2023 / исправлена 19.09.2023 / принята 22.09.2023.
Received 30.03.2023 / revised 19.09.2023 / accepted 22.09.2023.

УДК 630*17:582.475(476)+630.18:630*56(476)

ИНДИКАЦИОННАЯ РОЛЬ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ОЦЕНКЕ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЯ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ

Е. В. МАТЮШЕВСКАЯ¹⁾

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

Изучены особенности реакции сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей на одном из верховых болот Белорусского Полесья, условия которого можно рассматривать как пессимальные по отношению к древесным насаждениям, на изменение регионального климата как ведущего экологического фактора. В качестве объекта исследования выступил сосняк багульниково-сфагновый. Предметом исследования явился абсолютный минимальный и максимальный радиальный прирост современных насаждений сосны в возрасте до 305 лет. Применялись основные методы, используемые в дендрохронологии и дендроклиматологии, – сопоставление и сравнительный анализ. Прослежена последовательность вероятной трансформации условий увлажнения и обводненности Белорусского Полесья в голоцене за период отсутствия инструментальных наблюдений за характеристиками климата (количеством солнечной радиации, температурой воздуха, объемом осадков), а также по данным наиболее длинной метеостанции региона (Василевичи). Установлено, что изменение природных условий, обусловленное влиянием естественных и антропогенных (осушительная мелиорация) факторов и выражающееся в трансформации эдафогидрологической обстановки, проявляется в разнонаправленной динамике радиального прироста насаждений сосны, размещенной на верховом болоте.

Ключевые слова: Белорусское Полесье; верховое болото; сосна; сосновый биоценоз; радиальный прирост; изменение климата; мелиорация.

INDICATIVE ROLE OF PINE RADIAL GROWTH FOR ASSESSING THE DYNAMICS OF THE STATE OF UPLAND BOGS BELARUSIAN POLESIE

K. V. MATSIUSHEUSKAYA^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

The aim of the study was to investigate the peculiarities of the reaction of pine trees (*Pinus sylvestris* L.) growing in one of the upland bogs in the Belarusian Polesie, the conditions of which can be regarded as pessimal in relation to tree plantations, to the change of regional climate as a leading environmental factor. The object of the study was a pine-le-dum-sphagnum forest. The subject of the study was the absolute minimum and maximum radial growth of currently growing pine stands aged up to 305 years. The main methods used in dendrochronology and dendroclimatology (the method

Образец цитирования:

Матюшевская ЕВ. Индикационная роль радиального прироста сосны обыкновенной в оценке динамики состояния верховых болот Белорусского Полесья. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2023; 2:70–79.
EDN: XLPGTE

For citation:

Matsiusheuskaya KV. Indicative role of pine radial growth for assessing the dynamics of the state of upland bogs Belarusian Polesie. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2023;2:70–79. Russian.
EDN: XLPGTE

Автор:

Екатерина Викторовна Матюшевская – кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой физической географии мира и образовательных технологий факультета географии и геоинформатики.

Author:

Katsiaryna V. Matsiusheuskaya, PhD (geography), docent, head of the department of physical geography of the world and educational technologies, faculty of geography and geoinformatics.
katerina.vm@gmail.com

of comparison and comparative analysis) were applied to achieve the goal. The sequence of probable changes in hydration and watering conditions in Belarusian Polesie in the Holocene was traced for the period of absence of instrumental observations of climate characteristics (amount of solar radiation, air temperature, precipitation) and according to the data of the longest meteorological station in the region (Vasilevichi). It was established that the change in natural conditions of the region, caused by the influence of natural and anthropogenic (drainage reclamation) factors, expressed in the change of edaphohydrological conditions, is manifested in the multidirectional dynamics of wood diameter growth in pine stands growing in the upland bog.

Keywords: Belarusian Polesie; upland bog; pine; pine biocenosis; tree-ring growth; climate change; drainage melioration.

Введение

Для устойчивого и рационального использования лесных ресурсов такого напряженного с экологической точки зрения региона, как Белорусское Полесье, необходимо учитывать как естественную, так и обусловленную хозяйственной деятельностью человека динамику природных условий. Объективная, полная и достоверная оценка последствий крупномасштабных сплошнолесосечных рубок и осушительной мелиорации, обеспечение стабильного функционирования природных болотных комплексов требуют привлечения информации о состоянии верховых болот, регулирующих водный режим сопредельных лесных ландшафтов, которые размещаются на песчаной литологической основе, характерной для Белорусского Полесья. Мониторинг состояния верховых болот стал особенно актуален в обстоятельствах, когда на фоне современных изменений климата увеличивается прямая и косвенная антропогенная нагрузка на биоценозы.

Реакция лесных сообществ на трансформацию климата в региональном масштабе может выступать в качестве индикатора глобальных перестроек природной среды. Древесные растения, как достаточно долгоживущие организмы со сложными механизмами физиологического регулирования жизнедеятельности в изменчивых условиях обитания, благодаря наличию годичных колец древесины, в которых фиксируются экологические данные, являются наиболее информативным объектом для оценки таких процессов. Наиболее актуальным представляется изучение природных экосистем в пессимальных условиях, при которых даже малоамплитудное колебание метеорологических параметров (температуры воздуха и объема осадков) может привести к существенным трансформациям в жизнедеятельности растений.

Пессимальные экологические условия, в которых находятся насаждения сосны, произрастающей на верховых болотах (гидрофильность, бедность, кислотность и низкая температура субстрата (торфа) в период вегетации растений), определяют основные параметры годичного кольца древесины. По этим причинам Т. Т. Битвинскас считал, что угнетенность сосны служит препятствием для выполнения дендроклиматических исследований на верховых болотах [1]. При проведении подобных изысканий на территории Беларуси А. И. Русаленко рекомендовал анализировать крупномерные редкостойные деревья, произрастающие на минеральных почвах [2]. Л. П. Смоляк показал, что радиальный прирост сосны, расположенной на верховых болотах, после трансформации их водных условий в результате осушительной мелиорации меняется незначительно [3].

Многочисленные дендроклиматические исследования, проведенные в России, США и странах Европы и базирующиеся на изучении радиального прироста деревьев, имеют достаточно длительную историю не только в связи с изменением климата, но и из-за необходимости преодоления регулярно возникавших проблем деградации лесов [4–17]. В дендроклиматологии начиная с работы основоположника географии растений в России А. Н. Бекетова [18] утвердилось представление о том, что главными факторами, влияющими на состояние древостоя и его радиальный прирост, являются климатические факторы – температура воздуха и объем осадков. Наиболее плодотворными в этом отношении были изыскания американских естествоиспытателей А. Е. Дугласа [19] и Г. С. Фритса [20], осуществленные в 1914–1941 и 1955–1974 гг. соответственно. Они окончательно определили основной принцип дендроклиматологии – принцип лимитирующего фактора. Дендроклиматические исследования в Беларуси проводились В. Н. Киселевым и К. Д. Чубановым одновременно с изучением особенностей воздействия антропогенных факторов на лесные экосистемы [21]. Л. П. Смоляк, А. А. Болботунов и В. С. Романов проанализировали специфику влияния рельефа и глубины залегания грунтовых вод в песчаных эдафотопях на радиальный прирост насаждений сосны в различных климатических условиях [22]. Е. Г. Петров учитывал погодноклиматические факторы при определении водного режима песчаных почв под ценозами сосны [23]. Динамика радиального прироста сосны обыкновенной в биогеоценозах Беларуси методами дендроклиматического мониторинга изучалась А. Е. Яротовым¹. В результате исследований, проведенных

¹Яротов А. Е. Динамика радиального прироста сосны обыкновенной в биоценозах на территории Беларуси : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.23. Минск, 2008. 23 с.

В. Н. Киселевым и Е. В. Матюшевой, установлена неоднозначность реакции деревьев (ели, сосны и дуба) на один и тот же климатический фактор (температуру воздуха или объем осадков) [24], притом что разные по природе воздействия экологические факторы (климатические и антропогенные (техногенное загрязнение, водоземельная мелиорация)) способны сходным образом отражаться на текущем радиальном приросте, в частности приводить к его депрессии. Фактор не может быть лимитирующим на протяжении всего развития современных поколений древостоя, и его влияние на тот или иной экотоп проявляется в определенные временные отрезки, различающиеся по климатическим показателям [25].

Использование данных о радиальном приросте сосны в экстремальных экологических условиях верхового болота позволяет выявить причины временной изменчивости состояния и стволовой продуктивности лесных ценозов и оценить качество среды обитания данной древесной породы. Цель исследования – изучение особенностей реакции сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей на одном из верховых болот Белорусского Полесья, условия которого можно рассматривать как пессимальные по отношению к древесным насаждениям, на изменение регионального климата как ведущего экологического фактора. Для достижения поставленной цели применялись основные методы, используемые в дендрохронологии и дендроклиматологии, – сопоставление и сравнительный анализ.

Материалы и методы исследования

Представители вида *P. sylvestris* L., имеющие, по-видимому, наибольший среди сосен Белорусского Полесья возраст, были обнаружены на верховом болоте, которое расположено в овальном замкнутом понижении поперечником до 1,5 км севернее д. Круки (Светлогорский район, Гомельская область) в междуречье рек Березины и Птичи, находящемся вне зоны влияния мелиоративных работ на режим грунтовых вод.

Тип леса – сосняк багульниково-сфагновый. Источником фактических данных о динамике ширины годичного кольца древесины выступили мастер-хронологии стволовой продуктивности современных поколений сосны, которые получены в результате полевых исследований, проведенных по общепринятой, адаптированной к условиям Беларуси методике. Образцы древесины (керны) отбирались с применением возрастного бурава на высоте 1,3 м (у деревьев, расположенных на верховых болотах, на высоте 0,5 м). Как показал опыт дендроклиматических исследований, достаточно не менее 10 образцов древесины для получения надежной осредненной информации о радиальном приросте. Выделены пять возрастных серий (85, 115, 140, 250 и 305 лет) с 10–20 деревьями в каждой из них. Для анализа и обобщения его результатов учитывался минимальный и максимальный радиальный прирост каждой возрастной серии.

Участки верхового болота занимают овальные в плане, бессточные мезопонижения поперечником от 0,5 до 1,5 км. Отбор образцов торфа для определения его ботанического состава выполнен полойно с интервалом 10 см. В строении торфяной залежи, отражающей этапы изменения природной среды региона в голоцене, выделяются несколько горизонтов: верховое болото (0,1–0,9 м, ангустифолиум-торф) → переходное болото (0,9–1,5 м, пушицевый и пушицево-сфагновый торф) → низинное болото (1,5–1,8 м, тростниково-осоковый торф с корой ольхи) → верховое болото (1,8–2,5 м, ангустифолиум-торф, шейхцериво-сфагновый торф) → переходное болото (2,5–3,0 м, шейхцериво-сфагновый торф). Тростниково-осоковое низинное болото могло появиться внутри верхового болота при трансформации химического состава питающих вод. В замкнутой малоразмерной котловине такое событие в торфогенезе возможно только при длительном затоплении прилегающих территорий [26].

В условиях сезонной ритмики умеренного пояса на радиальный прирост древесных растений в течение их онтогенеза одновременно воздействуют многие экологические факторы. Скрытая в динамических сериях годичных колец информация помогает принимать решения в области использования природных ресурсов и охраны окружающей среды, а также выступает как вероятный показатель изменений климатической ситуации.

Это обстоятельство позволило проанализировать многолетние колебания радиального прироста современных поколений ели и сосны за период, когда инструментальные наблюдения еще не проводились, и за время выполнения измерений на метеостанциях Беларуси. Наиболее информативным и единственно доступным способом выявления динамики климатических условий явилось изучение радиального прироста великовозрастных деревьев.

Результаты метеорологических наблюдений, проведенных на конкретных метеостанциях, отражают не только региональную, но и мировую динамику климата. Для дендрохроноклиматических исследований важность представляет анализ изменений основных метеорологических показателей, определяющих первичную продуктивность древесины (в данном случае ширину ее годичного кольца), – температуры воздуха и объема осадков. Наибольшее значение для настоящего исследования имели непрерывные наблюдения за температурой воздуха на метеостанции Василевичи начиная с 1881 г. Кроме того, были привлечены сведения о климате Белорусского Полесья и сопредельных территорий за период с 1875 г., а именно данные о температуре воздуха и объеме осадков, зафиксированные на метеостанциях Горки, Василевичи и Пинск за 1875–1897 гг. [27].

Результаты и их обсуждение

Оценка экологических последствий крупномасштабной осушительной мелиорации на территории Белорусского Полесья некорректна без учета естественной ритмики увлаженности этого региона в результате трансформации климатических условий. Такая ритмика является причиной изменчивости состояния лесных экосистем (в данном случае лесного верхового болота), определяемой глубиной залегания грунтовых вод вне зоны вероятного влияния мелиоративных систем на их уровненный режим.

Несмотря на значительную удаленность территории Белорусского Полесья от районов активного вулканизма, последствия воздействия вулканического аэрозоля на характеристики атмосферы прослеживаются в реакции годовичного кольца древесины. После интенсивных вулканических извержений условия, изначально неблагоприятные для сосны, размещенной на верховом болоте, могут приобретать экстремальный характер (понижение температуры воздуха, увеличение количества осадков). Крупные извержения вулканов в Северном полушарии вызывают снижение температуры воздуха и ведут к депрессии радиального прироста древесных растений на севере Евразии². Обнаружение вулканического сигнала обеспечивает полноту анализа природных факторов возникновения экологических и природо-ресурсных проблем в состоянии лесных насаждений [28].

Многолетняя погодичная изменчивость минимального индивидуального радиального прироста исследованных возрастных серий сосны, расположенной на верховом болоте, на котором наблюдается естественный ход развития древостоя, детально отражает жизненное состояние древостоя в зависимости от его возраста (рис. 1).

Территория Белорусского Полесья принадлежит южной теплой неустойчиво-влажной агроклиматической зоне. Результаты наблюдений, которые проводились на метеостанции Василевичи (52,28° с. ш., 29,60° в. д.), расположенной в центральной части Припятского Полесья, позволяют установить климатические условия нарастания стволовой массы сосны, размещенной на верховом болоте. Соответствующие данные представлены в таблице. В процессе изменения климатических условий исследуемой территории выделяются следующие временные отрезки: период 1879–1906 гг. – неустойчиво-влажная, относительно прохладная первая фаза первой климатической эпохи со среднегодовым объемом осадков 617 мм при среднегодовой температуре воздуха 6,2 °С; период 1907–1940 гг. – влажная, относительно теплая вторая фаза первой климатической эпохи со среднегодовым количеством осадков 715 мм при среднегодовой температуре воздуха 6,4 °С; период 1941–1976 гг. – неустойчиво-влажная, относительно прохладная первая фаза второй климатической эпохи со среднегодовым объемом осадков 603 мм при среднегодовой температуре воздуха 6,8 °С; период 1977–2006 гг. – влажная, относительно теплая вторая фаза второй климатической эпохи со среднегодовым количеством осадков 643 мм при среднегодовой температуре воздуха 6,8 °С.

В начале своего развития (с 1764 по 1787 г.) в климатических условиях, свойственных европейской территории, поколение 250-летних сосен находилось в состоянии постоянного угнетения (радиальный прирост 0,5–0,1 мм). С XVIII в. отмечался рост числа проявлений западной формы циркуляции воздушных масс с общим преобладанием восточной и меридиональной форм циркуляции воздушных масс, что способствовало увеличению влажности воздуха и повторяемости морозных дней и, соответственно, развитию ледников. Около 1720 г. зафиксированы значительные движения ледников в Альпах и Скандинавии. В Северной Европе, а именно в Исландии, особенно мощным было их наступление в 1740–50-х гг. В этот период общая повторяемость числа проявлений меридиональной и восточной форм циркуляции воздушных масс еще превышала повторяемость количества проявлений западной формы циркуляции воздушных масс. В течение 1760–90-х гг. продолжалось прогрессирование альпийских ледников, максимум их распространения был достигнут в 1820 г. Это последнее глобальное перемещение горных ледников на территории Европы ознаменовало конец малого ледникового периода. В указанное время отмечался интенсивный рост числа проявлений западной формы циркуляции воздушных масс с сохранением большой повторяемости количества проявлений меридиональной формы циркуляции воздушных масс. Сочетание данных форм циркуляции воздушных масс способствовало повышению влажности воздуха, установлению зимних холодов и прохладного лета [29; 30].

В 1774–1785 гг. после взрыва вулкана Пападаян на о. Ява в 1772 г. и извержения европейского вулкана Везувий в 1779 г. поколение 250-летних сосен находилось на грани выживания (радиальный прирост 0,05 мм). Наибольшее ухудшение лесорастительных условий на верховом болоте и, следовательно, жизненного состояния сосны, достигшей 20 лет, сопутствовало одним из самых мощных за минувшие 1000 лет извержениям вулканов Лаки и Гримсвотн, которые расположены на о. Исландия, в 1783–1784 гг. В течение следующих 2–3 лет температура воздуха в Северном полушарии снизилась на 1,3 °С. Эти извержения вызвали неурожай и голод во многих европейских странах накануне Великой французской революции 1789–1794 гг. Тонкий слой пепла присутствовал над большей частью территории Евразии, вплоть до Китая [31].

²Волкова Е. М. Морфолого-биологические особенности и изменчивость сосны обыкновенной, произрастающей в условиях олиготрофных болот средней и южной тайги : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.05. М., 2000. 24 с.

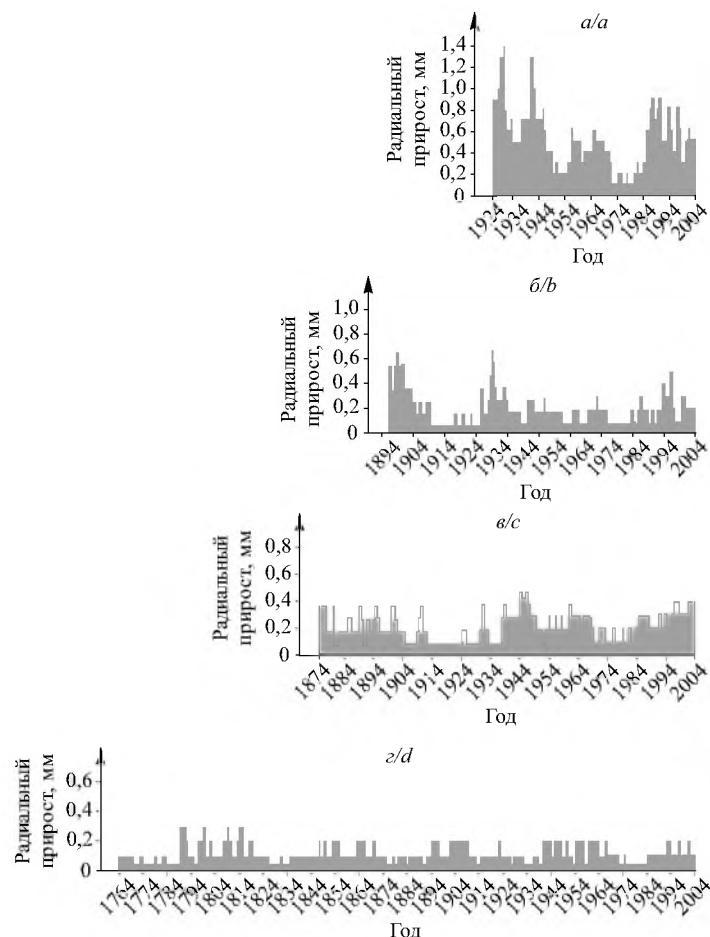


Рис. 1. Многолетний погодичный ход изменчивости минимального индивидуального радиального прироста возрастных серий сосны на территории верхового болота Круки:
а – 85 лет; б – 115 лет; в – 140 лет; г – 250 лет

Fig. 1. Multiyear course of variability of minimum individual tree-ring growth of pine trees age series of on the upland bog Kruki:
а – 85 years; б – 115 years; в – 140 years; г – 250 years

**Показатели изменчивости климата по данным наблюдений,
проведенных на метеостанции Василевичи, за период с 1879 по 2006 г.**

**Indicators of climate variability based on observations
carried out at the meteorological station Vasilevichi from 1879 to 2006**

Период	Температура воздуха, °С				Объем осадков, мм			
	Май – июнь	Май – сентябрь	Октябрь – апрель	В среднем за год	Май – июнь	Май – сентябрь	Октябрь – апрель	В среднем за год
<i>Первая климатическая эпоха</i>								
1879–1906	15,4	15,7	–0,6	6,2	149	367	296	617
1907–1940	15,3	15,6	–0,3	6,4	144	384	324	715
<i>Вторая климатическая эпоха</i>								
1941–1976	15,4	15,8	–0,5	6,3	126	318	285	603
1977–2006	15,5	15,8	0,4	6,8	141	374	269	643

Наращение стволовой массы деревьев активизировалось в 1790–1815 гг. В дальнейшем быстрые темпы увеличения радиального прироста до максимальных значений (3,9 мм к 1790 г.) и высокая стволовая продуктивность сосны сохранялись достаточно длительное время, несмотря на погодно-климатические условия (включая период 1809–1812 гг. с крайне низкими зимними температурами воздуха).

Очевидно, начиная с середины XIX в. усилилось направленное уменьшение стволовой продуктивности сосны в контрастных погодных условиях. Засухи 1839, 1868 и 1874 гг. чередовались с наводнениями,

особенно сильными из которых являлись наводнения 1845 и 1861 гг. До 1845 г. высокие значения радиального прироста были свойственны насаждениям сосны, размещенной на верховых болотах не только Белорусского Полесья (болота Красная корчма (Светлогорский лесхоз) и Перуново (Брестский лесхоз), Выгонощанский болотный массив (Ганцевичский лесхоз)), но и средней полосы Беларуси (болота Дубовый лог (Червенский лесхоз), Прошицкое (Крупский лесхоз)), а также Белорусского Поозерья (болото Мох (Дисненский лесхоз)). Сосняк мшистый, произрастающий на кварцевых песках Светлогорского лесхоза, и 190-летние сосны, сохранившиеся в парке культуры и отдыха имени 50-летия Великого Октября (Минск), имели высокие показатели радиального прироста именно в эти годы. Большая стволовая продуктивность, выявленная дендрохронологическим методом, в данный период отмечена у 250-летних дубов и 245-летних сосен [28]. Можно говорить об общей значительной стволовой продуктивности сосны в конце XVIII и начале XIX в. независимо от ее местонахождения и условий произрастания на всей территории Беларуси. Наиболее вероятной причиной этого послужил пепел извергавшегося вулкана Лаки, распространившийся над всей территорией Евразии. Именно он мог явиться удобрением для лесного покрова Беларуси, находящейся в центральной части европейского субконтинента [32].

Дальнейшее продолжительное экстремальное угнетение сосны, размещенной на верховом болоте, которое выразилось в предельно низком радиальном приросте (0,05 мм), вызвано климатическими условиями, возникшими после окончания малой ледниковой эпохи. На них кратковременно влияли крупнейшие вулканические извержения. Сопоставление временных отрезков, на протяжении которых происходил наименьший радиальный прирост 305-летней сосны, с периодами вулканической активности указывает на то, что подобное вполне вероятно [32].

Многолетний погодичный ход изменчивости максимального индивидуального радиального прироста возрастных серий сосны, расположенной на верховом болоте, отражает потенциальные продукционные возможности для нарастания стволовой массы в условиях изменения метеорологических величин (рис. 2).

Подавленное жизненное состояние древостоя до 1785 г. отражено в депрессии максимального, как и минимального, радиального прироста возрастных серий сосны в тех природных условиях, которые сложились к этому времени, т. е. в условиях так называемой великой зимы 1781–1782 гг. [32].

В 1809 г. взорвался безымянный сильный тропический вулкан. Последовавшее за этим охлаждение атмосферы было многократно усилено извержением индонезийского вулкана Тамбора в 1815 г., что вызвало экстремально холодную погоду. В древесно-кольцевой хронологии поколения 250-летних сосен холодный всемирный климат отмечен в 1814–1819 гг. депрессией радиального прироста. В 1831–1835 гг. она последовала за извержением центральноамериканского вулкана Косигуина.

Снижение максимального радиального прироста после 1852 г. было приурочено к началу наибольшего похолодания, сопровождавшегося непрерывными холодными дождями, на территории Восточно-Европейской равнины в малый ледниковый период.

В XX в. возникли более благоприятные условия, менее осложненные вулканическими событиями, для сосны, размещенной на верховом болоте, без антропогенного вмешательства в его естественный ход развития. Возможность реализации ею продукционного потенциала в нарастании стволовой массы увеличилась. У возрастных серий сосны, достигшей 140, 115 и 85 лет, показатели среднего годичного радиального прироста (0,37; 0,43 и 0,72 мм соответственно) оказались больше, чем аналогичное значение у поколения 250-летних сосен (0,34 мм).

Такая активизация в нарастании стволовой массы могла произойти в изменившихся водных условиях верхового болота (снижение его обводненности в результате так называемого общего осушения 1873–1898 гг., которое осуществлялось согласно Генеральному плану осушения Полесья, разработанному И. И. Жилинским). За 25 лет деятельности Западной экспедиции по осушению болот выполнены осушительные работы на территории площадью 1,5 млн десятин, расширены 127 верст малых рек и прорыты 4367 верст каналов. Хотя исследованное верховое болото не осушалось, оно оказалось на территории общего осушения, что не могло не сказаться на состоянии этого болота. Следовательно, его лесорастительные условия улучшились.

В 1898 г. после прекращения работы Западной экспедиции по осушению болот обводненность Белорусского Полесья уменьшилась. В экологическом отношении это оказалось значимым фактором при дальнейших водно-земельных мелиорациях.

Максимальный индивидуальный радиальный прирост древостоя в исследованных поколениях сосны, размещенной на верховом болоте, как и у насаждений сосны, расположенной на песчаных автоморфных и полугидроморфных почвах Белорусского Полесья, как правило, не имел одногодичной календарной привязки и менялся во времени. По этой причине сроки подавления продукционного потенциала сосны в нарастании стволовой массы в годы с повышенной увлажненностью не всегда совпадали.

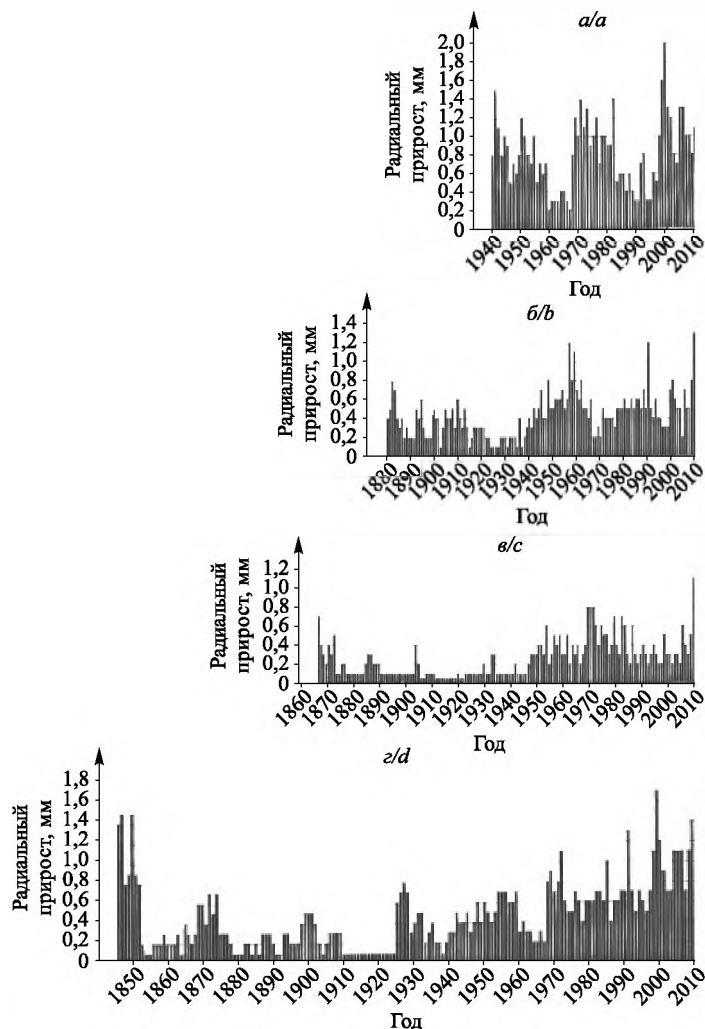


Рис. 2. Многолетний погодичный ход изменчивости максимального индивидуального радиального прироста возрастных серий сосны на территории верхового болота Круки:
а – 65 лет; б – 115 лет; в – 140 лет; г – 170 лет

Fig. 2. Multiyear course of variability of maximum individual tree-ring growth of pine trees age series of on the upland bog Kruki:
а – 65 years; б – 115 years; в – 140 years; г – 170 years

В 1914 г., когда среднегодовое количество осадков составило 828 мм, а количество осадков за вегетационный период – 457 мм, депрессия радиального прироста случилась у поколения 115-летних сосен. Аномально суровые зимние холода негативно отразились на радиальном приросте поколений 140- и 115-летних сосен. Угнетение поколения 85-летних сосен также вызвано аномальным количеством осадков в 1953 г., когда их среднегодовой объем достиг 905 мм, а объем осадков за период с мая по сентябрь – 527 мм.

После 1974 г., отличавшегося большой увлажненностью вегетационного периода (количество осадков в это время составило 422 мм при среднегодовом объеме осадков 618 мм), не последовало продолжительного снижения качества жизненного состояния трех поколений сосен. Эта тенденция сохранялась и после 1977 г., когда количество осадков за период с мая по сентябрь достигло 449 мм при среднегодовом объеме осадков 707 мм. На угнетенное состояние древостоя не влияло затопление болота во время осенне-зимнего наводнения 1974–1975 гг. и весеннего паводка 1975 г., в результате которых под водой оказались обширные низменные пространства Белорусского Полесья. Только после 1980 г. (среднегодовой объем осадков составил 735 мм, а объем осадков за вегетационный период – 496 мм), когда произошло извержение вулкана Сент-Хеленс, началось постепенное снижение стволовой продуктивности поколений 140- и 85-летних сосен. В засушливом, 1963-м, году (среднегодовое количество осадков равнялось 416 мм, количество осадков за период с мая по июнь – 63 мм, а за период с мая по сентябрь – 169 мм), когда извергался вулкан Агунг, радиальный прирост сосны, расположенной на верховом болоте, достиг, по всей видимости, минимальных возможных значений (0,2–0,3 мм).

Дендрокольцевые хронологии сосны на верховых болотах включают летопись лесных пожаров, которые на территории Белорусского Полесья в историческом прошлом и после осушительной мелиорации приобретали опустошительный масштаб. Дендрохронологический анализ многолетней динамики минимального радиального прироста сосны, размещенной на верховом болоте, позволил установить последовательность фиксированных пожаров во времени (1839, 1868, 1881, 1925, 1959, 1986, 2007) [31].

Заключение

Многолетний ход изменчивости максимального и минимального радиального прироста отражает сложный, в отдельные временные отрезки циклический характер реализации сосной своего продукционного потенциала. Цикличность радиального прироста, по-видимому, отличается спонтанностью, в условиях относительного постоянства экологической обстановки он не подвергался прямому мелиоративному воздействию верхового болота на общем фоне современных климатических изменений. Неблагоприятные условия для сосны, расположенной на верховом болоте, приобретают экстремальный характер (понижение температуры воздуха, увеличение объема осадков) после мощных вулканических извержений. Влияние вулканического сигнала на изменчивость годового кольца древесины способствует корректной интерпретации экологических и природоресурсных проблем, возникновение которых обусловлено возрастающей и разнонаправленной антропогенной нагрузкой на биоценозы с учетом существующей естественной динамики природной среды, и их прогнозированию.

Библиографические ссылки

1. Битвинскас ТТ. *Дендроклиматические исследования*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1974. 172 с.
2. Русаленко АИ. *Годичный прирост деревьев и влагообеспеченность*. Минск: Наука и техника; 1986. 238 с.
3. Смоляк ЛП. *Болотные леса и их мелиорация*. Юркевич ИД, редактор. Минск: Наука и техника; 1969. 209 с.
4. Матюшевская ЕВ, Яротов АЕ. Жизненные формы сосны *Pinus sylvestris* на верховых болотах Белорусского Полесья. В: Воробьев ДС, редактор. *Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию НИЛ экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики БГУ; 9–11 ноября 2022 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2022. с. 139–142.
5. Ваганов ЕА, Плешиков ФИ. Система мониторинга лесов как основа их рационального использования и устойчивого развития. *Сибирский экологический журнал*. 1998;5(1):3–8.
6. Auclair AND, Lill JT, Revenga C. The role of climate variability and global warming in the dieback of Northern Hardwoods. *Water, Air and Soil Pollution*. 1996;91(3–4):163–186.
7. Boryczka J, Stopa-Boryczka M. Natural and anthropogenic changes of climatic in Europe. *Acta Universitatis Carolinae. Geographica*. 1997;32:57–64.
8. Fisher M. Decline in the juniper woodlands of Raydah Reserve in southwestern Saudi Arabia: a response to climate changes? *Global Ecology and Biogeography Letters*. 1997;6(5):379–386. DOI: 10.2307/2997338.
9. Holtmeier F-K. *Mountain timberlines: ecology, patchiness, and dynamics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2003. 369 p. (Advances in Global Change Research; volume 14).
10. Hüttl RT, Schneider BU, Farrell EP. Forests of the temperate region: gaps in knowledge and research needs. *Forest Ecology and Management*. 2000;132(1):83–96. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00381-9.
11. Gramer H, Gramer-Middendorf M. Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Schadensperioden und Klimafaktoren in mitteleuropäischen Forsten seit 1851. *Pflanzenschutz Nachrichten Bayer*. 1984;37(2):208–334.
12. Korpel S. Dinamika prirodneho smrekoveho lesa v zapadnych Tatrach na priklade SPR Kotlový Zlab. *Zborník prac o Tatranskom narodnom parku*. 1993;33:193–225.
13. Kullman L. Recent cooling and recession of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in the forest-alpine tundra ecotone of the Swedish Scandes. *Journal of Biogeography*. 1996;23(6):843–854.
14. Lebourgeois F. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring widths of Corsican pine from western France. *Annals of Forest Science*. 2000;57(2):155–164. DOI: 10.1051/forest:2000166.
15. Parmesan C, Yoho G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*. 2003;421:37–42. DOI: 10.1038/nature01286.
16. Schweingruber F. *Tree-rings and environment. Dendroecology*. Berne: Paul Haupt; 1996. 609 p.
17. Treter U. Dendroökologische Untersuchungen in Flechten-Fichten-Waldland in Zentral-Labrador (Ungava, Kanada). *Heidelberger Geographische Arbeiten*. 1996;104:529–542.
18. Бекетов АН. О влиянии климата на возрастание сосны и ели. В: Бекетов АН, редактор. *Труды Первого съезда русских естествоиспытателей в Санкт-Петербурге, происходившего с 28 декабря 1867 по 4 января 1868 г. Отделение ботаники*. Санкт-Петербург: Типография Императорской академии наук; 1868. с. 111–163.
19. Douglass AE. *Tree-rings and chronology*. Tucson: University of Arizona; 1937. 36 p. (University of Arizona Bulletin; volume 8, No. 4).
20. Fritts HC. *Tree-rings and climate*. London: Academic Press; 1976. 567 p.
21. Киселев ВН, Чубанов КД. *Ландшафтно-экологические исследования Белорусского Полесья*. Минск: Наука и техника; 1979. 104 с.
22. Смоляк ЛП, Болботунов АА, Романов ВС. Влияние рельефа на изменчивость радиального прироста сосны. В: Кайрюкшис ЛА, редактор. *Дендрохронология и дендроклиматология*. Новосибирск: Наука; 1986. с. 114–122.

23. Петров ЕГ. *Водный режим и продуктивность лесных фитоценозов на почвах атмосферного увлажнения*. Минск: Наука и техника; 1983. 213 с.
24. Киселев ВН, Матюшевская ЕВ. *Экология ели*. Логинов ВФ, редактор. Минск: БГУ; 2004. 217 с.
25. Киселев ВН, Матюшевская ЕВ, Яротов АЕ, Митрахович ПА. *Хвойные леса Беларуси в современных климатических условиях (дендроклиматический анализ)*. Киселев ВН, редактор. Минск: Право и экономика; 2010. 202 с.
26. Демаков ЮП. *Диагностика устойчивости лесных экосистем (методологические и методические аспекты)*. Йошкар-Ола: Периодика Марий Эл; 2000. 416 с.
27. Воейков АИ. Климат Полесья. В: Жилинский ИИ, составитель. *Приложения к очерку работ Западной экспедиции по осушению болот, 1873–1892 гг.* Санкт-Петербург: Издание Министерства земледелия и государственных имуществ; 1899. с. 1–132.
28. Киселев ВН, Матюшевская ЕВ, Яротов АЕ, Митрахович ПА. Особенности радиального прироста сосны на верховых болотах Белорусского Полесья. *Весті БДПУ. Серія 3, Фізика. Математика. Інформатика. Біологія. Географія*. 2010;3:35–39.
29. Боков ВН, Воробьев ВН. Изменчивость атмосферной циркуляции и изменение климата. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2010;13:83–88.
30. Гирс АА. *Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные метеорологические прогнозы*. Ленинград: Гидрометеониздат; 1971. 280 с.
31. Матюшевская ЕВ. *Факторы изменчивости радиального прироста деревьев*. Киселев ВН, редактор. Минск: БГУ; 2017. 231 с.
32. Матюшевская ЕВ, Дорошко НВ. Вулканические извержения как фактор изменчивости стволовой продуктивности сосны на верховых болотах Беларуси. В: Фаргышев АН, редактор. *Сибирь и Дальний Восток России в формирующемся пространстве Большой Евразии. Материалы XX юбилейной научной конференции (с международным участием) молодых географов Сибири и Дальнего Востока; 24–29 мая 2021 г.; Иркутск, Россия*. Иркутск: Издательство Института географии имени В. Б. Сочавы СО РАН; 2021. с. 60–63.

References

1. Bitvinskas TT. *Dendroclimatic studies*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1974. 172 p. Russian.
2. Rusalenko AI. *Godichnyi prirost derev'ev i vlagoobespechennost'* [Annual growth of trees and moisture availability]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1986. 238 p. Russian.
3. Smolyak LP. *Bolotnye lesa i ikh melioratsiya* [Swamp forests and their reclamation]. Yurkevich ID, editor. Minsk: Nauka i tekhnika; 1969. 209 p. Russian.
4. Matsiusheuskaya KV, Yarotov AE. [Life forms of pine *Pinus sylvestris* in the upland bogs of the Belarusian Polesie]. In: Vorob'ev DS, editor. *Aktual'nye voprosy ustoychivogo prirodopol'zovaniya: nauchno-metodicheskoe obespechenie i prakticheskoe reshenie. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 60-letiyu NIL ekologii landshaftov fakul'teta geografii i geoinformatiki BGU; 9–11 noyabrya 2022 g.; Minsk, Belarus'* [Actual issues of sustainable nature management: scientific and methodological support and practical solution. Proceedings of the International scientific and practical conference devoted to the 60th anniversary of the Research Institute of Landscape Ecology of the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University; 2022 November 9–11; Minsk, Belarus]. Minsk: Belarusian State University; 2022. p. 139–142. Russian.
5. Vaganov EA, Pleshikov FI. [Forest monitoring system as a basis for their rational use and sustainable development]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*. 1998;5(1):3–8. Russian.
6. Auclair AND, Lill JT, Revenga C. The role of climate variability and global warming in the dieback of Northern Hardwoods. *Water, Air and Soil Pollution*. 1996;91(3–4):163–186.
7. Boryczka J, Stopa-Boryczka M. Natural and anthropogenic changes of climatic in Europe. *Acta Universitatis Carolinae. Geographica*. 1997;32:57–64.
8. Fisher M. Decline in the juniper woodlands of Raydah Reserve in southwestern Saudi Arabia: a response to climate changes? *Global Ecology and Biogeography Letters*. 1997;6(5):379–386. DOI: 10.2307/2997338.
9. Holtmeier F-K. *Mountain timberlines: ecology, patchiness, and dynamics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2003. 369 p. (Advances in Global Change Research; volume 14).
10. Hüttl RT, Schneider BU, Farrell EP. Forests of the temperate region: gaps in knowledge and research needs. *Forest Ecology and Management*. 2000;132(1):83–96. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00381-9.
11. Gramer H, Gramer-Middendorf M. Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Schadensperioden und Klimafaktoren in mitteleuropäischen Forsten seit 1851. *Pflanzenschutz Nachrichten Bayer*. 1984;37(2):208–334.
12. Korpel S. Dinamika prirodneho smrekoveho lesa v zapadnych Tatrach na priklade SPR Kotlový Zlab. *Zborník prác o Tatranskom narodnom parku*. 1993;33:193–225.
13. Kullman L. Recent cooling and recession of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in the forest-alpine tundra ecotone of the Swedish Scandes. *Journal of Biogeography*. 1996;23(6):843–854.
14. Lebourgeois F. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring widths of Corsican pine from western France. *Annals of Forest Science*. 2000;57(2):155–164. DOI: 10.1051/forest:2000166.
15. Parmesan C, Yoho G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*. 2003;421:37–42. DOI: 10.1038/nature01286.
16. Schweingruber F. *Tree-rings and environment. Dendroecology*. Berne: Paul Haupt; 1996. 609 p.
17. Treter U. Dendroökologische Untersuchungen in Flechten-Fichten-Waldland in Zentral- und Labrador (Ungava, Kanada). *Heidelberger Geographische Arbeiten*. 1996;104:529–542.
18. Beketov AN. [On the influence of climate on the growth of pine and spruce]. In: Beketov AN, editor. *Trudy Pervogo s'ezda russkikh estestvoispytatelei v Sankt-Peterburge, proiskhodivshego s 28 dekabrya 1867 po 4 yanvarya 1868 g. Otdelenie botaniki* [Proceedings of the First congress of Russian naturalists in Saint Petersburg, which took place from 1867 December 28 to 1868 January 4. Department of botany]. Saint Petersburg: Tipografiya Imperatorskoi akademii nauk; 1868. p. 111–163. Russian.

19. Douglass AE. *Tree-rings and chronology*. Tucson: University of Arizona; 1937. 36 p. (University of Arizona Bulletin; volume 8, No. 4).
20. Fritts HC. *Tree-rings and climate*. London: Academic Press; 1976. 567 p.
21. Kiselev VN, Chubunov KD. *Landshaftno-ekologicheskie issledovaniya Belorusskogo Poles'ya* [Landscape-ecological studies of the Belarusian Polesie]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1979. 104 p. Russian.
22. Smolyak LP, Bolbotunov AA, Romanov VS. [Relief influence on the variability of radial growth of pine]. In: Kairyukshtis LA, editor. *Dendrokhronologiya i dendroklimatologiya* [Dendrochronology and dendroclimatology]. Novosibirsk: Nauka; 1986. p. 114–122. Russian.
23. Petrov EG. *Vodnyi rezhim i produktivnost' lesnykh fitotsenozov na pochvakh atmosfernogo uvlazhneniya* [Water regime and productivity of forest phytocenoses on soils of atmospheric moistening]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1983. 213 p. Russian.
24. Kiselev VN, Matsiusheuskaya KV. *Ekologiya eli* [Ecology of a spruce tree]. Loginov VF, editor. Minsk: Belarusian State University; 2004. 217 p. Russian.
25. Kiselev VN, Matsiusheuskaya KV, Yarotov AE, Mitrakhovich PA. *Khvoynye lesa Belarusi v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh (dendroklimaticheskii analiz)* [Coniferous forests of Belarus in modern climatic conditions (dendroclimatic analysis)]. Kiselev VN, editor. Minsk: Pravo i ekonomika; 2010. 202 p. Russian.
26. Demakov YuP. *Diagnostika ustoichivosti lesnykh ekosistem (metodologicheskie i metodicheskie aspekty)* [Diagnostics of stability of forest ecosystems (methodological and methodological aspects)]. Ioshkar-Ola: Periodika Marii El; 2000. 416 p. Russian.
27. Voeikov AI. [Climate of Polesie]. In: Zhilinskii II, compiler. *Prilozheniya k ocherku rabot Zapadnoi ekspeditsii po osusheniyu bolot, 1873–1892 gg.* [Appendices to the Sketch of the western expedition to drain the swamps, 1873–1892]. Saint Petersburg: Izdanie Ministerstva zemledeliya i gosudarstvennykh imushchestv; 1899. p. 1–132. Russian.
28. Kiselev VN, Matsiusheuskaya KV, Yarotov AE, Mitrakhovich PA. [Peculiarities of radial growth of pine on the upland bogs of Belarusian Polesie]. *Vesci BDPU. Series 3, Physics. Mathematics. Informatics. Biology. Geography*. 2010;3:35–39. Russian.
29. Bokov VN, Vorobyev VN. Variability of atmospheric circulation and variability of a climate. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2010;13:83–88. Russian.
30. Girs AA. *Mnogoletnie kolebaniya atmosfernoï tsirkulyatsii i dolgosrochnye meteorologicheskie prognozy* [Multiyear variations of atmospheric circulation and long-term meteorological forecasts]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1971. 280 p. Russian.
31. Matsiusheuskaya KV. *Faktory izmenchivosti radial'nogo prirosta derev'ev* [Factors of tree radial growth variability]. Kiselev VN, editor. Minsk: Belarusian State University; 2017. 231 p. Russian.
32. Matsiusheuskaya KV, Dorozhko NV. Volcanic eruptions as a factor of variability of pine stem productivity in the upper swamps of Belarus. In: Fartyshev AN, editor. *Siberia and the Far East of Russia in the emerging space of Greater Eurasia. Proceedings of the 20th anniversary scientific conference (with international participation) of young geographers of Siberia and the Far East; 2021 May 24–29; Irkutsk, Russia*. Irkutsk: Izdatel'stvo Instituta geografii imeni V. B. Sochavy SO RAN; 2021. p. 60–63. Russian.

Получена 02.05.2023 / исправлена 21.09.2023 / принята 27.09.2023.
Received 02.05.2023 / revised 21.09.2023 / accepted 27.09.2023.

МНОЖЕСТВЕННОЕ РЕГРЕССИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: СОВРЕМЕННОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУСТРИИ ТУРИЗМА (НА ПРИМЕРЕ ШЕКИНСКОГО РАЙОНА)

Н. АРТУНОВ¹⁾

¹⁾Институт географии Азербайджана, пр. Г. Джавида, 115, AZ 1143, г. Баку, Азербайджан

Проведены тщательный анализ территориального планирования туристической отрасли и множественный регрессионный анализ доходов от туризма в Шекинском районе за 2010–2021 гг. Основной задачей исследования стало выявление факторов, влияющих на формирование доходов в туристической отрасли в контексте регионализации и современного направления развития туризма. Для достижения поставленной цели были изучены существующие теоретические подходы к территориальному планированию туризма, рассмотрены достоинства и недостатки туристической отрасли, проанализирована последовательность планирования. При исследовании факторов, влияющих на туризм, применялись методы сравнительного, регрессионного и корреляционного анализа, а окончательный вариант математической статистической модели был получен на основе использования последовательных моделей путем выдвижения гипотез. В ходе исследования установлено, что количество гостиничных номеров и иностранных туристов является основным фактором формирования доходов. Предложенная модель имела следующие характеристики: $p < 0,005$ и $R^2 = 0,4886$, что сделало ее окончательным вариантом. В работе подчеркивается важность глубокого изучения текущих и будущих ситуаций любого исследовательского направления, а также рассмотрения таких вопросов планирования туризма, как эффективное использование ресурсов и прогнозирование доходов. Вышесказанное свидетельствует о том, что сокращение доходов от туризма связано прежде всего со снижением интереса иностранцев, вызванного ростом цен на проживание в гостиницах и питание. Кроме того, в настоящее время лидируют регионы Габала и Гах, при этом туристические потоки направлены в сторону от Шекинского района. В целом результаты проведенного исследования дают ценную информацию о факторах, влияющих на доходы от туризма в Шекинском районе, что может способствовать принятию решений в индустрии туризма. Сделанные выводы помогут заинтересованным сторонам определить ключевые точки роста индустрии и принять соответствующие меры для привлечения большего количества туристов, а также увеличения доходов.

Ключевые слова: пространственное планирование; индустрия туризма; регрессионная модель; Шекинский район; прогнозирование; планирование туризма.

Благодарность. Автор выражает благодарность анонимным рецензентам издания за ценные рекомендации, которые помогли улучшить теоретическую часть исследования.

Образец цитирования:

Артунов Н. Множественное регрессионное моделирование: современное пространственное планирование и экономическое моделирование индустрии туризма (на примере Шекинского района). *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2023;2:80–89 (на англ.). EDN: SAVPXX

For citation:

Artunov N. Multiple regression modelling: contemporary spatial planning and economic modelling of tourism industry (case study of Shaki district). *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2023;2:80–89. EDN: SAVPXX

Автор:

Нофал Артунов – кандидат географических наук; научный сотрудник кафедры экономической и политической географии.

Author:

Nofal Artunov, PhD (geography); researcher at the department of economical and political geography.
nofel.ertunov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6127-5364>

MULTIPLE REGRESSION MODELLING: CONTEMPORARY SPATIAL PLANNING AND ECONOMIC MODELLING OF TOURISM INDUSTRY (CASE STUDY OF SHAKI DISTRICT)

N. ARTUNOV^a

^a*Institute of Geography of Azerbaijan, 115 H. Javid Avenue, Baku AZ 1143, Azerbaijan*

The study conducted a thorough analysis of the territorial planning of the tourism industry and a multiple regression analysis of tourism revenues in the Shaki district from 2010 to 2021. The main objective of the research was to identify the factors influencing the formation of income in the tourism industry in the context of regionalisation and the current direction of tourism development. Studying the negative and positive aspects of the tourism industry and the planning sequence, as well as the existing theoretical approaches to tourism planning, was necessary to achieve this goal. Comparative analysis, regression analysis, and correlation analysis methods were used to analyse the factors affecting tourism, and the final version of the mathematical statistical model was obtained based on successive models by establishing hypotheses. The study found that the number of hotel rooms and foreign tourists is the main influential factor in the formation of income. The proposed model had following parameters: $p < 0.005$ and $R^2 = 0.4886$, making it the final option. The research highlights the importance of deep learning about current and future situations of any research destination and tourism planning issues, such as the effective use of resources and the prediction of incomes. It demonstrates that the reduction in tourism income is primarily due to the decrease in foreign tourists' interest caused by rising hotel and food costs. The research also reveals that the focus has shifted to other neighbouring districts, such as Gabala and Gakh, with tourist flows directed away from the Shaki district. Overall, this study provides valuable insights into the factors affecting tourism revenue in the Shaki district, which can inform future policy and decision-making in the tourism industry. As a result of these findings, stakeholders will be able to identify the key drivers of tourism growth and take the necessary measures to attract more tourists and increase revenue from tourism.

Keywords: spatial planning; tourism industry; regression model; Shaki district; prediction; tourism planning.

Acknowledgements. The author of the article would like to thank the anonymous referees of journal for all their valuable comments and suggestions, which helped in improving of the theoretical part of the article.

Introduction

An increase in the population's income leads to a rise in its cultural and living standards, which results in the expansion of interest in other countries and people, enhancement in the number of tourist activities, and the formation of the tourism industry [1]. There are several views and approaches to tourism. J. Holloway describes tourism as problematic in establishing clear lines between shoppers and tourists [2]. There is no commonly accepted definition of the tourism industry. R. Mill and A. Morrison point out that it is difficult to describe tourism as an industry because there are many complementary and competing activities among tourism businesses [3]. They integrate the definitions of tourism into a common context, emphasising the relationship between travel, tourism, leisure, and recreation. In their approach, they continue to define this relationship as «fuzzy» and distinguish that all tourism involves travel but not all travel is tourism. Nevertheless, the tourism industry is often portrayed as just an activity. In the above approaches, the formation of tourism as a separate industry and the emerging ideas in this field are clearly defined.

Tourism is a very fast-growing sector of the economy and it is becoming increasingly widespread among nations. Taking into account its economic, socio-cultural, and environmental impact potential, it is clear that these impacts can be positive or negative depending on whether tourism is planned or not, and how well it is planned and implemented [4].

In other words, tourism planning is the process of tourism development [5], and the main goal is to ensure sustainable development in tourism. There are usually issues that need to be followed in the planning schedule and sequence to minimise the negative potential of tourism and maximise its benefits.

Since the tourism industry covers various industries, it should be dealt comprehensively and planning should be done according to individual components. The complexity of the industry calls for coordinated, integrated, and careful planning between all tourism stakeholders, including tourism-related and involved sectors. The following conditions must be fulfilled for the development of tourism in the country as well:

- implementation of planning policy that can be at the national, regional, and local scale;
- existence of rules and laws which assume formation of the legal framework and legislation;
- control of the plan that must include the body responsible for monitoring its implementation and dynamics [6].

According to S. Roday, A. Biwal, and V. Joshi «unplanned and unregulated tourism has long-term adverse effects on society, culture, ecology, and economy» and at the same time «proper planning should ensure systematic operation to achieve desired results and success» [7, p. 436–437]. J. Ezani defines planning as «the act or process of making plans and designs for a particular project or enterprise» [8, p. 1]. Tourism planning should involve many stakeholders and have a common vision, direction, and commitment [9]. In tourism planning, each country should have a national tourism policy that will address tourism-related issues and advocate the need for tourism planning. In addition to the necessity of the above-mentioned conditions during tourism planning, the following are mentioned.

Integrated tourism development. The fact that the tourism industry covers many different sectors allows to coordinate activities of the sectors towards a common goal within the framework of the adopted plan.

Economic benefits. One of the reasons for the need for tourism planning is economic efficiency, that is, the ability to generate income. The development of tourism requires a large capital investment, where the main goal is to finance one or more areas and forecast revenues. Planning helps to achieve financial gain from tourism.

Protection. Planning helps to ensure conservation by optimising tourism benefits and preventing problems. During the tourism, historical places, archaeological monuments, cultural centres, scenic and touristic places, and mental components must be protected. Planning assists to implement policies, regulations and laws that will ensure their continued maintenance and availability. Proper planning of tourism can lead to the protection and maintenance of cultural, natural, and ecological resources in development.

Development of sustainable tourism. Among the modern industries, there is a great need to protect natural and culturally important places and the environment in the development of tourism (monuments, beach resorts, and wildlife reserves).

Development of human resources. In addition to the services of professionals, tourism requires skilled and unskilled labour. Planning helps to determine the number of human resources needed, the skills required, and how they can be acquired.

Security. The tourism plan addresses internal security issues, crimes committed by tourists, and crimes against tourists by host community members.

Tourism planning requires a painstaking and logical course followed in order of priority and it is important to follow the process. The following phases are mentioned as different stages of tourism planning: assessment of tourist demand and supply, determination of objectives, spatial planning, basic infrastructure, financial planning, human resource planning, administrative management structure, marketing and promotion, monitoring of results, time factor.

However, some changes have occurred in the general structure of planning and new approaches have been proposed in recent times. The main goal is to ensure the optimality of the process and to achieve the result in the medium and near future. This will help to prevent wasted time and financial loss. Some authors [7, p. 440–441] present more similar and more simple sequence of tourism planning: definition of the system, goals, and objectives, collection of relevant information; data analysis and interpretation, preliminary planning and analysis; approval and finalisation of the plan, implementation and monitoring of the final plan.

The tourism industry mainly includes inns, hotels, tourism companies, service areas, small workshops, and enterprises engaged in the production of souvenirs and gifts. Social services, production enterprises, museums, catering facilities, transport companies, advertising, tour operators, travel agencies, and other infrastructures are involved as the main enterprises that form the tourism product. It is necessary to group the enterprises involved in the formation of the tourism services market, taking into account infrastructure areas directly related to tourism, supply and production services, complex services (provided by tour operators, travel agencies, and other tourist organisers).

The spatial planning concept is increasingly prominent in discussions and strategies focusing on regional planning and tourism development. Spatial planning and the tourism industry are two various concepts, in fact, they are greatly interrelated. Spatial planning can be used as an instrument for coordinating socio-economic development by preventing environmental problems and simultaneously protecting the natural and cultural environment [10]. At the same time significant implications for how a given destination should be planned, developed and operated must be taken into account during both spatial and economic planning [11]. Let's summarise given concepts. Spatial planning in tourism is an integral part of socio-economic planning [12] and the continuous activity of society which aimed to organise, arrange and equip certain spatial entities in the function of their marketing possibilities, availability of tourism, and socio-economic goals, with the effort to maximise the positive and minimise the negative social, economic and spatial effects of tourism [13].

Summing up the above-mentioned ideas, it is clear that the primary goal here is to ensure the planning process, economic sustainability, sustainable development, and maximum results. A number of programmes and acts have been adopted in order to ensure the sustainable development of tourism in the research region. Important work has been done in the field of tourism in the country, the President of the Republic of Azerbaijan

signed the Decree of 1 September 2016 «On additional measures related to the development of tourism in the Republic of Azerbaijan» and the strategic road map for the development of the specialised tourism industry was adopted on 6 December 2016 in the country.

For this purpose, according to the Decree of the President of the Republic of Azerbaijan of 20 April 2018 «On some measures related to the improvement of state management in the field of culture and tourism», the State Tourism Agency was established, and within this framework, the tourism brand was formed and promoted on a local and international levels and work in the direction of increasing competitiveness was started. Azerbaijan Tourism Bureau was established under the agency and its information base was expanded. State historical-architectural reserve «Yukhari Bash» of Shaki district (including hotel complex «Carvansaray» in Shaki City), historical-architectural reserve «Kish» operates as part of the tourist office.

The main purpose of the research is to analyse the issues of territorial planning of tourism, to determine the main factors that affect development, and to find out the direction of the tourism development in the region for the period of 2010–2021. Here, the main goals are to assess the current situation in the field of tourism and determine the direction of it's development. A number of hypotheses have been put forward for these purposes.

First of them is to reveal factors that affect the income of hotels and hotel-type enterprises in the Shaki district. The second hypothesis is to determine the relationship between the employment of the population in tourism and hotel income. The third hypothesis suggests studying of correlation between fields in the tourism district. And according to the fourth hypothesis it is necessary to forecast revenues in the tourism region and to build the most appropriate model.

Materials and methods

Studied area. The total area of Shaki district is 2488 km² and it is the second largest district of Azerbaijan after Guba district, located in the northwest of the republic (fig. 1). The administrative district is surrounded by the Dagestan Republic of the Russian Federation from the north, Oguz from the east, Yevlakh from the south, and Gakh from the west.

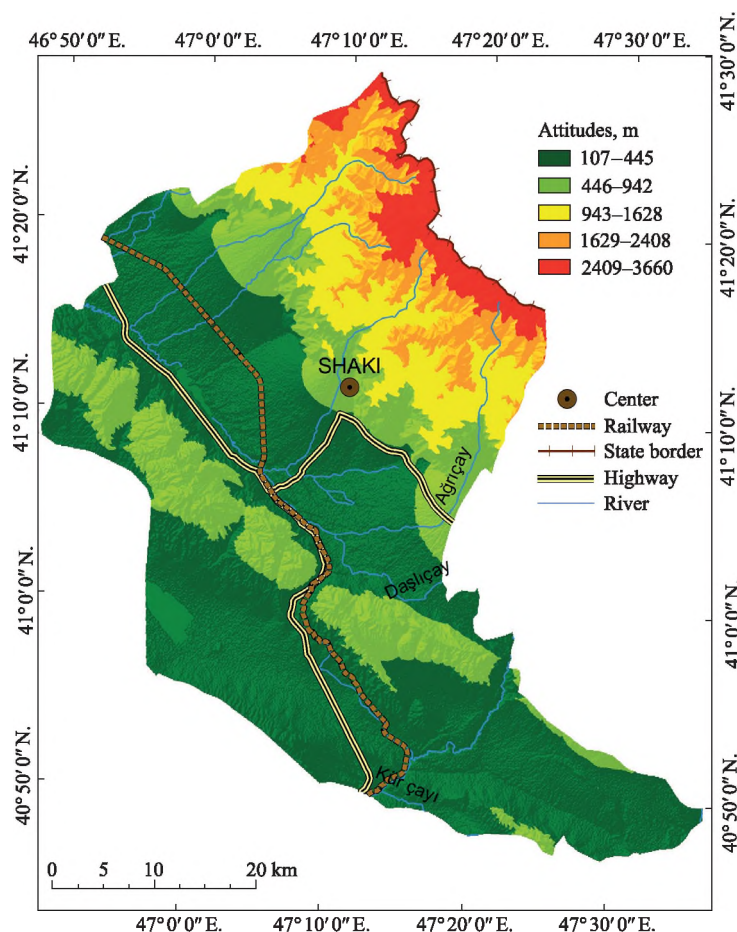


Fig. 1. Studied area (Shaki district) (prepared in ArcGIS 10.3)

Methods. Comparative, correlation and regression analysis were used and a model was built to predict the studied area for the period of 2010–2021. For this purpose, statistical data have been used and factors that could affect the income of hotels were calculated. The R programming language was used in the construction of the mathematical-statistical model. A number of parameters that formulate and have a significant influence on region's tourism income were taken into account in building the model: one-time capacity of hotels, number of hotel rooms, number of employees, number of foreign tourists, and number of citizens.

Several factors influence the formation of the income of hotels in the Shaki district. It is for this reason that the multiple regression method was used in the analysis by region. In cases where there is one dependent and more than one independent variable, the multiple linear regression model that examines the relationship between the variables is expressed as follows:

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon,$$

where γ is the dependent variable (income); x is independent variables (capacity, number of rooms, number of employees, foreign tourists, citizens); β is intercept.

To use multiple linear regression analysis, the factors of the model must be provided. The terms of this regression model can be summarised as follows: condition of normality, linearity condition, constant change condition, absence of autocorrelation, absence of multicollinearity problem between independent variables, equality of the average of the error terms to zero and its proximity to zero [14]. Some pre-requisites to carry linear regression model are the following:

- there is linear relationship between quantitative dependent and independent variables;
- there is no presence of autocorrelation of residuals;
- the mean of residuals is zero;
- there is equal variance of residuals or presence of homoscedasticity;
- the independent variables are uncorrelated with errors;
- there is absence of multicollinearity [15].

Regression analysis. A number of models have been developed as a way to attempt to measure and predict incomes about tourism [16]. The most recent models have utilised either a matrix, factor analysis, or cluster analysis and ect. P. J. Sheldon and T. Var discussed five general groups of forecasting techniques, some of the most frequently used varieties are called «econometric models», including regression and discriminant analysis [17]. These behavioural models attempt to determine cause and effect relationships between travel trends and imputed causal factors [18].

Regression analysis is an actively used mathematical statistical method. Its easy and understandable application, and fast results thanks to statistical package programmes lead to an increase in interest in regression analysis in scientific research, and use of multivariate statistical techniques has been growing in the social science literature, allowing researchers to answer complex research questions and test multivariate models [19]. The technique has provided tourism researchers with a comprehensive means for testing and modifying theoretical models and it is comparatively more sophisticated than other multivariate statistical techniques [20]. A. D. Tasci studied the relative impact of factors influencing destination image, by analysing the large scale and longitudinal dataset of the Michigan regional travel market survey by applying multiple regression analysis and found that only a few of those selected variables (i. e. age, race and visitation) play curicial role in destination image [21].

Regression analysis examines the relationship between a variable and one or more independent variables [22]. In regression analysis, there is a cause-and-effect relationship between these variables, and this relationship is explained by a mathematical model [23]. This model is called a regression equation or a regression model. A model consisting of a dependent variable and an independent variable is called a simple regression model [24], while a model consisting of a dependent variable and multiple independent variables is called a multiple regression model [25].

The goal is to create an estimation equation that can be used to estimate the dependent variable with the help of the independent variable or variables [26]. To make reliable predictions using a regression model, you need to know the state of the relationship between the variables in the model [27]. The regression model to be used varies depending on the state of the relationship between the variables (linear, logarithmic, exponential, etc.) [28]. Regression analysis is particularly affected by distributional characteristics [29].

Building the model. The construction of the model is carried out in stages. First, the stable variable with the highest correlation with the dependent variable is added and the p -value is looked at in the F -statistic. Consecutively, other influencing factors are included in the model and the increasing and decreasing tendency of the p -value is measured. As a result, the most suitable model is proposed. The question of what factors affect hotel revenues in the Shaki district, proposed in first hypothesis, was tested one by one with the following models. After entering all the components (with the enter method), it is set as model 1. Looking at the F -statistic of model 1, we see that $p > 0.18$, some variables are removed from the model (table 1 (model 1)). Regression analysis is continued by keeping some of the variables constant in building the model.

Table 1

Model 1 and model 2 after adding factors

Parameters	Model 1 (once capacity, number of rooms, employees, and number of foreign and domestic tourists)	Model 2 (number of rooms, foreign and domestic tourists, when one-time capacity)
Residual standard error	458.3 on 10 degrees of freedom	444.9 on 12 degrees of freedom
Multiple R^2	0.4845	0.4172
Adjusted R^2	0.2268	0.2715
F -statistic	1.88 on 5 and 10 degrees of freedom	2.864 on 3 and 12 degrees of freedom
p -Value	0.1851	0.08107

Model 2 differs from the previous model: there some variables were removed, a new variable was added. After the regression analysis is established, when we look at the value of the F -statistic, we see that $p > 0.08$, which means that the most ideal result has not been achieved in this model. However, it is possible to maintain variables by taking a wide margin of error.

Results and discussion

Table 2 shows the construction of the model as well. Here, unlike the previous ones, a number of influencing factors have been removed, only the number of hotel rooms, the arrival of foreigners in the region, and the impact on hotel revenues based on this have been studied. Also, $p < 0.04$ was obtained in the F -statistic, which is considered the most appropriate model. This model fully explains fourth hypothesis and it is possible to make its predictions.

Table 2

Model 3 (regression model): statistical values and metrics

<i>The function used to build the model</i>				
lm(formula = incomes ~ hotel_rooms + foreign, data = df)				
<i>Distribution statistics of surpluses</i>				
Minimal	First quartile	Median	Third quartile	Maximal
-403.0	-172.74	-34.78	28.11	1396.07
<i>Statistics of influencing factors (standard errors, p-values)</i>				
Parameters	Estimate	Standard error	t -Value	Pr ($> t $)
Intercept	-425.5433	618.4495	-0.688	0.5035
Hotel rooms	3.6773	2.3394	1.572	0.1400
Foreign	0.1189	0.0565	2.104	0.0554
<i>Metrics that measure how well the model fits</i>				
Residual standard error is 437.8 on 13 degrees of freedom	Multiple R^2 is 0.4886	Adjusted R^2 is 0.2946 on 1 and 13 degrees of freedom	F -statistic is 4.132	p -Value is 0.04083

Note. Significant codes are 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

Data analysis. Shaki district is one of the main tourism centres of Azerbaijan. The tourism infrastructure of the region is covered by the construction of inns and hotels, the construction of the transport system, and the creation and operation of service areas. To analyse the current state of tourism in the research region, it is

enough to look at the information of the State Statistical Committee on Tourism. Looking at the statistics of tourist tickets sold in the Shaki district, we see that this figure is equal to 582. In 2019, 218 tour packages were sold, which is 2 times less¹ than the number of 2021. Taking into account their economic values, it is clear that the income from these sales in 2019 was 190.9 thsd manats, and in 2021 it was 69.2 thsd manats, which means a 64 % decrease. However, the registration of general indicators is almost non-existent in the administrative regions of the Shaki – Zagatala region. Thus, there are only 2 years of data.

There is an increasing and decreasing trend in the capacity of hotels and inns operating in the region between 2010 and 2021 due to seasonly demand. Thus, in 2010, the capacity of hotels in the Shaki district was 576 places, in 2015 it has increased by 109 places, and in 2021 it decreased again by 103 places and returned to its previous state. During the mentioned period, the highest indicator was recorded in 2016 (808 places). When analysed by economic region, it ranked 3rd after Gabala and Gakh districts.

If we look at the income from hotels in the region, a decreasing trend is observed in 2010–2021. The income of hotels was 2210.5 thsd manats in 2010, in 2015 it decreased by 52 % to 1068.9 thsd manats, and in 2021 it decreased by 26 % to 796 thsd manats. If we look at the general figures, we can see that the income has decreased up to 3 times in 11 years. Also, the share of Shaki in the Shaki – Zagatala economic region has dropped sharply in the mentioned period. Thus, the share of Shaki in the economic region decreased from 55.4 % in 2010 to 41.0 % in 2015 and to 4.0 % in 2021. This is a very low indicator. Analysing by region, it becomes clear that it lags behind only Gabala district. However, in 2021, for the first time it fell behind in the Gakh district and fell to the 3rd level.

One of the main conditions for the development of the tourism market and the sale of tourism products is meeting the tourist demand. Two factors play a key role in the formation of the tourism industry in Shaki district and in the increase of hotel revenues: visiting of foreigners and visiting of citizens of the country.

If we pay attention on the level of foreigners coming to the region and staying, it can be seen that between 2010 and 2021, increasing recorded initially, but in the last period, a sharp decrease was observed (fig. 2). According to statistics, in 2010, 2110 foreign citizens visited the region, and in 2015, it increased by 26 % compared to the previous year and reached 2852 people. In 2021, it has decreased 14 times at a sharp speed. The number of foreigners has changed between 200–300 people in the last two years. The decrease in the number of tourists is seen not only in Shaki district but also in other districts.

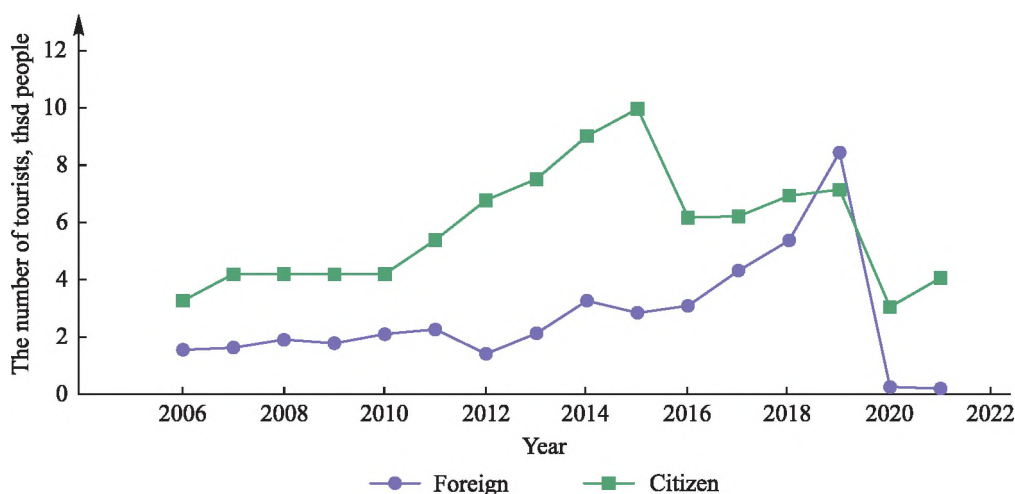


Fig. 2. Graphics of foreigners and citizens by years
(prepared on the data of statistical reports
of the State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan)

The highest indicator for the region was obtained in 2019 when there were 8447 people. The leadership in the economic region belongs to the Gabala district. The involvement of the country's citizens in domestic tourism has had a positive effect on the development of tourism in the Shaki district. So, if the number of citizens was 4209 in 2010, it reached 9974 people in 2015, which means an increase of more than 2 times compared to

¹Socio-economic development of regions. Statistical collection [Electronic resource]. URL: https://www.stat.gov.az/menu/6/statistical_yearbooks/ (date of access: 20.12.2022) (in Azerbaijani).

the previous year. However, it decreased again by the same amount and returned to its previous state in 2021. When analysing the Shaki – Zagatala economic region, we observe that the share of Shaki among the regions visited by citizens has decreased in recent times.

If we look at the number of employees working in the service sector, we see that the highest indicator was recorded in the region in 2019. In the following years, there is a tendency of increasing and decreasing the total number. Thus, in 2010, the number of employees increased from 109 people to 177 people (38 %), and in 2021, it decreased again by the same amount to the level of 2010. There is no stability in the number of employees and it varies depending on the current situation.

Correlation analysis. Correlation analysis is applied between the given influencing factors and the relationship between two or more variables is studied. Correlation can be studied by two methods, diagrammatic method and mathematic method. Diagrammatically it is studied with the help of scatter diagram which cannot provide exact value of correlation in all case. Mathematically many methods and formulas are there however Pearson's method is widely used [30]. The Pearson correlation analysis is a common criterion to measure the correlation between variables, which is defined as following [31]:

$$R(i) = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{k,i} - \bar{x}_i)(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{k,i} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^m (y_k - \bar{y})^2}},$$

where m is the number of samples; $R(i)$ measures the correlation between the feature i and the class standard; $x_{k,i}$ is the feature value of the feature i of the sample k ; $\bar{x}_i$ is the average value of the feature i ; y_k represents the value of the sample k ; $\bar{y}$ represents the class standard mean value of the sample k . According to the definition formula, the variation range of $R(i)$ is between -1 and 1 [32]. When $R(i) = 1$, the feature i is positively linear correlated with the class standard; when $R(i) = -1$, the feature i is negatively linear correlated with the class standard. As the degree of correlation between the feature i and the class standard varies, the value of $R(i)$ changed between 0 and 1 . The larger the value of $R(i)$ is, the greater the contribution of the feature i to classification is. There was a weak correlation between features and class standard when $R(i) < 0.3$. There was a low correlation between features and class standard when $0.3 < R(i) < 0.5$. There was a significant correlation between features and class standard when $0.5 < R(i) < 0.8$. There was a high correlation between features and class standard when $0.8 < R(i) < 1$ [33]. To summarise all above mentioned indicators the Pearson correlation coefficient is displayed between -1 and 1 and is expressed as follows: if $R(i) = 1$, the correlation is said to be perfect positive; if $R(i) = -1$, the correlation is said to be perfect negative; if $R(i) = 0$, the variables x and y are said to be uncorrelated; if $0 < R(i) \leq 0.4$, it is low correlation; if $0.4 < R(i) < 0.7$, it is moderate correlation; if $0.7 \leq R(i) < 1$, it is high correlation [34].

The value of correlation coefficients nearer to 1 or -1 be interpreted as very high positive or negative correlation and nearing zero is considered as very low [35].

When looking at the correlation in the formation of the income of hotels and hotel-type enterprises in the tourism industry in the Shaki district, it can be seen that there is a moderate relationship between their income and hotel numbers, number of employees, foreign and domestic tourists, and it varies between 0.42 and 0.52 (fig. 3).

Looking at the correlation analysis of employees with other factors, it is observed that there is a medium relationship between the one-time capacity, the number of hotel rooms, and a high relationship with the total number of tourists. In other words, the number of employees in the region, the mentioned factors play an important role.

The highest correlation between the number of single capacity and the number of employees is due to qualified personnel, the relationship between them varies between 0.64 and 0.70 on average. The main factor is the increase and decrease in the number of tourists. According to C. A. Gunn [36] the limitation of the skewness coefficient between 1 and -1 can be interpreted as the distribution showing close to normal distribution.



Fig. 3. Factors affecting hotel revenues in tourism correlation analysis between 2010–2021
(based on statistical data in R programming language)

Assesment of results. During the research, the forward selection method and stepwise selection method were investigated during the construction of the model. In each model, different values were obtained, and finally, the optimal model has been proposed. The estimation model is found to be $y = -425.5 + 3.7x_1 + 0.12x_2$. Here, the dependent variable income is denoted by y , x_1 is the number of hotel rooms, and x_2 is the number of foreign tourists. The prediction can be given by the mentioned formula. However, the value of -425.5 is not practical value because such a situation would not occur in reality. It is considered a necessary breakpoint parameter for prediction. Based on the formula, it is possible to forecast tourism revenues if other independent indicators except hotel rooms and foreign tourist parameters are kept stable. In this case, it is sufficient to add the corresponding numbers to the dependent variables. In the model, $R^2 = 0.4886$ is the average explanatory value. This suggests that there will be other variables involved in determining the number of returns.

Conclusions

The research examined the major factors that impact tourism income in the Shaki district from 2010 to 2021, and the degree of influence of these factors. It was found that the number of foreign tourists and hotel room occupancy were the primary drivers of tourism income. The majority of tourists preferred hotel rooms for one or two people, and a decrease in the number of beds led to a reduction in costs for cleaning and heating the rooms, which in turn resulted in an increase in hotel revenues.

The decline in tourism income in Shaki district has been observed recently. While the COVID-19 pandemic is believed to be a significant factor, it should be noted that the decline began before the pandemic, and a partial recovery was observed towards the end of it. Nonetheless, our analysis demonstrates that the reduction in tourism income is primarily due to the decrease in foreign tourists' interest caused by rising hotel and food costs. Foreign tourists are the primary source of income compared to domestic tourists and play a significant role in revenue generation.

One of the scientific innovations of the research is the creation of a regression analysis and model, as well as comparative and correlation analyses for the region, which are being implemented for the first time. During the correlation analysis, it was discovered that the relationship between employees and income in revenue generation is 0.43, implying that workers or skilled personnel influence 43 % of the income.

Tourism spatial planning and the organisation of package tours, as well as enhancing the appeal of destinations, are all essential factors in revenue growth, and they should be considered when planning. However, the research reveals that the focus has shifted to other neighbouring regions, such as Gabala and Gakh, with tourist flows directed away from Shaki district.

Despite a well-organised tourism industry in the Shaki district, the current state of tourism fails to reflect this. In addition to the previously mentioned factors, hotel revenue is also impacted by changes in the number of guest nights, service quality, customer satisfaction, and current prices. Since information about other parameters is unavailable, only these aspects were evaluated.

References

1. Eminov ZN. Kurort-turizm təsərrüfatı, Azərbaycan respublikasının coğrafiyası. In: Mammadov RM, editor. *İqtisadi, sosial və siyasi coğrafiya*. Bakı: Avropa Nəşriyyatı; 2015. s. 271–277. Azerbaijani.
2. Holloway J. *The business of tourism*. Harlow: Longman; 1998. 350 p.
3. Mill R, Morrison A. *The tourism system: an introductory text*. Dubuque: Kendall Hunt Publishing Co.; 1998. 387 p.
4. Pender L, Sharpley R, editors. *The management of tourism*. Thousand Oaks: SAGE Publications; 2005. 384 p.
5. Lang R. Planning for integrated development. In: Dykeman FW, editor. *Papers of the conference on integrated development beyond the city; 1985 June 14–16; Sackville, Canada*. Sackville: Mount Allison University; 1985. p. 81–104.
6. Mason P. *Tourism: environment and development perspectives*. Godalming: World Wide Fund for Nature; 1995. 104 p.
7. Roday S, Biwal A, Joshi V. *Tourism operations and management*. Oxford: Oxford University Press; 2010. 502 p.
8. Ezani J. *Strategies for development: the role of planning in tourism* [Internet; cited 2015 April 2]. Available from: <http://www.enugustatetourismboard.com/p.php>.
9. Gee C, Sola EF. *International tourism: a global perspective*. Madrid: World Tourism Organisation; 1997. 406 p.
10. Risteskia M, Kocevskia J, Arnaudov K. Spatial planning and sustainable tourism as basis for developing competitive tourist destinations. *Procedia – Social and Behavioural Sciences*. 2012;44:375–386.
11. Vasilevska L, Vasić M. Strategic planning as a regional development policy mechanism: European context. *Spatium*. 2009; 21:19–26.
12. Chettiparamb A, Thomas H. Tourism and spatial planning. *Journal of Policy Research in Tourism, Leisure and Events*. 2012; 4(3):215–220. DOI: 10.1080/19407963.2012.726157.
13. Dede OM, Ayten AM. The role of spatial planning for sustainable tourism development: a theoretical model for Turkey. *Tourism: an International Interdisciplinary Journal*. 2012;60(4):431–445.
14. Şahinler S. The basic principles of fitting linear regression model by least squares method. *Journal of Agricultural Faculty of the Mustafa Kemal University*. 2000;5(1–2):57–73. Turkish.
15. Wu DC, Li G, Song H. *Econometric modelling and forecasting of tourism demand, methods and applications*. London: Routledge; 2023. 327 p. DOI: 10.4324/9781003269366.
16. McGehee NG, Andereck KL. Factors predicting rural residents' support of tourism. *Journal of Travel Research*. 2004;43(2): 131–140. DOI: 10.1177/0047287504268234.
17. Sheldon PJ, Var T. Tourism forecasting: the state-of-the-art. *Discussion Paper Series*. 1985;4(2):183–195. DOI: 10.1002/for. 3980040207.
18. Getz D. Models in tourism planning. *Tourism Management*. 1986;7(1):21–32.
19. Weston R, Gore PA Jr. A brief guide to structural equation modeling. *The Counselling Psychologist*. 2006;34(5):719–751. DOI: 10.1177/0011000006286345.
20. Anderson JC, Gerbing DW. Structural equation modeling in practice: a review and recommended two-step approach. *Psychological Bulletin*. 1988;103(3):411–423. DOI: 10.1037/0033-2909.103.3.411.
21. Tasci AD. Assessment of factors influencing destination image using a multiple regression model. *Tourism Review*. 2007;62(2): 23–30. DOI: 10.1108/16605370780000311.
22. Lee JW, Manorungrueangrat P. Regression analysis with dummy variables: innovation and firm performance in the tourism industry. In: Rezaei S, editor. *Quantitative Tourism Research in Asia*. Singapore: Springer; 2019. p. 113–130. DOI: 10.1007/978-981-13-2463-5_6.
23. Hara T. *Quantitative tourism industry analysis*. Oxford: Butterworth – Heinemann; 2008. 282 p.
24. Costa J, Ferrone L. Sociocultural perspectives on tourism planning and development. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*. 1995;7(7):4–9. DOI: 10.1108/09596119510101877.
25. Ahn B, Lee B, Shafer CS. Operationalising sustainability in regional tourism planning: an application of the limits of acceptable change framework. *Tourism Management*. 2002;23(1):1–15.
26. Bowerman BL, O'Connell RT, Murphree ES, Orris JB. *İşletme İstatistiğinin Temelleri*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık; 2013. 736 p. Turkish.
27. Erilli NA, Alakuş K. Parameter estimation in Theil-Sen regression analysis with Jackknife method. *Eurasian Econometrics, Statistics & Empirical Economics Journal*. 2016;5:28–41.
28. Nunkoo R, Ramkissoon H. Structural equation modelling and regression analysis in tourism research. *Current Issues in Tourism*. 2012;15(8):777–802. DOI: 10.1080/13683500.2011.641947.
29. Zaman T, Alakus K. Comparison of resampling methods in multiple linear regression. *Journal of Science and Arts*. 2019; 19(1):91–104.
30. Magnello ME. Karl Pearson and the establishment of mathematical statistics. *International Statistical Review*. 2009;77(1): 3–29. DOI: 10.1111/j1751-5823.2009.00073.x.
31. Deng L, Pei J, Ma J, Lee DL. A rank sum test method for informative gene discovery. In: Won K, Kohavi R, editors. *Proceedings of the tenth ACM SIGKDD International conference on knowledge discovery and data mining; 2004 August 22–25; Seattle, USA*. New York: Association for Computing Machinery; 2004. p. 410–419. DOI: 10.1145/1014052.1014099.
32. Cui W, Sun Z, Ma H, Wu S. The correlation analysis of atmospheric model accuracy based on the Pearson correlation criterion. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;780(3):32–45. DOI: 10.1088/1757-899X/780/3/032045.
33. Weston J, Elisseeff A, Schölkopf B, Tipping M. Use of the zero norm with linear models and kernel methods. *The Journal of Machine Learning Research*. 2003;3:1439–1461.
34. Zaid MA. *Correlation and regression analysis*. Ankara: Statistical Economic and Research and Training Centre for Islamic Countries; 2015. 33 p.
35. Gupta SC, Kapoor VK. *Fundamentals of mathematical statistics*. Mumbai: Sultan Chand and Sons; 2014. 1303 p.
36. Gunn CA. *Tourism planning*. New York: Taylor and Francis; 1988. 464 p.

УДК 550.361.44:550.836

РАДИОГЕННАЯ ТЕПЛОГЕНЕРАЦИЯ В ПОРОДАХ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА БЕЛАРУСИ

В. И. ЗУЙ¹⁾, Е. И. ЛОСЕВА²⁾

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

²⁾Научно-производственный центр по геологии, ул. Академика Купревича, 7, 220084, г. Минск, Беларусь

Плотность теплового потока – наиболее важный параметр, характеризующий термический режим литосферы. Распределение плотности теплового потока в земной коре и верхней мантии меняется с глубиной. Формирование потока включает два одновременных процесса: поступление первой его части из мантии в основание коры, а также генерацию второй части в породах, слагающих земную кору, за счет распада радиоактивных изотопов. Этот процесс известен как производство радиогенного тепла. Основную часть теплогенерации в земной коре обеспечивают долгоживущие изотопы урана, тория и калия. Другие радиоактивные изотопы учитываются редко. Большинство исследователей не принимают во внимание теплопродукцию в пределах неглубокого осадочного чехла, перекрывающего земную кору. Территория Беларуси относится к докембрийской Восточно-Европейской платформе. Ее кристаллический фундамент перекрыт достаточно тонкими отложениями. В нем пробурен ряд скважин по неравномерной сети. Из поднятого керна отобраны более 420 образцов горных пород кристаллического фундамента, которые исследованы в целях определения концентрации долгоживущих радиоактивных изотопов в лабораторных условиях с помощью гамма-радиометра РУГ-91М «Адани». Уровень расчетной теплогенерации варьирует в широких пределах с тенденцией к более высоким значениям у кислых кристаллических пород. Намного меньшие показатели тепловыделения характерны для пород основного состава. На практике возможно получение образцов породы только для самых верхних вскрытых бурением горизонтов земной коры. В связи с отсутствием образцов кристаллических пород для всего разреза земной коры широко используются несколько моделей изменения количества теплопродукции с глубиной исходя из значений скорости продольных сейсмических волн.

Ключевые слова: геотермия; тепловой поток; долгоживущие радиоактивные изотопы; теплогенерация; радиометр.

Образец цитирования:

Зуй ВИ, Лосева ЕИ. Радиогенная теплогенерация в породах кристаллического фундамента Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2023;2:90–104.
EDN: UUZHEB

For citation:

Zui VI, Loseva EI. Radiogenic heat production from rocks of the crystalline basement within Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2023;2:90–104. Russian.
EDN: UUZHEB

Авторы:

Владимир Игнатьевич Зуй – доктор геолого-минералогических наук, профессор; профессор кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики.
Елизавета Ивановна Лосева – младший научный сотрудник.

Authors:

Vladimir I. Zui, doctor of science (geology and mineralogy), full professor; professor at the department of regional geology, faculty of geography and geoinformatics.
zui@bsu.by
Elisaveta I. Loseva, junior researcher.

RADIOGENIC HEAT PRODUCTION FROM ROCKS OF THE CRYSTALLINE BASEMENT WITHIN BELARUS

V. I. ZUI^a, E. I. LOSEVA^b

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bResearch and Production Center for Geology, 7 Akademika Kuprevicha Street, Minsk 220084, Belarus

Corresponding author: V. I. Zui (zui@bsu.by)

Heat flow density is the most representative parameter characterising the lithospheric thermal regime. Its formation includes two simultaneous processes: the entry of its first part from the mantle into the base of the crust, as well as the generation of the second part in rocks that make up the Earth's crust due to the decay of radioactive isotopes. It is known as a radiogenic heat production. The main part of the production rate within the crust is the decay of long living isotopes of Uranium, Thorium and Potassium. Other radioactive isotopes are taken into account seldom. Most researchers don't take into account also the heat production within shallow sedimentary cover overlying the crust. The territory of Belarus belongs to the Precambrian East European Platform. Its crystalline basement is hidden under rather thin sediments. A number of irregularly spaced boreholes were drilled into the crystalline basement. More than 420 rock samples of crystalline rocks were collected from their drill cores and analysed for the concentration of long living radioactive isotopes in laboratory conditions using the RUG-91M «Adani» gamma-radiometer. The calculated heat production is varied in a wide range with the tendency of its higher values for acid crystalline rocks. Considerably lower heat generation relates to rocks of basic composition. In practice it is possible to get rock samples only for the uppermost drilled horizons of the crust. Due to a lack of crystalline rock samples for deeper horizons, several models of heat production variation with depth derived from seismic velocities are widely used for the whole crustal section.

Keywords: geothermics; heat flow; long living radioactive isotopes; heat production; radiometer.

Введение

Территория Беларуси относится к докембрийской Восточно-Европейской платформе. На большей площади страны, за исключением Припятского прогиба, восточной части Подляско-Брестской впадины и Оршанской впадины, кристаллический фундамент перекрыт тонким (первые сотни метров) платформенным чехлом. В пределах впадин мощность осадочной толщи возрастает до 1,0–1,7 км, и только в наиболее погруженных блоках Припятского прогиба она достигает 4–5 км и в нескольких случаях 6 км [1; 2].

Тепловой режим земной коры в частности и литосферы в целом тесно связан с тектоникой и геодинамикой рассматриваемого региона. Основными параметрами теплового поля региона являются наблюдаемые температура, геотермический градиент и плотность теплового потока. Последняя относится к наиболее важным свойствам, определяющим тепловой режим земной коры и верхней мантии, и рассматривается как одна из значимых характеристик, которые идентифицируют особенности геолого-тектонического строения и геодинамики региона [3]. Формирование теплового потока в земной коре включает два одновременных процесса: поступление первой его части из мантии в подошву земной коры и генерацию второй части породами, слагающими кору и содержащими изотопы радиоактивных элементов. Их спонтанный распад сопровождается выделением радиогенного тепла – радиогенной теплогенерацией. Она обеспечивается в основном долгоживущими изотопами урана, тория и калия. Другие радиоактивные элементы вносят незначительный вклад в особенности теплового поля коры и в подавляющем большинстве случаев не рассматриваются [4].

Значение плотности теплового потока, идущего из земных недр, является важнейшим индикатором геодинамической активности структур литосферы как на современном этапе их развития, так и в геологическом прошлом. Для расчета распределения температуры в разрезе литосферы и мантийного теплового потока разработаны три основные модели изменения интенсивности теплогенерации с глубиной – ступенчатая, линейная и экспоненциальная [5]. Известны и другие модели, например послойная. В каждом случае отправным параметром считается значение радиогенной теплогенерации консолидированной земной коры в ее верхних слоях (у земной поверхности). В результате этот параметр является одним из наиболее важных при построении моделей геодинамических обстановок.

Методика определения уровня радиогенной теплогенерации

Для определения показателей генерации радиогенного тепла были проанализированы более 420 образцов горных пород различного состава, отобранных из керна скважин, с помощью которых была вскрыта верхняя часть кристаллического фундамента Беларуси [6]. В целом с учетом определений, выполненных в конце прошлого столетия, количество образцов, исследованных на содержание изотопов

урана, тория и калия, достигло около 600 ед. Они отобраны из керна скважин, которые были пробурены в пределах Беларуси и вскрыли кристаллический фундамент Белорусской антеклизы, Припятского прогиба, белорусской части Подляско-Брестской впадины, Полесской седловины и Оршанской впадины. Небольшое количество образцов изучено в западной части России (8 образцов из скважин «Лобно», «Орел», «Смоленск», «Ярцево», «Рославль», «Серебрянка» и «Мишина гора»), а также в Балтийской синеклизе на территории Литвы (12 образцов из скважин «Варена-Лт-982» и «Видмантай-1»).

Отбор кернового материала на территории Беларуси выполнялся начиная с конца 1960-х до конца 1990-х гг., на территории России и Литвы – в основном в течение 1970–90-х гг. Плотная сеть скважин, с помощью которых был вскрыт кристаллический фундамент, относится к центральной части Белорусской антеклизы и Микашевичско-Житковичскому выступу фундамента. Слабо изученными методом глубокого бурения остаются Оршанская впадина и ее продолжение в России. Большинство имевшихся в распоряжении образцов были извлечены из керна скважин, пробуренных в Белорусской антеклизе, значительно меньшее количество образцов – из керна скважин, расположенных в Припятском прогибе. Кристаллические породы фундамента Оршанской впадины представлены менее чем 10 образцами, отобранными из скважин, которые пробурены как на белорусской, так и на российской стороне впадины. Наименее изучен фундамент Подляско-Брестской впадины.

Распределение скважин отражено на рис. 1. Такие массовые исследования проводились в Беларуси впервые. В 1980-х гг. по инициативе Л. А. Цыбули и М. С. Жука в научных институтах России (Всесоюзный научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского, Всесоюзный научно-исследовательский институт ядерной геофизики и геохимии) и Украины (Институт геофизики имени С. И. Субботина НАН Украины) было определено содержание радиоактивных изотопов в единичных образцах кристаллических пород.

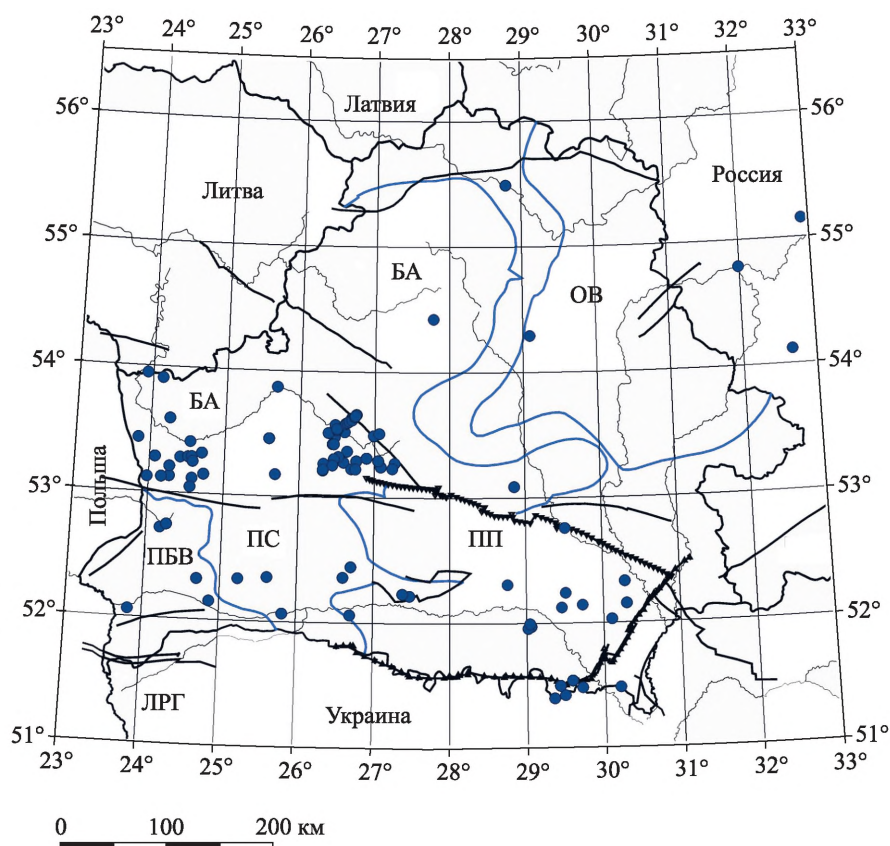


Рис. 1. Распределение скважин, из которых были отобраны образцы керна для изучения их радиогенной теплогенерации
(БА – Белорусская антеклиза; ЛРГ – Луковско-Ратновский горст; ОВ – Оршанская впадина; ПБВ – Подляско-Брестская впадина; ПС – Полесская седловина; ПП – Припятский прогиб)

Fig. 1. Distribution of boreholes from which core samples were taken to study of their radiogenic heat production
(BA – Belarusian Anticline; LRH – Lukow-Ratno Horst; OD – Orsha Depression; PBD – Podlasie – Brest Depression; PS – Polesian Saddle; PT – Pripyat Trough)

Определение концентрации изотопов урана, тория и калия проводилось на гамма-радиометре РУГ-91М «Адани» (научно-производственное частное предприятие «Адани», Беларусь)¹ (рис. 2, а). Принцип его действия основан на анализе амплитудного распределения световых импульсов, возникающих в сцинтилляционном детекторе при попадании в него гамма-квантов.



Рис. 2. Общий вид гамма-радиометра РУГ-91М «Адани» (а) и его внутренний вид при снятом сосуде Маринелли (б)

Fig. 2. General view of the RUG-91M «Adani» gamma radiometer (a) and its internal view with the Marinelli vessel removed (b)

Гамма-радиометр РУГ-91М «Адани» предназначен для экспрессного определения по гамма-излучению удельной и объемной активности радионуклидов естественного происхождения ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th с индикацией абсолютных статистических погрешностей измерения и вычислением суммарной удельной эффективной активности для широкого класса исследуемых образцов (в воде, почве, продуктах питания, продукции животноводства и растениеводства, сырье и материалах, строительных материалах, горных породах, лесо- и пиломатериалах, хлопчатобумажных тканях, сухих травах)² [7].

Верхняя часть прибора имеет поворотную свинцовую крышку, обеспечивающую доступ к сцинтиллятору. В качестве детектора гамма-квантов используется кристалл NaJ(Tl) размером 40×40 мм, заключенный в круговую свинцовую обойму. Измельченный образец горной породы помещается в специальную кювету (сосуд Маринелли) объемом 0,5 л, которая облегает кристалл детектора. Кюветы с пробой устанавливаются в свинцовый защитный экран, который перед началом измерений закрывается свинцовой крышкой, уменьшающей влияние внешнего фонового излучения³ (рис. 2, б). Доступ к анализируемой пробе обеспечивается открытием поворотной части свинцовой крышки. Свинцовая защита прибора и его поворотной крышки заключена в металлический корпус.

Световые вспышки через световод попадают на фотокатод фотоэлектронного умножителя и преобразуются в электрические сигналы, которые после усиления поступают в блок селекции импульсов⁴ (рис. 3). В блоке селекции импульсов выполняется сортировка импульсов по 256 амплитудным каналам, тем самым измеряется их амплитудное распределение пропорционально энергии регистрируемых гамма-квантов. В блоке обработки импульсов анализируются значения распределений и вычисляется активность анализируемых радионуклидов, он управляет работой блока селекции импульсов и устанавливает количественные характеристики ионизирующего излучения. Это позволяет определять вклады изотопов тория и калия в суммарную активность пробы. Природный уран лишь на 0,72 % состоит из изотопа ^{235}U , тогда как 99,27 % от его структуры составляет изотоп ^{238}U [8]. В связи с незначительным процентным содержанием изотопа ^{235}U в общем уране в природной среде уровень его теплогенерации не учитывался. Активность 1 г нуклида ^{238}U является низкой и составляет приблизительно 12,5 кБк, что осложняет его выявление гамма-радиометром РУГ-91М «Адани», поэтому концентрация изотопа ^{238}U определялась по содержанию продукта его распада – изотопа ^{226}Ra .

¹Гамма-радиометры РУГ-91М-2 «Адани»: описание типа средств измерений для Гос. реестра средств измерений [Электронный ресурс]. URL: <http://media.belgim.by/grsi/9894.pdf> (дата обращения: 25.05.2023); Гамма-радиометр РУГ-91М [Электронный ресурс]. URL: <http://forum.rhbz.org/topic.php?forum=2&topic=174> (дата обращения: 25.05.2023).

²Гамма-радиометр РУГ-91М [Электронный ресурс]. URL: <http://forum.rhbz.org/topic.php?forum=2&topic=174> (дата обращения: 25.05.2023).

³Гамма-радиометр РУГ-91М [Электронный ресурс]. URL: <http://forum.rhbz.org/topic.php?forum=57&topic=337> (дата обращения: 25.05.2023).

⁴Функциональная схема гамма-радиометра [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/7083546/page:5> (дата обращения: 25.05.2023).

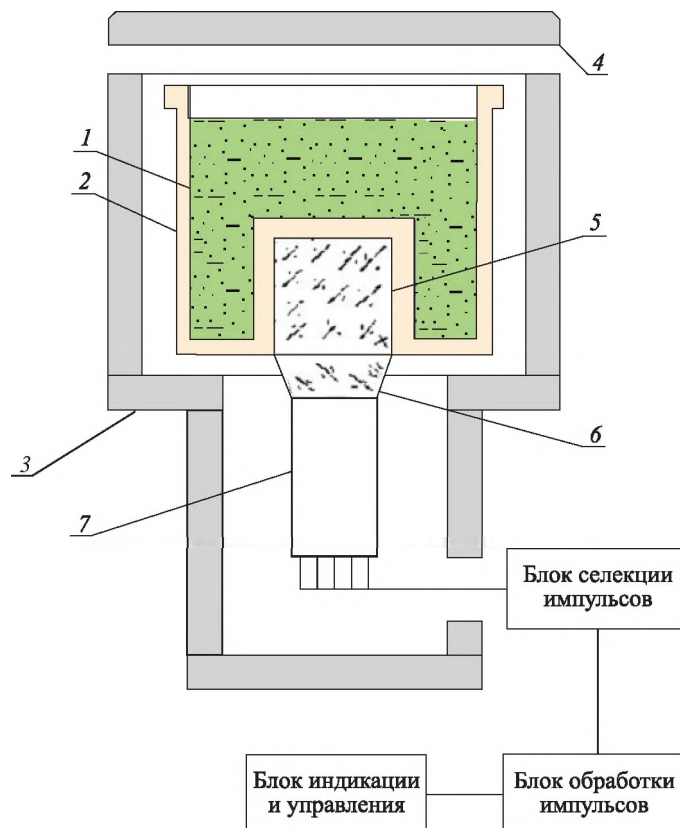


Рис. 3. Упрощенная функциональная схема гамма-радиометра РУГ-91М «Адани»:

1 – исследуемый образец (проба); 2 – кювета (сосуд Маринелли);
3 – защитный свинцовый экран; 4 – поворотная свинцовая крышка;
5 – сцинтиллятор NaI(Tl); 6 – световод; 7 – фотоэлектронный умножитель

Fig. 3. Simplified functional diagram of the RUG-91M «Adani» gamma radiometer:

1 – test sample (sample); 2 – cuvette (Marinelli vessel);
3 – protective lead screen; 4 – rotary lead cover;
5 – NaI(Tl) scintillator; 6 – light guide; 7 – photomultiplier

Процесс измерений начинается после помещения раздробленного образца внутрь прибора, закрытия крышки и включения радиометра. Продолжительность регистрации в значительной степени зависит от активности изучаемого образца, для малоактивных проб время измерения может достигать до нескольких десятков минут. Принцип действия гамма-радиометра основан на подсчете числа световых импульсов, возникающих в сцинтилляционном детекторе, при попадании на него гамма-квантов. Число зарегистрированных в единицу времени световых импульсов однозначно связано с активностью исследуемого образца.

Для повышения эффективности регистрации световых импульсов, возникающих в сцинтилляторе при попадании в него гамма-квантов от исследуемого образца, кювета с пробой устанавливается в свинцовый защитный экран под закрытой свинцовой крышкой, уменьшающей влияние внешнего фонового излучения.

Блок индикации и управления определяет режимы работы прибора и показывает результаты измерения. Режим работы гамма-радиометра задается с помощью 14 кнопок на его передней панели (см. рис. 2, а). Результаты измерений отображаются на двух жидкокристаллических индикаторах. В левом окне показывается значение удельной активности, а в правом – значение погрешности измерения. В левом окне индицируется также масса пробы (в кг)⁵.

Измерения каждого образца (как правило, продолжительностью по 30 мин) выполнялись дважды. Относительная погрешность при этом составляла обычно 10–25 %. До 50 % она увеличивалась при низких значениях активности (от 3 до 10 Бк/кг)⁶.

⁵Функциональная схема гамма-радиометра... ; Назначение и технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/9899020/page:24> (дата обращения: 25.05.2023).

⁶Гамма-радиометры РУГ-91М-2 «Адани»...

Радиоактивные элементы в породах кристаллического фундамента Беларуси

Содержание радиоактивных элементов и величина теплогенерации в породах кристаллического фундамента Беларуси прямо связаны с их минеральным и химическим составом. Сведения о названиях и номерах скважин, из которых отбирались анализируемые образцы, о результатах измерений по урану, торию и калию в единицах удельной активности (в Бк/кг) и концентрации (в г/т), а также о типе горной породы и ее плотности вносились в таблицу формата *Excel*. Далее вычислялся уровень радиогенной теплогенерации (в мкВт/м³). Пример компиляции исходных и полученных данных приведен в табл. 1 для ряда скважин, с помощью которых был вскрыт кристаллический фундамент в центральной части Беларуси (лист карты N-35-XXI (Столбцы)).

Пересчет значений активности каждого элемента в значения весовой концентрации осуществлялся по формуле

$$Q = 2,8 \cdot 10^{-6} A \cdot T,$$

где Q – масса радиоактивного элемента (в граммах), активность которого равна 1 Ки; A – атомная масса, г; T – период полураспада, лет [9].

С учетом того что 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк, в результате необходимых вычислений были получены следующие значения: 1 Бк ^{238}U = $8,1013 \cdot 10^{-5}$ г; 1 Бк ^{232}Th = $2,4386 \cdot 10^{-4}$ г; 1 Бк ^{40}K = $3,9654 \cdot 10^{-6}$ г.

Известно, что калий состоит из трех изотопов: радиоактивного изотопа ^{40}K (0,012 %) и стабильных изотопов ^{39}K (93,258 %) и ^{41}K (6,730 %) ⁷.

Уровень генерации радиогенного тепла вычислялся по формуле

$$H\sigma = (a \cdot U + b \cdot \text{Th} + c \cdot \text{K}),$$

где H – количество выделенного тепла в 1 м³ породы, мкВт; σ – плотность породы, кг/м³; U , Th и K – значения концентрации радиоактивных элементов урана, тория и калия соответственно, определяемые отношением массы радиоактивных изотопов к общей массе горной породы; a , b , c – пересчетные коэффициенты, равные $9,73 \cdot 10^{-5}$; $2,63 \cdot 10^{-5}$ и $3,57 \cdot 10^{-9}$ Вт/кг соответственно [10].

Значения распределения суммарной радиогенной теплогенерации, создаваемой изотопами урана, тория и калия, приведены на рис. 4. Около 10 одиночных образцов, показатели теплогенерации которых больше 10 мкВт/м³, на графике не отображены.

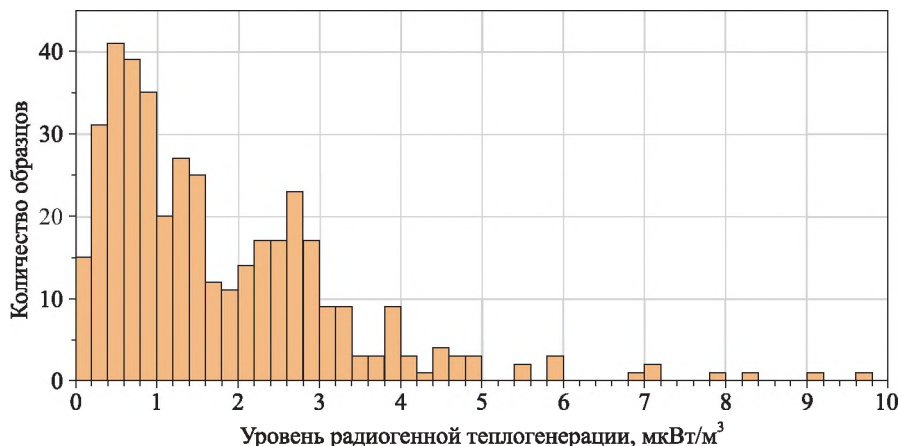


Рис. 4. Распределение радиогенной теплогенерации в породах кристаллического фундамента Беларуси

Fig. 4. The distribution of radiogenic heat generation in rocks of the crystalline basement of Belarus

Наибольшее количество изученных образцов горных пород (около 148) имеют значения теплогенерации от 0,2 до 1,0 мкВт/м³. Они извлечены из скважин, расположенных в центральной части Белорусской антеклизы – древней структуры докембрийского возраста, самая верхняя часть кристаллического фундамента которой, вероятно, была эродирована и размыва. Образцы, отобранные из скважин, которые пробурены в структурах палеозойского возраста (Припятский прогиб и восточная часть Подляско-Брестской впадины), обладают повышенными показателями теплогенерации (1–3 мкВт/м³), однако здесь изучено значительно меньше образцов керна.

⁷Isotopes of potassium [Electronic resource]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_potassium (date of access: 25.05.2023).

Пример сводки данных

An example of the data summary

№ п/п	Скважина	^{238}U , Бк/кг	^{238}U , г/т	^{232}Th , Бк/кг	^{232}Th , г/т	^{40}K , Бк/кг	^{40}K , г/т
1	СТ-147-223,5	31,1	2,52	12,2	2,97	130,5	0,52
2	СТ-147-226	21,8	1,77	11,7	2,85	0	0
3	СТ-194-333,3	25,7	2,08	12,2	2,97	203,2	0,80
4	СТ-212-114	31,2	2,53	8,8	2,14	284,5	1,13
5	СТ-220-313	30,6	2,48	19,5	4,75	222,4	0,88
6	СТ-220-340	55,7	4,51	26,2	6,39	357,2	1,42
7	СТ-227-187,5	22,9	1,85	13,0	3,17	0	0
8	СТ-231-121	39,1	3,17	42,6	10,39	1053,0	4,17
9	СТ-234-137,5	19,3	1,56	8,7	2,12	0	0
10	СТ-235-131	39,3	3,18	35,9	8,75	898,9	3,56
11	СТ-239-240	7,6	0,61	3,9	0,95	0	0
12	СТ-239-294	34,0	2,75	21,2	5,17	4,8	0,19
13	СТ-239-332	26,2	2,12	13,6	3,32	0	0
14	СТ-239-472	20,3	1,64	15,4	3,75	0	0
15	СТ-239-478	2,0	0,16	16,5	4,02	0	0
16	СТ-239-610	130,1	10,54	37,9	9,24	991,5	3,93
17	СТ-239-610	141,4	11,45	45,7	11,14	999,6	3,96
18	СТ-239-643	7,1	0,57	20,8	5,07	0	0
19	СТ-239-657,5	14,8	1,19	7,5	1,83	0	0
20	СТ-243-248,8-249,8	35,8	2,90	1,5	3,66	857,8	3,40
21	СТ-243-279-283	23,2	1,88	17,6	4,29	408,8	1,62
22	СТ-243-279-283а	27,8	2,25	14,3	3,49	459,7	1,82
23	СТ-243-282,3	67,7	5,48	19,3	4,71	775,7	3,08
24	СТ-243-283,5-284,5	23,2	1,88	17,6	4,29	408,8	1,62
25	СТ-243-345-351	0	0	0	0	7,3	0,29
26	СТ-243-412-418	13,2	1,07	12,5	3,05	7,9	0,31
27	СТ-250-520	6,2	0,50	11,0	2,71	0,0	0,00
28	СТ-251-458	39,5	3,20	25,6	6,24	450,2	1,78
29	СТ-251-494	15,1	1,22	13,8	3,36	0	0
30	СТ-251-542	0	0	0	0	0	0
31	СТ-302-261,5-270,5	20,1	1,63	9,1	2,22	257,9	1,02
32	СТ-302-295-308	22,7	1,84	10,9	2,66	208,7	0,83
33	СТ-303-586	15,8	1,28	17,3	4,22	0	0
34	СТ-306-413,3	28,2	2,28	18,1	4,41	0	0
35	СТ-306-459,5-469	2,3	0,19	6,7	1,63	3,2	0,13
36	СТ-306-490	20,4	1,65	11,8	2,88	53,6	0,21
37	СТ-306-505-505,5	0	0	0	0	148,3	0,59
38	СТ-307-366	20,2	1,64	9,2	2,24	0	0
39	СТ-307-446	18,3	1,48	7,6	1,85	0	0
40	СТ-307-454	8,8	0,71	6,1	1,49	0	0
41	СТ-307-477	169,1	13,70	47,3	11,53	1158,0	4,59
42	СТ-307-488	34,1	2,76	14,9	3,63	36,5	0,14
43	СТ-307-490	26,2	2,12	11,7	2,85	23,8	0,09
44	СТ-516-549 (Рубежовичи)	15,8	1,3 (1,0)	19,4	4,7 (6,0)	209,2	0,80

Таблица 1

по изученным образцам горных пород

Table 1

concerning the analysed rock samples

К _{общ} , %	Теплогенерация, мкВт/м ³	Плотность, кг/м ³	Порода
0,44	0,95	—	Плаггиогнейс амфибол-биотитовый
0	0,69	2800	Сланец амфиболовый с пиритом
0,67	0,85	—	Плаггиогнейс амфибол-биотитовый
0,95	0,94	2800	Амфиболит биотитсодержащий
0,74	1,09	—	Плаггиогнейс биотит-амфиболовый
1,19	1,82	—	Плаггиогнейс биотитовый
0	0,74	—	Плаггиогнейс амфиболовый
3,50	1,88	2670	Гранит крупнозернистый
0	0,59	2850	Метадиабаз
2,99	1,72	2670	Гранит крупнозернистый
0	0,23	—	Амфиболит
0,16	1,27	3100	Амфиболит гранатовый
0	0,82	—	Амфиболит гранатовый
0	0,72	2800	Амфиболит
0	0,34	—	Плаггиогнейс амфиболовый
3,30	3,70	2670	Гранит
3,33	4,27	—	Гранит
0	0,53	—	Амфиболит магнетитовый
0	0,54	3300	Гранат-пироксеновая порода с магнетитом
2,86	1,34	—	Плаггиогранит пегматоидный с турмалином
1,36	0,96	—	Плаггиогнейс биотитовый
1,53	0,97	—	Гранит турмалинсодержащий
2,59	2,13	2850	Гранит
1,36	0,96	—	Гранит грейзенизированный с турмалином
0,24	0	2750	Плаггиогнейс куммингтонитовый с турмалином
0,26	0,54	2800	Плаггиогнейс амфиболовый
0	0,34	—	Амфиболит
1,49	1,48	—	Амфиболит
0	0,58	—	Кварцит амфибол-магнетитовый
0	0	2700	Плаггиогнейс
0,86	0,69	2800	Плаггиогнейс амфиболовый
0,69	0,77	—	Сланец амфиболовый
0	0,66	—	Плаггиогнейс амфиболовый
0	0,95	—	Плаггиогнейс гранат-амфиболовый
0,11	0,19	3000	Сланец амфиболовый с гранатом и магнетитом
0,18	0,71	2950	Гнейс гранатовый
0,49	0,05	2900	Сланец амфиболовый гранатсодержащий
0	0,61	—	Амфиболит
0	0,54	—	Амфиболит
0	0,30	—	Амфиболит
3,86	4,97	—	Гранит
0,12	1,03	—	Плаггиогнейс амфиболовый
0,07	0,79	—	Плаггиогнейс амфиболовый
0,7 (0,8)	0,77	2794	Микрогнейс эпидот-амфиболовый

Радиоактивные элементы присутствуют в составе всех горных пород. Излучаемая энергия радиоактивного распада превращается в тепло посредством абсорбции. На фоне того, что концентрация в отдельных образцах совпадающих и похожих типов пород может быть разной, обнаруживается общее правило.

Выделяются шесть типов горных пород кристаллического фундамента Беларуси, различающихся средними значениями содержания радиоактивных элементов (табл. 2).

По полученным ранее результатам [6] и с учетом преобладающих типов метаморфических и интрузивных пород в отдельных структурных зонах фундамента выявлены различия в содержании радиоактивных изотопов и величине теплогенерации (табл. 3).

Таблица 2

Содержание радиоактивных элементов и уровень радиогенной теплогенерации
главных типов пород кристаллического фундамента Беларуси

Table 2

Content of radioactive elements and the level of radiogenic heat generation of the main types
of rocks of the crystalline basement of Belarus

Типы горных пород	Параметры			
	^{238}U , г/т	^{232}Th , г/т	$K_{\text{общ}}$, %	Уровень радиогенной теплогенерации, мкВт/м ³
Ультрабазиты и ультрамафиты аргеловщинского комплекса, некоторые разности амфиболовых сланцев и карбонатные породы ооловской серии	0,06–2,10	0,9–4,7	Менее 0,1	0,20–0,75
Метаморфические породы основного и среднего состава щучинской и ооловской серий и амфиболит-гнейсового комплекса (кристаллические сланцы, амфиболиты, амфиболовые и гранат-амфиболовые сланцы, амфиболовые гнейсы), эндербиты, габброиды	0,38–2,81	1,5–4,2	0,1–0,9	0,03–1,10
Магматические породы основного и среднего состава (метадиабазы, диориты), метаморфические породы (амфибол-биотитовые и биотитовые гнейсы, серицит-хлоритовые сланцы)	1,20–5,40	2,8–9,9	1,1–2,1	0,75–2,30
Магматические породы среднего и кислого состава (кварцевые диориты, гранодиориты, граниты), гранито-гнейсы, трахиандезиты, а также метаморфические породы (гранат-биотитовые гнейсы щучинской и кулажинской серий)	1,60–4,50	2,7–11,7	2,0–2,8	0,80–2,0
Магматические породы кислого состава (чарнокиты, граниты, гранито-гнейсы)	2,40–8,80	4,2–19,7	3,2–4,4	1,40–4,50
Магматические породы кислого состава с повышенной калиевой щелочностью (субщелочные и рапакивиоподобные граниты, сиениты)	10,70–16,60	30,6–82,6	4,4–6,2	5,50–9,10

Примечания: 1. Разработано на основе данных публикации [11]. 2. Здесь и в табл. 2 суммарное процентное содержание стабильного изотопа ^{39}K и радиоактивного изотопа ^{40}K в изученном образце обозначается как $K_{\text{общ}}$.

Таблица 3

Содержание радиоактивных элементов и уровень радиогенной теплогенерации
в породах главных структурных зон и интрузивных массивов кристаллического фундамента Беларуси

Table 3

Content of radioactive elements and the level of radiogenic heat generation
in rocks of the main structural zones and intrusive basement massifs of Belarus

Структурные зоны и интрузивные массивы	Параметры							
	^{238}U , Бк/кг	^{238}U , г/т	^{232}Th , Бк/кг	^{232}Th , г/т	^{40}K , Бк/кг	^{40}K , г/т	$K_{\text{общ}}$, %	Уровень радиогенной теплогенерации, мкВт/м ³
<i>Западная часть Беларуси</i>								
Гранулитовые блоки	25,06	2,03	22,09	5,39	472,5	1,87	1,58	1,10
Зоны бластомилонитов Белорусско-Прибалтийского гранулитового пояса	63,60	5,15	64,11	17,09	1082,0	4,01	3,61	2,95

Окончание табл. 3
Ending of the table 3

Структурные зоны и интрузивные массивы	Параметры							Уровень радио- генной теплогене- рации, мкВт/м ³
	²³⁸ U, Бк/кг	²³⁸ U, г/т	²³² Th, Бк/кг	²³² Th, г/т	⁴⁰ K, Бк/кг	⁴⁰ K, г/т	K _{общ} , %	
Мостовский и другие массивы суб- щелочных гранитов	152,64	11,53	226,17	55,15	1584,9	3,82	5,25	7,27
<i>Центральная часть Беларуси</i>								
Районы распространения амфиболит- гнейсового комплекса	34,26	2,78	23,94	5,82	322,1	1,76	1,08	1,28
Околовская грабен-синклиналь, сло- женная породами сланцево-гнейсового комплекса (околовская серия)	24,93	2,01	14,29	3,54	182,6	0,76	0,63	0,86
Ультрамафитовые массивы	18,11	1,47	9,90	2,41	43,1	0,17	0,14	0,65
Бобовнянский массив рапакивиподоб- ных гранитов	116,53	9,45	97,24	23,71	1357,3	4,93	4,52	4,64
<i>Юго-восточная часть Беларуси</i>								
Брагинский гранулитовый массив	37,82	3,06	42,81	10,43	720,3	2,69	2,40	1,82
Районы распространения амфиболит- гнейсового комплекса	24,92	2,02	19,98	4,86	406,7	0,66	1,35	0,99
Осницко-Микашевичский вулканоплу- тонический пояс	31,37	2,53	30,25	7,37	713,3	1,21	2,42	1,38
Северный эндоконтакт Коростенского рапакивигранитного массива	92,38	7,47	98,48	24,0	1336,5	4,65	4,46	4,08
Бобовнянская впадина	66,82	5,41	55,64	13,57	1034,0	4,10	3,44	2,67
Овручская впадина	70,10	5,68	54,42	13,27	621,3	2,46	2,07	2,73

Примечание. Разработано на основе данных публикации [11].

На рис. 5–7 по результатам изучения более 420 образцов горных пород фундамента Беларуси показана связь между значениями концентрации изотопов ²³⁸U, ²³²Th и ⁴⁰K и уровнем общей теплогенерации. В первом приближении все три набора точек на графиках можно упрощенно аппроксимировать прямыми линиями. Наибольший вклад в теплогенерацию обеспечивают изотопы ²³⁸U и ²³²Th, значительно меньший вклад вносит изотоп ⁴⁰K.

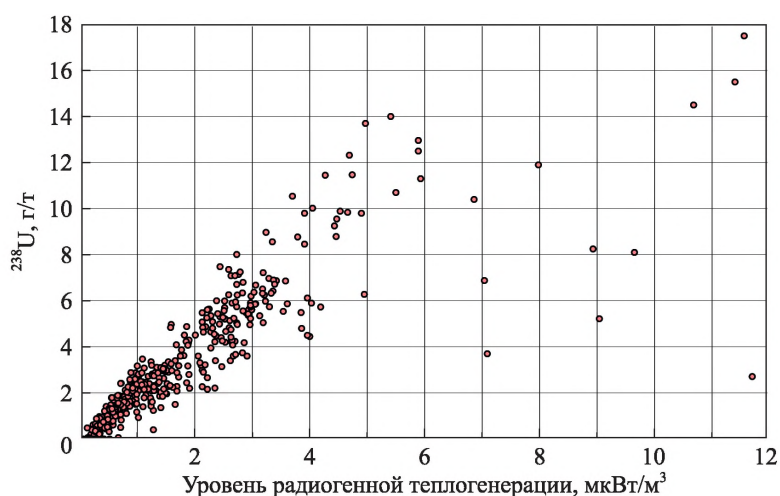


Рис. 5. Связь значений концентрации изотопа ²³⁸U с уровнем радиогенной теплогенерации

Fig. 5. Relationship between ²³⁸U isotope concentration and the level of radiogenic heat generation

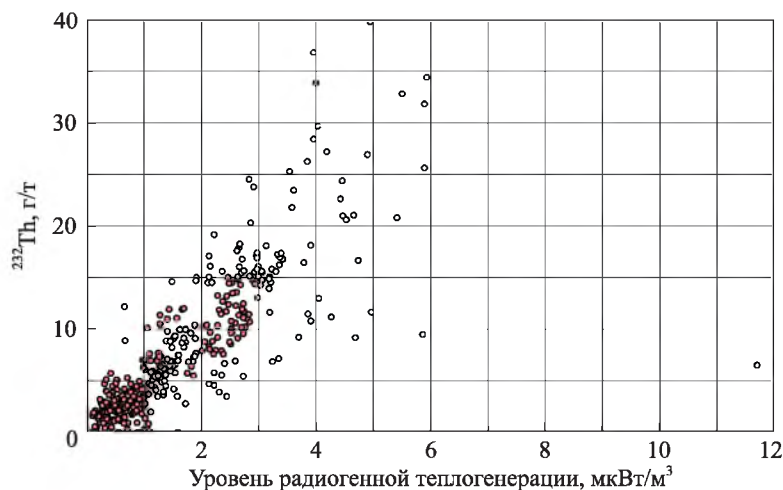


Рис. 6. Связь значений концентрации изотопа ^{232}Th с уровнем радиогенной теплогенерации

Fig. 6. Relationship between ^{232}Th isotope concentration and the level of radiogenic heat generation

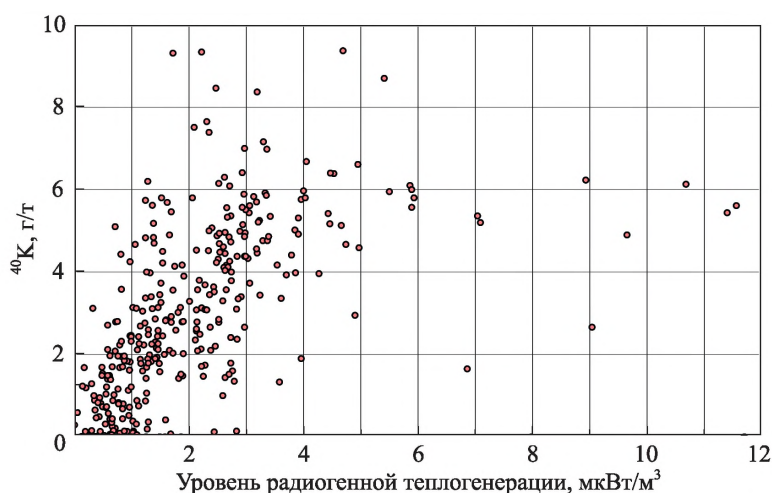


Рис. 7. Связь значений концентрации изотопа ^{40}K с уровнем радиогенной теплогенерации

Fig. 7. Relationship between ^{40}K isotope concentration and the level of radiogenic heat generation

На фоне повышения общего уровня теплогенерации по мере увеличения значений содержания изотопа наблюдается ряд точек в нижней правой части графика за пределами области их кучного распределения. Это можно связать как с возможными погрешностями определения показателей концентрации изотопа ^{238}U , так и с его подвижностью (миграцией) в породах.

Количество растворимого компонента радиоактивных элементов увеличивается с ростом значений их общего содержания, и он становится подвижным, по мере того как вода мигрирует через породу. Высокая подвижность этих элементов литосферы является причиной увеличения показателей их концентрации в верхних слоях земной коры как еще не завершившегося процесса, наблюдаемого на протяжении всей истории Земли. Пространственное и хронологическое распределение источников радиоактивного тепла оказывает большое влияние на температурное поле недр Земли, так как 30–50 % плотности теплового потока, зафиксированного у поверхности, вызваны распадом нестабильных изотопов [12]. Считается также, что в пределах однородных слоев литосферы распределение теплогенерирующих радиоактивных элементов не остается постоянным и не соответствует показателям их концентрации, наблюдаемым в верхней части земной коры. Уровень радиогенной теплогенерации на глубинах, недоступных бурению, косвенно оценивается исходя из значений скорости распространения продольных сейсмических волн [13].

На рис. 6 и 7 отражено соотношение значений концентрации изотопов ^{232}Th и ^{40}K в изученных образцах с уровнем суммарной радиогенной теплогенерации, выделяемой от совместного влияния изотопов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K . На фоне монотонного увеличения их концентрации и связанного с этим роста объемов тепловыделения также наблюдается разброс точек, прежде всего в верхних частях графиков.

Результаты и их обсуждение

Тепловой поток является одним из главных исходных параметров при разработке геодинамических моделей земной коры в частности и астеносферы в целом [3]. Значения радиогенной теплогенерации существенно влияют на прогнозное распределение теплового потока в разрезе земной коры различных регионов и на выделение его провинций [14].

Проблема изучения концентрации радиоактивных долгоживущих изотопов в горных породах кристаллического фундамента Беларуси возникла в связи с анализом плотности теплового потока в регионе и оценкой его составляющей, генерируемой в верхней части земной коры вследствие их распада. Основной вклад в радиогенную теплогенерацию вносят изотопы ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K . Более 99 % радиогенного тепла, генерируемого в недрах планеты, также обусловлено этими элементами [15]. В радиогенной генерации тепла участвуют и другие изотопы, например ^{124}Sn , ^{115}In , ^{87}Rb . Однако из-за малой доли концентрации и невысокого уровня теплогенерации (для природного изотопа ^{87}Rb значение этого показателя составляет всего 10^{-12} Вт/г) их вклад несуществен (около 1 %) [12], и на практике данные изотопы не учитываются. В целом минералы урана и тория имеют значение на больших площадях, где они обнаружены в качестве микроэлементов. Только в своем глобальном распространении они вносят вклад в общее тепло Земли [12].

В областях стационарного теплового режима (отдельные структуры древних стабилизированных платформ, щиты и складчатые области фанерозоя) вклад радиогенной теплогенерации в тепловой поток равняется 40–70 % [15; 16]. Для сильно эродированного гранитогнейсового слоя земной коры доля составляющей теплового потока характеризуется весьма низкими значениями.

Доля содержания урана, тория и калия увеличивается при более высоких значениях концентрации кремнезема в породе. Эти три элемента можно найти в горных породах. Механизмы связывания приводят к образованию двух основных компонентов – легкорастворимого и менее растворимого. Менее растворимая часть закрепляется в кристаллической решетке одного или нескольких отдельных минералов, входящих или встроенных в структуру минерала. Легкорастворимая часть абсорбируется на границах зерен либо на поверхности кристаллов или находится в порах породы (рис. 8) [12].

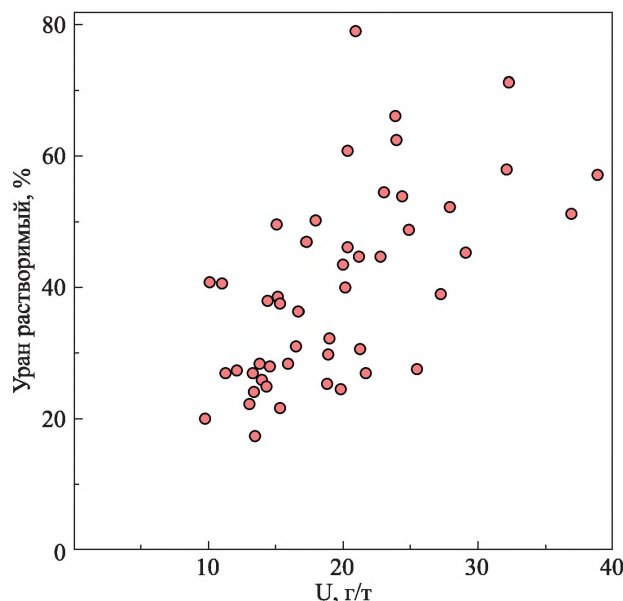


Рис. 8. Концентрация легкорастворимой части урана, содержащегося в сиените (Валь-Гиув, Аарский массив, Швейцария).
Источник: [17], с изменениями

Fig. 8. Concentration of the easily soluble part of the uranium contented in syenite (Val Giuv, Aarmassif, Switzerland).
Source: [17], modified

Растворимая составляющая радиоактивных элементов увеличивается пропорционально их общей концентрации и становится подвижной, как только вода мигрирует через породу. Эта миграция приводит к перераспределению урана и тория. Такое перераспределение происходит не только при выветривании, но и при остывании интрузий в верхней части земной коры [18; 19]. Второй процесс может даже привести к перераспределению относительно растворимых компонентов. В связи с этим образцы, полученные из коры выветривания кристаллических пород, не отбирались.

Заключение

Результаты проведенного исследования радиогенной теплогенерации образцов кристаллического фундамента показывают, что значения теплогенерации ультраосновных и основных пород (ультрамафиты, амфиболиты, амфиболовые сланцы, габброиды, метадиабазы) являются более низкими, чем значения теплогенерации кислых пород (гранитогайсы, граниты, риолиты, сиениты). Однотипные породы, входящие в состав разных вещественных комплексов и распространенные в различных структурных зонах кристаллического фундамента, имеют близкие значения содержания элементов.

Минимальные значения параметров связаны с ультрамафическими породами и метаморфическими образованиями Околовской грабен-синклинали, более высокие – с областями преимущественного распространения пород амфиболит-гнейсового комплекса в центральной и юго-восточной частях Беларуси, а также породы гранулитовых блоков в Белорусско-Прибалтийском поясе. Зоны бластомилонитов, разделяющие эти блоки, имеют повышенную теплогенерацию, обусловленную развитием в их пределах разнообразных гранитоидов.

Максимальное содержание изотопов и самые большие величины теплогенерации свойственны наиболее молодым субщелочным и рапакивигоподобным гранитам мостовского, бобовнянского и коростенского комплексов рапакивигранитной формации. Они обогащены торием, который концентрируется в монаците, ортите, торите, цирконе и других акцессорных минералах, а также ураном и редкоземельными элементами. Породы рапакивигранитной формации на западе Восточно-Европейского кратона слагают обширные массивы. В районах их распространения также зафиксирован повышенный тепловой поток.

Более высокое значение теплогенерации наблюдается в северной зоне Припятского прогиба. В скважине «Барсуки-60» оно составляет $2,15 \text{ мкВт/м}^3$, в скважине «Судовица» – $7,0\text{--}5,5 \text{ мкВт/м}^3$. В других скважинах показатель теплогенерации изменяется от $0,56$ до $5,50 \text{ мкВт/м}^3$. Уровень радиогенной теплогенерации в скважинах, пробуренных на Бобовнянском выступе Белорусской антеклизы, является низким ($0,52\text{--}1,24 \text{ мкВт/м}^3$), однако для одиночных образцов он возрастает до $3,35 \text{ мкВт/м}^3$. На остальной территории антеклизы значение теплогенерации колеблется от 1 до 2 мкВт/м^3 . В Оршанской впадине наибольшая величина тепловыделения ($2,62 \text{ мкВт/м}^3$) определена для одного образца частично выветрелого гнейса, поднятого из скважины «ТЛ-29», где забой вскрыл только зону выветривания (глубина $776\text{--}782 \text{ м}$). В скважине «Василевичи-15» Оршанской впадины значение теплогенерации достигает $2,15 \text{ мкВт/м}^3$. В других образцах горных пород оно характеризуется как низкое ($1\text{--}2 \text{ мкВт/м}^3$), что согласуется с невысоким наблюдаемым тепловым потоком. Из скважины «Смоленск-1», расположенной в российской части Оршанской впадины, изучен только 1 образец габбро, уровень его теплогенерации еще ниже ($0,56 \text{ мкВт/м}^3$).

Библиографические ссылки

1. Гарецкий РГ, Матвеев АВ, Махнач АС, редакторы. *Геология Беларуси*. Минск: Институт геологических наук НАН Беларуси; 2001. 815 с.
2. Махнач АС, Гарецкий РГ, Матвеев АВ. *Основы геологии Беларуси*. Махнач АС, редактор. Минск: Институт геологических наук НАН Беларуси; 2004. 392 с.
3. Хуторской МД. *Введение в геотермию*. Москва: Издательство Российского университета дружбы народов; 1996. 156 с.
4. Rybach L. Determination of heat production rate. In: Haenel R, Rybach L, Stegena L, editors. *Handbook of terrestrial heat-flow density determination: guidelines and recommendations of the International Heat Flow Commission*. Dordrecht: Springer; 1988. p. 125–142.
5. Хуторской МД, Поляк БГ. Роль радиогенной теплогенерации в формировании поверхностного теплового потока. *Геотектоника*. 2016;2:43–61. DOI: 10.7868/S0016853X16020041.
6. Лосева ЕИ, Зуй ВИ, Аксаментова НВ. Радиогенная теплогенерация горных пород главных структурных зон и интрузивных массивов кристаллического фундамента Беларуси. В: Аношко ЯИ, редактор. *Проблемы водных ресурсов, геотермии и геоэкологии. Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Г. В. Богомолова; 1–3 июня 2005 г.; Минск, Беларусь. Том 1*. Минск: Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси; 2005. с. 270–272.

7. Розанов АД, Антонов ОФ, Дридж НЛ, Лимин БВ. Опыт работы с гамма-радиометром РУГ-91 «Адани». *Гигиена и санитария*. 1994;2:40–41.
8. Audi G, Bersillon O, Blachot J, Wapstra AH. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear Physics A*. 2003;729(1):3–128. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001.
9. Горбушина ЛВ, Зимин ДФ, Сердюкова АС. *Радиометрические и ядерно-геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых*. Москва: Атомиздат; 1970. 376 с.
10. Моисеенко УИ, Смыслов АА. *Температура земных недр*. Ленинград: Недра; 1986. 178 с.
11. Зуй ВИ, Аксаметова НВ, Лосева ЕИ. Уран, торий, калий и радиогенная теплогенерация в породах кристаллического фундамента Беларуси. В: Лукашев ОВ, редактор. *Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых. Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Константина Игнатьевича Лукашева (1907–1987); 14–16 марта 2007 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Издательский центр БГУ; 2007. с. 20–23.
12. Buntebarth G. *Geothermics: an introduction*. Chapman IM, Chapman DS, translators. Berlin: Springer Berlin Heidelberg; 1984. 144 p.
13. Rybach L. The relationship between seismic velocity and radioactive heat production in crustal rocks: an exponential law. *Pageoph*. 1978;117:75–82.
14. Drury M. Heat flow provinces reconsidered. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1987;49(1–2):78–96. DOI: 10.1016/0031-9201(87)90133-6.
15. Смыслов АА, Моисеенко УИ, Чадович ТЗ. *Тепловой режим и радиоактивность Земли*. Ленинград: Недра; 1979. 191 с.
16. Кутас РИ, Гордиенко ВВ. *Тепловое поле Украины*. Киев: Наукова думка; 1971. 140 с.
17. Labhart TP, Rybach L. Granite und Uranvererzungen in den Schweizer Alpen. *Geologische Rundschau*. 1974;63:135–147.
18. Buntebarth G. Method der zur Abschätzung der Wärmeflußdichte aus dem oberen Mantel. *Geologische Rundschau*. 1976;65: 809–819.
19. Rybach L, Buntebarth G. Heat generating radioelements in granitic magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1981;10(4):395–404. DOI: 10.1016/0377-0273(81)90088-3.

References

1. Garetskii RG, Matveev AV, Makhnach AS, editors. *Geologiya Belarusi* [Geology of Belarus]. Minsk: Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus; 2001. 815 p. Russian.
2. Makhnach AS, Garetskii RG, Matveev AV. *Osnovy geologii Belarusi* [Fundamentals of the geology of Belarus]. Makhnach AS, editor. Minsk: Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus; 2004. 392 p. Russian.
3. Khutorskoi MD. *Vvedenie v geotermiyu* [Introduction to geothermics]. Moscow: Izdatel'stvo Rossiiskogo universiteta družby narodov; 1996. 156 p. Russian.
4. Rybach L. Determination of heat production rate. In: Haenel R, Rybach L, Stegena L, editors. *Handbook of terrestrial heat-flow density determination: guidelines and recommendations of the International Heat Flow Commission*. Dordrecht: Springer; 1988. p. 125–142.
5. Khutorskoi MD, Polyak BG. Role of radiogenic heat generation in surface heat flow formation. *Geotectonics*. 2016;2:43–61. Russian. DOI: 10.7868/S0016853X16020041.
6. Loseva EI, Zui VI, Aksamentova NV. [Radiogenic heat generation of rocks of the main structural zones and intrusive massifs of the crystalline basement of Belarus]. In: Anoshko YaI, editor. *Problemy vodnykh resursov, geotermii i geoekologii. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika G. V. Bogomolova; 1–3 iyunya 2005 g.; Minsk, Belarus'. Tom 1* [Problems of water resources, geothermal and geoecology. Proceedings of the International scientific conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of academician G. V. Bogomolov; 2005 June 1–3; Minsk, Belarus. Volume 1]. Minsk: Institute of Geochemistry and Geophysics of the National Academy of Sciences of Belarus; 2005. p. 270–272. Russian.
7. Rozanov AD, Antonov OF, Dridzh NL, Limin BV. [Experience with gamma-radiometer RUG-91 «Adani»]. *Gigiena i sanitariya*. 1994;2:40–41. Russian.
8. Audi G, Bersillon O, Blachot J, Wapstra AH. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear Physics A*. 2003;729(1):3–128. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001.
9. Gorbushina LV, Zimin DF, Serdyukova AS. *Radiometricheskie i yadernno-geofizicheskie metody poiskov i razvedki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Radiometric and nuclear-geophysical methods of prospecting and exploration of mineral deposits]. Moscow: Atomizdat; 1970. 376 p. Russian.
10. Moiseenko UI, Smyslov AA. *Temperatura zemnykh neдр* [The temperature of the earth's interior]. Leningrad: Nedra; 1986. 178 p. Russian.
11. Zui VI, Aksamentova NV, Loseva EI. [Uranium, thorium, potassium and radiogenic heat generation in rocks of the crystalline basement of Belarus]. In: Lukashev OV, editor. *Sovremennyye problemy geokhimii, geologii i poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Konstantina Ignatyevicha Lukasheva (1907–1987); 14–16 marta 2007 g.; Minsk, Belarus'* [Modern problems of geochemistry, geology and the search for mineral deposits. Proceedings of the International scientific conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of academician Konstantin Ignatievich Lukashev (1907–1987); 2007 March 14–16; Minsk, Belarus]. Minsk: Izdatel'skii tsentr BGU; 2007. p. 20–23. Russian.
12. Buntebarth G. *Geothermics: an introduction*. Chapman IM, Chapman DS, translators. Berlin: Springer Berlin Heidelberg; 1984. 144 p.
13. Rybach L. The relationship between seismic velocity and radioactive heat production in crustal rocks: an exponential law. *Pageoph*. 1978;117:75–82.

14. Drury M. Heat flow provinces reconsidered. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1987;49(1–2):78–96. DOI: 10.1016/0031-9201(87)90133-6.
15. Smyslov AA, Moiseenko UI, Chadovich TZ. *Teplovoi rezhim i radioaktivnost' Zemli* [Thermal regime and radioactivity of the Earth]. Leningrad: Nedra; 1979. 191 p. Russian.
16. Kutas RI, Gordienko VV. *Teplovoe pole Ukrainy* [Thermal field of Ukraine]. Kyiv: Naukova dumka; 1971. 140 p. Russian.
17. Labhart TP, Rybach L. Granite und Uranvererzungen in den Schweizer Alpen. *Geologische Rundschau*. 1974;63:135–147.
18. Buntebarth G. Method der zur Abschätzung der Wärme flu ß dichte aus dem oberen Mantel. *Geologische Rundschau*. 1976;65: 809–819.
19. Rybach L, Buntebarth G. Heat generating radioelements in granitic magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1981;10(4):395–404. DOI: 10.1016/0377-0273(81)90088-3.

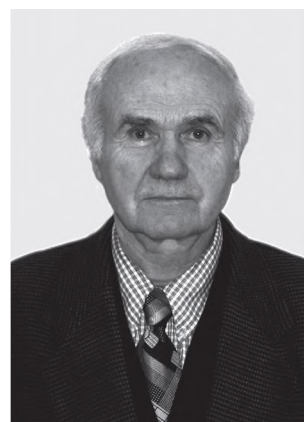
Получена 19.05.2023 / принята 28.08.2023.
Received 19.05.2023 / accepted 28.08.2023.

ЮБИЛЕИ

JUBILEES

**Николай Константинович
ЧЕРТКО**

**Mikalai Kanstancinavich
CHARTKO**



Со дня рождения доктора географических наук, профессора Николая Константиновича Чертко, профессора кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета, 8 января 2024 г. исполнится 90 лет. Н. К. Чертко – известный белорусский физикогеограф, автор работ по геохимии ландшафтов, геохимии агроландшафтов, геохимической экологии, почвоведению, математическим методам в географии.

Николай Константинович родился в крестьянской семье в д. Мостытычи (Барановичский район, Брестская область). Любознательность и целеустремленность во время учебы на географическом факультете БГУ (1952–1957) определили интерес Н. К. Чертко к научной работе, который он проявлял начиная со второго курса. Под руководством профессора В. А. Дементьева были выполнены две научные работы: карта глубины расчленения рельефа Беларуси, положенная в основу одноименной карты для Атласа БССР (1958); карта изоаномал гроз на

земном шаре, составленная совместно с В. Я. Науменко (впоследствии профессором Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина). На республиканском конкурсе студенческих работ они были отмечены почетными грамотами Министерства образования БССР.

После окончания университета Н. К. Чертко работал учителем географии в средней школе, а в 1959 г. по предложению профессора О. Ф. Якушко поступил в аспирантуру БГУ. В 1962 г. он занял должность младшего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории биохимии почв географического факультета БГУ. В 1969 г. Николай Константинович был переведен на должность старшего преподавателя кафедры почвоведения и географии географического факультета, а в 1972–1992 гг. он являлся доцентом этой кафедры. С 1992 по 2020 г. Н. К. Чертко работал профессором кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики БГУ. В настоящее время он находится на заслуженном отдыхе.

В 1968 г. Николай Константинович защитил кандидатскую диссертацию «Микроэлементы в почвах юго-западной части Брестского Полесья», в 1991 г. – докторскую диссертацию «Геохимия агроландшафтов Беларуси и их оптимизация». В 1993 г. ему было присвоено ученое звание профессора.

Н. К. Чертко читал объемные курсы «Геохимия», «Геохимия ландшафта», «География почв с основами почвоведения», «Математические методы в географии» и вел ряд специальных дисциплин.

Кроме того, Николай Константинович заложил основы геохимии агроландшафтов и развивал это новое научное направление, разрабатывающее классификацию и структуру ландшафтов, способы их оценки и оптимизации, а также нейтрализации токсических элементов и соединений. Под его руководством защищены 1 докторская диссертация и 5 кандидатских диссертаций. Н. К. Чертко являлся научным руководителем и исполнителем 16 крупных научно-исследовательских работ, выполненных в рамках государственных программ ориентированных фундаментальных исследований «Природные комплексы» (2001–2005) и «Природопользование» (2006–2010), государственных программ научных исследований «Природно-ресурсный потенциал» (2011–2015) и «Природопользование и экология» (2016–2020).

Николай Константинович опубликовал более 350 научных, учебных и учебно-методических работ, в том числе 5 монографий, 53 учебника, учебных и учебно-методических пособия, 2 авторских свидетельства. К его основным трудам относятся следующие: «Жыццё глебы» (1976), «Геохимия ландшафта» (1981, 2011), «Математические методы в физической географии» (1987), «Асновы геа-

хіміі» (2001), «Геохимическая экология» (2002), «Геохимия» (2016), «География почв с основами почвоведения» (2000, 2011), «Полевая и лабораторная практика по почвоведению» (1974, 1981, 2003), «Математические методы в географии» (2009), «География почв Беларуси» (2011), «Геохимия и экология химических элементов» (2008), «Биологическая функция химических элементов» (2012, 2022), «Геохимическая оптимизация ландшафтов» (2018).

Н. К. Чертко активно занимался общественной работой, являлся председателем учебно-методической комиссии географического факультета БГУ, членом научно-методического объединения по географии при Министерстве образования Республики Беларусь, экспертом по фундаментальным исследованиям НАН Беларуси. За активную учебно-методическую, научно-исследовательскую и общественную работу Николай Константинович награжден Почетной грамотой Верховного Совета БССР (1971), юбилейной медалью «За доблестный труд» (1970) Президиума Верховного Совета СССР, медалью «Ветеран труда» (1985), почетными грамотами и грамотами Министерства образования Республики Беларусь, Белорусского государственного университета и других организаций, удостоен почетного звания «Заслуженный работник Белорусского государственного университета», нагрудного знака «Отличник образования» Министерства образования Республики Беларусь и нагрудного знака «100 лет БГУ».

Сотрудники факультета географии и геоинформатики БГУ, коллеги и ученики сердечно поздравляют Николая Константиновича с юбилеем, желают ему доброго здоровья и благополучия.

А. А. Карпиченко¹

¹Александр Александрович Карпиченко – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета.

Aliaksandr A. Karpichenka, PhD (geography), docent, associate professor at the department of soil science and geoinformation systems, faculty of geography and geoinformatics, Belarusian State University.

E-mail: karpi@bsu.by

АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ В БГУ РАБОТ

INDICATIVE ABSTRACTS OF THE PAPERS DEPOSITED IN BSU

УДК 332.334(075.8)

Клебанович Н. В. **Земельный кадастр** [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 1-56 02 02 «Геоинформационные системы» / Н. В. Клебанович, Л. И. Смыкович ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 154 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 153–154. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/296851>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 03.05.2023, № 004103052023.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся по специальности 1-56 02 02 «Геоинформационные системы». Содержание ЭУМК предполагает повышение эффективности управления образовательным процессом и самостоятельной работой студентов по освоению учебной дисциплины «Земельный кадастр» с помощью внедрения в образовательный процесс инновационных образовательных технологий, обеспечение качественной подготовки высококвалифицированных специалистов.

УДК 634(075.8)

Матюшевская Е. В. **Основы садоводства** [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 1-31 02 01 «География (по направлениям)», направление спец. 1-31 02 01-02 «География (научно-педагогическая деятельность)» / Е. В. Матюшевская, М. С. Кастрицкая ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 88 с. Библиогр.: с. 87–88. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/297451>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 22.05.2023, № 004822052023.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Основы садоводства» предназначен для обучающихся по специальности «география (по направлениям)». Содержание ЭУМК предполагает создание условий, содействующих освоению студентами программы дисциплины.

УДК 910.1(075.8)

Галай Е. И. **Методы физико-географических исследований** [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 1-31 02 01 «География (по направлениям)», направление спец. 1-31 02 01-02 «География (научно-педагогическая деятельность)» / Е. И. Галай, Н. В. Гагина, И. И. Счастливая ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 95 с.: ил., табл. Библиогр.: с. 92–93. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/297719>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 29.05.2023, № 005029052023.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся по специальности 1-31 02 01 «География (по направлениям)». В ЭУМК изложены современные методы, приемы и методика изучения и организации отраслевых и комплексных физико-географических исследований. Представлены тематика лабораторных и практических занятий, приблизительный перечень вопросов к зачету, заданий в тестовой форме, вопросы для самоконтроля и рекомендуемая литература для изучения дисциплины.

УДК 553.061.12/17(075.8)

Генезис месторождений полезных ископаемых [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс с креативным компонентом для спец. 1-51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых» / БГУ ; сост. Д. Л. Творонович-Севрук. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 39 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 38. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/298062>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 05.06.2023, № 005405062023.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся по специальности 1-51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых». Содержание ЭУМК предполагает повышение эффективности управления образовательным процессом и самостоятельной работой студентов по освоению учебной дисциплины «Генезис месторождений полезных ископаемых» с помощью внедрения в образовательный процесс инновационных образовательных технологий, обеспечение качественной подготовки высококвалифицированных специалистов-геологов.

УДК 550.8(075.8)

Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 1-51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых» / БГУ ; сост. Д. Л. Творонович-Севрук. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 39 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 38–39. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/298066>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 05.06.2023, № 005505062023.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся по специальности 1-51 01 01 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых». Содержание ЭУМК предполагает повышение эффективности управления образовательным процессом и самостоятельной работой студентов по освоению учебной дисциплины «Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых» с помощью внедрения в образовательный процесс инновационных образовательных технологий, обеспечение качественной подготовки высококвалифицированных специалистов-геологов.

УДК 551.5(075.8)

Гледко Ю. А. Экономическая метеорология [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 7-06-0532-02 «Гидрометеорология» / Ю. А. Гледко, В. М. Лаппо ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 153 с. : ил. Библиогр.: с. 150–153. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/298278>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 07.06.2023, № 005707062023.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Экономическая метеорология» предназначен для студентов специальности 7-06-0532-02 «Гидрометеорология» факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета. В содержании ЭУМК рассматривается, с одной стороны, понятие о гидрометеорологической безопасности страны, чувствительности потребителя к гидрометеорологическому фактору, с другой стороны, степень зависимости потребителей от гидрометеорологического фактора, а также экономический эффект от использования гидрометеорологической информации. Представлены тематика, содержание и методические рекомендации для выполнения практических работ, перечень вопросов и заданий для управляемой самостоятельной работы студентов, примерный перечень заданий в тестовой форме для итогового и промежуточного контроля знаний.

УДК 631:551.509.3(075.8)

Давыденко О. В. Агрометеорологическое прогнозирование [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 1-31 02 02 «Гидрометеорология» / О. В. Давыденко ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 117 с. Библиогр.: с. 114–115. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/298569>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 12.06.2023, № 005812062023.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов специальности 1-31 02 02 «Гидрометеорология» факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета. В ЭУМК рассматриваются история прогнозирования в агрометеорологии, виды агрометеорологических прогнозов, методики их разработки, составления и оценки. Представлены тематика и методические рекомендации по выполнению практических работ и заданий управляемой самостоятельной работы студентов, перечень вопросов для подготовки к семинарским занятиям, примерный перечень вопросов для зачета по учебной дисциплине «Агрометеорологическое прогнозирование».

УДК 561.087(075.8)+581.33.087(075.8)

Писарчук Н. М. Основы палинологии [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс (авт. курс) для спец. 1-31 02 01 «География (по направлениям)», направление спец. 1-31 02 01-02 «География (научно-педагогическая деятельность)» / Н. М. Писарчук, Я. К. Еловичева ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 187 с. : табл. Библиогр.: с. 186–187. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/300210>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 27.06.2023, № 006427062023.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) (авторский курс) по учебной дисциплине «Основы палинологии» предназначен для обучающихся на географических специальностях. Разработан на основе научных и методических исследований авторов, современных достижений в области палинологии и адаптирован под образовательный процесс. Включает теоретический, практический и вспомогательный разделы, а также раздел контроля знаний. Содержание ЭУМК предполагает создание условий, содействующих освоению студентами программы дисциплины.

УДК 551.79(476)+551.89(476)+561:581.33:551.7(476)

Геологические разрезы гляциоплейстоцена и голоцена Беларуси [Электронный ресурс] : в 5 т. Т. 3. Бассейн Немана / Я. К. Еловичева, Е. Н. Дрозд ; под ред. Я. К. Еловичевой ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 371 с. : ил. Библиогр.: с. 351–357. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/301002>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 06.09.2023, № 007706092023.

Данная работа вмещает разрезы гляциоплейстоцена и голоцена, которые были изучены на территории Беларуси в бассейне реки Неман (318 ед.), а также в пределах Калининградской области России (14 ед.). Потребность в их публикации в единой монографии вызвана необходимостью детально и полно представить палинологическую характеристику 332 разрезов, а также отразить взгляд авторов на решение проблем стратиграфии и палеогеографии квартера в современном понимании развития природной среды и межрегиональной геологической корреляции. Приведена расширенная библиография по всем имеющимся публикациям палинологически изученных разрезов, а также использованы материалы фондовых исследований, находящихся в палинологической базе данных Беларуси.

Работа выполнена по личной инициативе авторов и предназначена для ученых в области четвертичной геологии, палеонтологии, палеогеографии, а также обширного круга специалистов-стратиграфов, палинологов, палеогеографов, климатологов, экологов научно-исследовательских, учебных учреждений и производственных геологических организаций.

УДК 556.5.048(075.8)

Лопух П. С. Гидрологические расчеты [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 6-05 0532 02 «Гидрометеорология» / П. С. Лопух ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 91 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 90–91. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/303892>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 30.10.2023, № 009330102023.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Гидрологические расчеты» предназначен для студентов специальности 6-05 0532 02 «Гидрометеорология». В ЭУМК содержатся вопросы предмета и состава курса «Гидрологические расчеты», история науки, методические особенности гидрологических расчетов по определению параметров годового стока рек при наличии, недостаточности и отсутствии данных гидрометрических наблюдений, внутригодового распределения стока, максимальных расходов воды весеннего половодья, летне-осенних паводков при наличии и отсутствии данных наблюдений.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОГРАФИЯ

<i>Богдасаров М. А., Богдасарова Ю. В., Власюк Н. Н., Капский Д. В.</i> Урбанология: новый взгляд на изучение городов в условиях глобализации	3
<i>Брилевский М. Н.</i> Природоохранный потенциал физико-географических районов Беларуси и его значение для национальной экологической сети	17
<i>Сушкевич Л. О., Шавель А. Н., Михайлов С. С.</i> Динамика развития атомной энергетики в мире....	31
<i>Данилович И. С., Бережкова Е. С.</i> Связь между атмосферной циркуляцией и неблагоприятными метеорологическими явлениями на территории Беларуси в период изменения климата.....	49
<i>Суховило Н. Ю., Мороз А. И., Новик А. А., Власова Д. Б.</i> Гидрохимический режим кислотных озер Беларуси в условиях климатических изменений и антропогенной нагрузки.....	58
<i>Матюшевская Е. В.</i> Индикационная роль радиального прироста сосны обыкновенной в оценке динамики состояния верховых болот Белорусского Полесья.....	70
<i>Артунов Н.</i> Множественное регрессионное моделирование: современное пространственное планирование и экономическое моделирование индустрии туризма (на примере Шекинского района)....	80

ГЕОЛОГИЯ

<i>Зуй В. И., Лосева Е. И.</i> Радиогенная теплогенерация в породах кристаллического фундамента Беларуси	90
--	----

ЮБИЛЕИ

Николай Константинович Чертко.....	105
Аннотации депонированных в БГУ работ	107

CONTENTS

GEOGRAPHY

<i>Bahdasarau M. A., Bahdasarava Yu. V., Vlasyuk N. N., Kapskii D. V.</i> Urbanology: a new perspective on the study of cities in the context of globalisation	3
<i>Bryleuski M. N.</i> Environmental potential of the physical and geographical regions of Belarus and its significance for the national ecological network	17
<i>Sushkevich L. O., Shavel' A. N., Mikhailau S. S.</i> Dynamics and spatial features of the development of nuclear energy in the world.....	31
<i>Danilovich I. S., Berezhkova K. S.</i> Relationship between atmospheric circulation and natural hazards over the territory of Belarus during the period of climate change	49
<i>Sukhovilo N. Yu., Maroz A. I., Novik A. A., Vlasova D. B.</i> Hydrochemical regime of Belarus acidotrophic lakes under conditions of climatic changes and anthropogenic load.....	58
<i>Matsiusheuskaya K. V.</i> Indicative role of pine radial growth for assessing the dynamics of the state of upland bogs Belarusian Polesie	70
<i>Artunov N.</i> Multiple regression modelling: contemporary spatial planning and economic modelling of tourism industry (case study of Shaki district)	80

GEOLOGY

<i>Zui V. I., Loseva E. I.</i> Radiogenic heat production from rocks of the crystalline basement within Belarus	90
---	----

JUBILEES

Mikalai Kanstancinavich Chartko	105
Indicative abstracts of the papers deposited in BSU.....	107

Журнал включен Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований по географическим и геолого-минералогическим наукам.

Журнал включен в библиографическую базу данных научных публикаций «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), China National Knowledge Infrastructure.

**Журнал Белорусского
государственного университета.
География. Геология.
№ 2. 2023**

Учредитель:
Белорусский государственный университет

Юридический адрес: пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Республика Беларусь.
Почтовый адрес: пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел. (017) 259-70-74, (017) 259-70-75.
E-mail: jgeo@bsu.by
URL: <https://journals.bsu.by/index.php/geography>

«Журнал Белорусского государственного
университета. География. Геология»
издается с января 1969 г.
До 2017 г. выходил под названием «Вестник БГУ.
Серия 2, Химия. Биология. География»
(ISSN 2308-9164).

Редакторы *М. И. Дикун, А. С. Люкевич,
М. А. Подголина*
Технические редакторы *Д. Ф. Когут, М. М. Баулина*
Корректор *Л. А. Меркуль*

Подписано в печать 30.11.2023.
Тираж 70 экз. Заказ 1185.

Республиканское унитарное предприятие
«СтройМедиаПроект».
ЛП № 02330/71 от 23.01.2014.
Ул. В. Хоружей, 13/61, 220123,
г. Минск, Республика Беларусь.

© БГУ, 2023

**Journal
of the Belarusian State University.
Geography and Geology.
No. 2. 2023**

Founder:
Belarusian State University

Registered address: 4 Niezaliezhnasci Ave.,
Minsk 220030, Republic of Belarus.
Correspondence address: 4 Niezaliezhnasci Ave.,
Minsk 220030, Republic of Belarus.
Tel. (017) 259-70-74, (017) 259-70-75.
E-mail: jgeo@bsu.by
URL: <https://journals.bsu.by/index.php/geography>

«Journal of the Belarusian State University.
Geography and Geology»
published since January, 1969.
Until 2017 named «Vestnik BGU.
Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya»
(ISSN 2308-9164).

Editors *M. I. Dikun, A. S. Lyukevich,
M. A. Podgolina*
Technical editors *D. F. Kogut, M. M. Baulina*
Proofreader *L. A. Merkul'*

Signed print 30.11.2023.
Edition 70 copies. Order number 1185.

Republic Unitary Enterprise
«StroiMediaProekt».
License for publishing No. 02330/71, 23 January, 2014.
13/61 V. Haruzhaj Str.,
Minsk 220123, Republic of Belarus.

© BSU, 2023