



ЖУРНАЛ
БЕЛАРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ГЕОГРАФИЯ ГЕОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

GEOGRAPHY and GEOLOGY

Издаётся с января 1969 г.
(до 2017 г. – под названием «Вестник БГУ.
Серия 2, Химия. Биология. География»)

Выходит один раз в полугодие

1

2025

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

ИВАНОВ Д. Л. – доктор географических наук, доцент; профессор кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
E-mail: geoivanov@mail.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

Baltrūnas V. Центр изучения природы, Вильнюс, Литва.

Vitchenko A. N. Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Donert K. Европейский центр качества, Европейская ассоциация географов, Зальцбург, Германия.

Zui V. I. Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Kalicki T. Институт географии Университета Яна Кохановского в Кельце, Кельце, Польша.

Katrovskii A. P. Смоленский государственный университет, Смоленск, Россия.

Kurlovich D. M. Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Lukashev O. V. Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Marks L. Варшавский университет, Варшава, Польша.

Mezentsev K. V. Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина.

Nyusupova G. N. Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алма-Ата, Казахстан.

Pirozhnik I. I. Поморский университет, Слупск, Польша.

Rodionova I. A. Российский университет дружбы народов, Москва, Россия.

Rudenko L. G. Институт географии Национальной академии наук Украины, Киев, Украина.

Sarmento Zh. K. B. 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, faculty of geography and geoinformatics, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
E-mail: antipova@bsu.by

Deputy editor-in-chief

IVANOV D. L., doctor of science (geography), docent; professor at the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
E-mail: geoivanov@mail.ru

Executive secretary

HAHINA N. V., PhD (geography), docent; head of the department of geographical ecology, faculty of geography and geoinformatics, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
E-mail: hahina@bsu.by

Baltrūnas V. Nature Research Centre, Vilnius, Lithuania.

Donert K. European Centre of Excellence, EUROGEO, Salzburg, Germany.

Kalicki T. Institute of Geography of the Jan Kochanowski University in Kielce, Kielce, Poland.

Katrovskii A. P. Smolensk State University, Smolensk, Russia.

Kurlovich D. M. Belarusian State University, Minsk, Belarus.

Lukashev O. V. Belarusian State University, Minsk, Belarus.

Marks L. University of Warsaw, Warsaw, Poland.

Mezentsev K. V. Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.

Nyusupova G. N. al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

Pirozhnik I. I. Akademia Pomorska, Slupsk, Poland.

Rodionova I. A. Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia.

Rudenko L. G. Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Sarmento Zh. K. B. University of Minho, Braga, Portugal.

Vitchenko A. N. Belarusian State University, Minsk, Belarus.

Zui V. I. Belarusian State University, Minsk, Belarus.

ГЕОГРАФИЯ

GEOGRAPHY

УДК 338.484.6

РЕГИОНАЛЬНЫЕ РАЗЛИЧИЯ В УРОВНЕ РАЗВИТИЯ МЕДИЦИНСКОГО ТУРИЗМА В БЕЛАРУСИ

Д. А. ГАРКУН¹⁾, А. Н. ТИТОВ²⁾

¹⁾Гимназия г. Фаниполя им. А. И. Гурина, ул. Комсомольская, 34, 222750, г. Фаниполь, Беларусь

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

Аннотация. Систематизированы научные подходы к понятию медицинского туризма и выполнен обзор существующих методов его изучения зарубежными учеными. На нескольких пространственных уровнях проанализирована динамика ключевых показателей развития медицинского туризма в Беларуси (обеспеченность учреждениями здравоохранения, предоставляемыми платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения; обеспеченность практикующими врачами и средними медицинскими работниками в расчете на 10 тыс. человек населения; стоимость наиболее востребованных медицинских услуг для граждан Беларуси и иностранных граждан) и некоторых показателей системы здравоохранения (число государственных и частных медицинских учреждений; доля расходов на здравоохранение в бюджете административно-территориальных единиц; объем расходов на здравоохранение в расчете на одно государственное учреждение; число больничных коек в расчете на 10 тыс. человек населения), характеризующих потенциал для развития данного вида туризма, за период с 2019 по 2024 г. Отражена международная специализация Беларуси в области медицинского туризма, которая основывается на проведении онкологических, офтальмологических и кардиологических операций, оказании стоматологических услуг, осуществлении экстракорпорального оплодотворения, трансплантации органов и тканей, санаторно-курортном лечении и реабилитации. Выполнен сравнительно-географический анализ специализации Беларуси и стран-соседей в области медицинского туризма по ряду количественных и качественных показателей. Проведена комплексная оценка современного состояния медицинского туризма в Беларуси, в результате чего предложена типология административно-территориальных единиц по уровню его развития. На основе разработанной типологии установлено преобладание районов с низким уровнем развития медицинского туризма, которые характеризуются низкой

Образец цитирования:

Гаркун Да, Титов АН. Региональные различия в уровне развития медицинского туризма в Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;1:3–23.

EDN: RVKTCH

For citation:

Harkun DA, Tsitou AM. Regional differences in the level of development of medical tourism in Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;1:3–23. Russian.

EDN: RVKTCH

Авторы:

Дмитрий Андреевич Гаркун – учитель географии.
Антон Николаевич Титов – кандидат географических наук; доцент кафедры экономической и социальной географии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Dmitry A. Harkun, geography teacher.
kuroginekiriya@gmail.com
Anton M. Tsitou, PhD (geography); associate professor at the department of economic and social geography, faculty of geography and geoinformatics.
antitov@tut.by



обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения, ценами на медицинские услуги выше среднереспубликанского уровня, недостаточной обеспеченностью медицинским персоналом и ограниченным перечнем оказываемых медицинских услуг. В общей структуре типологии районы этого типа занимают 46 %. Главным образом они сконцентрированы в Витебской и Гродненской областях. Выявлено, что наиболее перспективными для развития медицинского туризма являются Минская и Гомельская области, а также г. Минск.

Ключевые слова: медицинский туризм; Беларусь; инфраструктура здравоохранения; уровень развития медицинского туризма; индекс медицинского туризма; комплексная типология.

Благодарность. Авторы выражают признательность рецензентам журнала за ценные рекомендации, которые помогли повысить научный уровень статьи.

REGIONAL DIFFERENCES IN THE LEVEL OF DEVELOPMENT OF MEDICAL TOURISM IN BELARUS

D. A. HARKUN^a, A. M. TSITOU^b

^a*Fanipol Gymnasium named after A. I. Gurin, 34 Kamsamolskaja Street, Fanipol 222750, Belarus*

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

Corresponding author: A. M. Tsitou (antitov@tut.by)

Abstract. Scientific approaches to the concept of medical tourism are systematised and an overview of the existing methods for its study by foreign scientists is provided. The dynamics of key indicators of medical tourism development in Belarus (provision of healthcare institutions providing paid medical services per 100 thsd people; provision of practicing doctors and mid-level health workers per 10 thsd people; cost of the most popular medical services for citizens of Belarus and foreign citizens) and some indicators of the healthcare system (number of public and private medical institutions; share of healthcare expenditure in the budget of administrative-territorial units; volume of healthcare expenditure per one public institution; number of hospital beds per 10 thsd people) characterising the potential for the development of this type of tourism for the period from 2019 to 2024 are analysed at several spatial levels. The article reflects the international specialisation of Belarus in the field of medical tourism, which is based on oncological, ophthalmological and cardiovascular operations, dental services, *in vitro* fertilisation, organ and tissue transplantation, spa treatment and rehabilitation. A comparative geographical analysis of the specialisation of Belarus and neighbouring countries in the field of medical tourism has been performed for a number of quantitative and qualitative indicators. A comprehensive assessment of the current state of medical tourism in Belarus was carried out, as a result of which a typology of administrative-territorial units according to the level of its development was proposed. Based on the presented typology, a predominance of regions with a low level of medical tourism development was established, which are characterised by low provision of healthcare institutions providing paid medical services per 100 thsd people, prices for medical services above the national average, insufficient provision of medical personnel and a limited list of medical services. In the overall structure of the typology, districts of this type account for 46 %. They are mainly concentrated in the Vitebsk and Grodno regions. It was also established that the most promising regions for the development of medical tourism are the Minsk and Gomel regions, as well as the city of Minsk.

Keywords: medical tourism; Belarus; healthcare infrastructure; level of development of medical tourism; medical tourism index; complex typology.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the reviewers of the journal for their valuable recommendations, which helped to improve the scientific level of the article.

Введение

В условиях глобализации и растущего интереса к качественной медицинской помощи многие государства стремятся стать привлекательными центрами медицинского обслуживания для иностранных пациентов. Беларусь, обладая высоким уровнем развития медицины и достаточно широким спектром оказываемых медицинских услуг при сравнительно доступных ценах, имеет все шансы занять значимое место на международной арене в области медицинского туризма. Он может стать важным инструментом для улучшения имиджа страны и привлечения инвестиций в сферу здравоохранения.

В последнее десятилетие медицинский туризм в Беларуси динамично развивается, привлекая внимание как местных, так и иностранных пациентов. Его главной особенностью среди других видов

туризма является уникальная возможность сочетать получение медицинской помощи с путешествиями и отдыхом за пределами своего основного места проживания¹. Для примера: за период с 2011 по 2022 г. количество иностранных граждан, которые получили медицинскую помощь или прошли реабилитацию в Беларуси, увеличилось на 43 %². В условиях возрастания роли практики предоставления медицинских услуг за пределами страны проживания пациента исследование перспектив развития медицинского туризма в Беларуси приобретает особую значимость.

Однако регионы страны имеют разные предпосылки и потенциал для развития медицинского туризма, что выступило основной гипотезой данного исследования. В настоящее время отсутствует комплексная оценка современного состояния медицинского туризма в Беларуси, которая на уровне административных районов учитывала бы доступность и качество медицинских услуг, кадровый потенциал и уровень сервиса медицинских учреждений, развитие их инфраструктуры. Выявление региональных диспропорций в уровне развития медицинского туризма и установление соответствующих факторов позволило бы обратить внимание экспертов и органов государственного управления на возможность оптимизации данного вида туризма в Беларуси и повышения его роли в привлечении денежных средств в местные и региональные бюджеты.

Медицинский туризм во многом связан со сферой здравоохранения, которая занимает ключевую позицию в обеспечении достойного качества жизни в Беларуси. Медицинское обслуживание населения является одним из приоритетных направлений государственной политики, что подтверждается наличием действующих законодательных инициатив, к числу которых относятся государственная программа «Здоровье народа и демографическая безопасность» на 2021–2025 гг.³, государственная программа «Беларусь гостеприимная» на 2021–2025 гг.⁴, Национальная стратегия устойчивого развития до 2035 г.⁵ Тема исследования также находится в плоскости реализации одной из целей устойчивого развития, предложенных Генеральной ассамблей ООН, которая акцентирует внимание на обеспечении здорового образа жизни и содействии благополучию населения⁶.

Еще одним фактором, усиливающим актуальность данного исследования, является воздействие пандемии COVID-19 на рынок медицинских услуг, которое привело к изменениям в географии, структуре и динамике предоставления медицинской помощи. Это обстоятельство создает дополнительную необходимость в более глубоком изучении и совершенствовании теоретико-методических подходов к медицинскому туризму. Кроме того, актуальность выбранной темы усиливает ограниченное количество научных работ по данной проблематике в контексте отечественной социально-экономической географии.

Таким образом, основной целью исследования является проведение комплексной оценки современного состояния медицинского туризма в Беларуси и выявление региональных диспропорций в уровне его развития. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие исследовательские задачи: 1) систематизировать основные научные подходы к определению медицинского туризма и обобщить существующие методы его изучения; 2) проанализировать динамику ключевых показателей развития медицинского туризма в Беларуси на разных пространственных уровнях; 3) охарактеризовать специализацию Беларуси в области медицинского туризма и определить ее роль на международной арене; 4) провести комплексную оценку современного состояния медицинского туризма в Беларуси и предложить типологию административно-территориальных единиц по уровню его развития.

Теоретические основы

Медицинский туризм – это многогранное явление, объединяющее медицинские услуги и туристскую деятельность. В зависимости от контекста и авторского подхода его определения существенно различаются. Так, например, Организация по экономическому сотрудничеству и развитию акцентирует внимание на факте

¹Виды туризма в Беларуси // Президент Республики Беларусь : офиц. интернет-портал Президента Респ. Беларусь. URL: <https://president.gov.by/ru/belarus/tourism/vidy> (дата обращения: 16.01.2025).

²Лечение в Беларуси // Belarus.by : офиц. сайт Респ. Беларусь. URL: <https://www.belarus.by/ru/travel/treatment-in-belarus> (дата обращения: 16.01.2025).

³О государственной программе «Здоровье народа и демографическая безопасность» на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 19 янв. 2021 г., № 28 // Министерство здравоохранения Республики Беларусь : сайт. URL: https://minzdrav.gov.by/upload/dadvfiles/letter/22100028_1611349200.pdf (дата обращения: 16.01.2025).

⁴О государственной программе «Беларусь гостеприимная» на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 29 янв. 2021 г., № 58 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. Минск, 2025. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=c22100058> (дата обращения: 16.01.2025).

⁵Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года // Министерство экономики Республики Беларусь : сайт. URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/obsugdaemnra/nsur-2035-1.pdf> (дата обращения: 16.01.2025).

⁶Цели в области устойчивого развития. Цель 3. Обеспечение здорового образа жизни и содействие благополучию для всех в любом возрасте // Организация Объединенных Наций : сайт. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/health/> (дата обращения: 16.01.2025).

пересечения международных границ в целях получения медицинской услуги (стоматология, косметическая хирургия, плановая хирургия, гинекология) пациентом. По мнению представителей указанной организации, данный вид туризма способствует развитию стран, предоставляющих медицинские услуги, за счет привлечения иностранных пациентов и создания рабочей силы, ориентированной на их обслуживание⁷.

Всемирная туристская организация и Европейская ассоциация курортов рассматривают медицинский туризм через призму оздоровительных поездок. Они отмечают важность санаторно-курортных учреждений в профилактике заболеваний и укреплении здоровья⁸.

Среди ученых, которые внесли вклад в совершенствование теории и методологии медицинского туризма, а также изучение его региональных особенностей, стоит выделить экономикогеографов К. Полларда, Х. Нарштедта и С. Каспера. В своих исследованиях они применяют персоналистский подход, который предполагает учет личных потребностей туриста при оказании услуги, что способствует более широкому охвату потенциальных клиентов. В качестве основных целей медицинского туризма К. Поллард выделяет хирургическое вмешательство и лечение хронических заболеваний [1], а Х. Нарштедт отдает приоритет пребыванию на бальнеологических курортах [2]. С. Каспар наряду с физическим здоровьем вкладывает в понятие медицинского туризма аспект поддержания психического и социального благополучия населения, что делает его подход особенно актуальным в условиях современного взгляда на здоровье индивида как комплексное состояние [3].

Значимый вклад в развитие теории и методологии медицинского туризма также внесли такие авторитетные исследователи и ученые в сфере географии, социологии, медицины и экономики, как М. Букман, К. Букман [4], С. Хейджоф⁹, А. М. Ветитнев, А. С. Кусков¹⁰, В. А. Набедрик, Р. М. Наводничий, А. Н. Разумов, Р. И. Сухов [5–9], М. Н. Поколодная¹¹ (табл. 1).

Таблица 1

Основные подходы к определению медицинского туризма

Table 1

The main approaches to defining medical tourism

Организация или автор	Ключевые аспекты в подходах к определению медицинского туризма
Организация по экономическому сотрудничеству и развитию	Пересечение международных границ для получения различных форм лечения, включая стоматологию, косметическую хирургию, плановую хирургию и лечение бесплодия
Всемирная туристская организация	Форма туризма, направленная на улучшение здоровья посредством посещения санаторно-курортных и медицинских учреждений
К. Поллард (США)	Выезд за пределы страны для планового лечения или хирургического вмешательства в целях получения специализированной медицинской помощи
Х. Нарштедт (Германия)	Посещение медицинских курортов в целях оздоровления, предполагающее временную смену места жительства
С. Каспар (Швейцария)	Совокупность явлений, возникающих в результате перемещения людей в целях улучшения, стабилизации или восстановления здоровья, включая предписанные лечебные процедуры
М. Букман, К. Букман (США)	Поездки для улучшения здоровья, объединяющие два сектора экономической деятельности – медицину и туризм
С. Хейджоф (Великобритания)	Поездки за пределы страны для получения медицинских услуг или проведения медицинских вмешательств
А. М. Ветитнев, А. С. Кусков (Россия)	Часть туристской деятельности, главной целью которой является получение комплекса лечебно-диагностических, реабилитационных, профилактических и рекреационных услуг за пределами постоянного места проживания

⁷The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) : website. URL: <https://www.oecd.org/> (date of access: 16.01.2025).

⁸The World Tourism Organisation (UN Tourism) : website. URL: <https://www.unwto.org/> (date of access: 16.01.2025).

⁹Hajioff S. Health tourism: 100 years of living science [Electronic resource]. London : Imp. College, 2007. URL: <https://slideplayer.com/slide/10209879/> (date of access: 25.12.2024).

¹⁰Ветитнев А. М., Кусков А. С. Лечебный туризм : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений, обучающихся по направлению подготовки 100201 «Туризм» и по специальности 100103 «Социально-культурный сервис и туризм». М. : Форум, 2010. 590 с. (Высшее образование).

¹¹Поколодна М. Н. Рекреаційна географія : навч. посіб. Харків : Харк. нац. акад. міськ. госп-ва, 2012. 275 с.

Окончание табл. 1
Ending of the table 1

Организация или автор	Ключевые аспекты в подходах к определению медицинского туризма
В. А. Набедрик (Россия)	Совокупность отношений и явлений, связанных с путешествиями для обследования, лечения, реабилитации или профилактики заболеваний с использованием необходимых ресурсов
Р. М. Наводничий (Россия)	Предоставление медицинских услуг за пределами страны проживания пациента с совмещением отдыха и высококвалифицированной медицинской помощи (диагностика, оперативное лечение, реабилитация)
А. Н. Разумов (Россия)	Форма курортной деятельности, основанная на организации работы санаторно-курортного комплекса с учетом современных технологий туризма
Р. И. Сухов (Россия)	Деятельность санаторно-курортных организаций, направленная на оздоровление населения
М. Н. Поколодная (Украина)	Перемещение людей в целях получения медицинских услуг, включая профилактику и лечение заболеваний, с использованием оборудования зарубежных медицинских организаций

П р и м е ч а н и е. Составлено по данным работ [1–9], а также вышеупомянутых учебных пособий А. М. Ветитнева, А. С. Кускова, М. Н. Поколодной и электронного материала С. Хейджофа.

Систематизация научных подходов к понятию медицинского туризма позволила сформулировать обобщающее определение данного термина: под медицинским туризмом подразумевается совокупность отношений и явлений, связанных с перемещением людей за пределы постоянного места жительства в целях получения медицинских, оздоровительных и реабилитационных услуг. Эти поездки могут быть обусловлены необходимостью лечения, профилактики заболеваний или улучшения общего состояния здоровья, включая психическое и социальное благополучие.

В настоящее время в научном сообществе существует множество методик изучения уровня развития медицинского туризма. Чаще всего ученые используют методы анализа, которые дифференцируются в зависимости от региона, целей исследования и полноты данных. Они позволяют выявить ключевые факторы, влияющие на привлекательность стран для медицинских туристов, а также оценить последствия развития этой индустрии для системы здравоохранения и экономики в целом.

Одним из наиболее распространенных методов в исследованиях медицинского туризма является сравнительный анализ. Например, группа экспертов из Великобритании под руководством Р. Джонстона используют этот метод для оценки уровня развития медицинского туризма в странах Карибского бассейна. В применяемой ими методике уделяется внимание роли международной аккредитации (организация *Joint Commission International*), которая способствует укреплению доверия пациентов к учреждению, предоставляющему медицинские услуги. Кроме того, в работах ученых [10–13] подчеркивается важность интеграции медицинского туризма с туристской индустрией, что позволяет странам предлагать не только лечение, но и уникальный опыт восстановления.

Британские экономисты Р. Паган и Д. Хорсфолл анализируют тенденции медицинского туризма в Великобритании с 2000 по 2016 г., используя данные исследования «Международный опрос пассажиров» (*International passenger survey*). Они применяют статистические методы для оценки потоков медицинских туристов, продолжительности их пребывания в стране и величины расходов. Также Р. Паган и Д. Хорсфолл изучают влияние глобального экономического кризиса 2007 г. и миграционных процессов на медицинский туризм, уделяя особое внимание роли диаспор и экспатриантов в формировании потоков пациентов. В итоге ученые приходят к выводу, что многие британские подданные, имеющие культурные или семейные связи с другими государствами, предпочитают возвращаться на родину для получения медицинских услуг, тем самым оказывая влияние на общую динамику медицинского туризма [14].

Американский экономист и политолог А. Пейсер активно исследует медицинский туризм в странах Латинской Америки. В своих работах автор использует различные методы изучения текущего состояния, факторов влияния и перспектив развития этого вида туризма. Ученый анализирует динамику цен на медицинские услуги и изменение численности медицинских туристов и на основе этого делает выводы о тенденциях среди стран региона. Кроме того, А. Пейсер выявляет причины, способствующие развитию медицинского туризма, такие как снижение затрат на лечение, минимизация недостатков страховых систем, а также оценивает значение юридических и geopolитических аспектов, влияющих на медицинский туризм [15].

Американские социологи Д. Белан и Э. Заржечная анализируют влияние показателей национальных систем здравоохранения (модель и объем финансирования, структура предоставления услуг, особенности системы управления) на медицинский туризм и его последствия для развития экономики различных стран мира. Используя сравнительный анализ кейсов Канады и США, они показывают, как различия в системах здравоохранения формируют специфику медицинского туризма. Например, в Канаде, где существует система всеобщего медицинского страхования, основным фактором, стимулирующим пациентов к получению необходимой услуги за границей, становятся длительные очереди на лечение. В США из-за высокой стоимости медицинских услуг и отсутствия всеобщего страхования многие пациенты используют медицинский туризм как один из способов снижения расходов [16].

Эксперт в области медицинского туризма американский экономист К. Хейст применяет количественный подход, включающий анализ статистических данных и сравнение стоимости медицинских услуг в США и других странах мира. Ученый подчеркивает роль глобализации и доступности информации в развитии медицинского туризма. Также автор рассматривает влияние медицинского туризма на экономику и систему здравоохранения США, предлагая рекомендации по повышению конкурентоспособности американских медицинских учреждений [17].

Представители польской научной школы экономики В. Вовк, Л. Безтелесная и О. Пляшко в ходе исследования медицинского туризма используют статистический анализ, регрессионный анализ и структурное моделирование уравнений (*structural equation modelling*, SEM) для оценки данных и выявления статистически значимых зависимостей. При изучении взаимосвязи между медицинским туризмом, экономическим развитием стран и состоянием национальных систем здравоохранения они применяют методы группировки, корреляционного и регрессионного анализа. Кроме того, указанные авторы используют индекс медицинского туризма (*medical tourism index*) и данные о международном туризме, чтобы оценить место Польши на международной арене и выявить ключевые факторы, влияющие на развитие медицинского туризма [18].

Группа российских экономистов под руководством А. Н. Дайхеса также применяют сравнительный анализ для разработки стратегических направлений развития медицинского туризма в России. В качестве основных факторов, влияющих на уровень развития медицинского туризма в стране, они указывают географическое положение, доступность медицинских услуг и объем государственной поддержки. Сдерживающими факторами, по мнению ученых, выступают недостаточное количество медицинского персонала, владеющего иностранными языками, и низкий уровень развития туристской инфраструктуры. В ходе опроса руководителей медицинских организаций в России авторы активно использовали метод экспертизы оценки с интерпретацией полученных результатов по пятибалльной шкале. Для общей оценки степени согласованности мнений всех опрошенных экспертов по совокупности отобранных критериев они применяли коэффициент конкордации Кендалла (шкалу от 0 до 1), а для оценки значимости различий в ответах (проверки однородности статистических данных) – непараметрический критерий Фридмана [19].

При изучении уровня развития медицинского туризма в Иране представители экономических и социальных наук под руководством М. Багхери используют методы качественного анализа, социологический опрос, интервьюирование, а также метод экспертизы оценки. Применение данных методов позволило им сформулировать 4 ключевых направления и 18 стратегий развития медицинского туризма в Иране. Для определения приоритетности выявленных стратегий в рамках этой методики используется метод принятия решений по нескольким критериям (*best worst method*), базирующийся на оценке маркетинговой политики, качественных и количественных характеристик трудовых ресурсов, а также уровня развития инфраструктуры [20]. Во многом схожую методику применяют Р. Аншаси, А. Альсюф и Ф. Альхазми для оценки уровня развития медицинского туризма в Иордании. Преимущественно их исследования основываются на анализе статистических отчетов Министерства здравоохранения Иордании и Министерства туризма и древностей Иордании [21].

В работах иранских социологов и экономистов Х. Голипура и К. Эсфандиара представлены результаты апробаций обобщенного метода моментов (*generalised method of moments*) и объединенного среднего группового авторегрессионного распределения (*pooled mean group-autoregressive distributed lag*) при анализе панельных данных (многомерные данные, получаемые путем серии измерений или наблюдений за несколько периодов времени для одних и тех же объектов исследования). Эти методы позволяют оценить долгосрочное влияние доходов от медицинского туризма на развитие сферы здравоохранения в 49 странах с развивающейся и развитой экономикой и провести их сравнение. Также ученые анализируют устойчивость результатов, исключая годы кризисов и используя альтернативные показатели для оценки производительности сферы здравоохранения [22].

Сербские социологи И. Булатович и К. Янкова в своих исследованиях применяют метод качественного анализа, включающий интервью с ведущими экспертами в области медицинского туризма, объеди-

ненными в мини-фокус-группу. Полученные данные ученые анализируют с помощью программного обеспечения *NVivo* (версия 12), что позволяет выявить ключевые сдерживающие факторы для развития медицинского туризма в ОАЭ, в число которых входят высокие затраты, отсутствие международного медицинского страхования, недостаток сотрудничества между поставщиками медицинских и туристических услуг. Для решения указанных проблем авторы предлагают ряд рекомендаций, включая улучшение маркетинга и развитие инфраструктуры [23].

В работах турецкого экономиста Н. Пирзады отражены результаты оценки уровня развития медицинского туризма в Турции на основе анализа экономических показателей. Исследователь рассматривает как преимущества медицинского туризма (экономический рост, улучшение качества медицинских услуг), так и его недостатки (неравный доступ к медицинским услугам для местного населения и др.), предлагает рекомендации по дальнейшему развитию данного сектора (например, повышение уровня компетентности медицинского персонала и контроль за стоимостью услуг) [24]. Еще один турецкий экономист Э. Килавуз анализирует конкурентоспособность Турции на международной арене в сфере медицинского туризма с помощью системы математических методов и специальных индексов [25].

Китайские социологи и экономисты З. Фэнминь, В. Байцзюнь, Б. Цзяньтао и Л. Ли в своих работах затрагивают вопросы, связанные с привлечением в Китай иностранных туристов и вероятностью повторного оказания им медицинских услуг. В качестве основного метода исследования ученые используют структурное моделирование уравнений с помощью программы *SmartPLS*. Этот метод позволяет авторам проанализировать влияние таких факторов, как питание в медицинских учреждениях, качество медицинских услуг и уровень доверия к врачам, на общее впечатление пациентов и их отзывы [26]. Представители китайской школы социологии Ю. Лю, Ц. Линь и Д. Чжан в своих исследованиях активно сочетают качественные и количественные методы оценки уровня развития медицинского туризма. В ходе изучения предпочтений китайских потребителей медицинских услуг эти ученые проводят онлайн-опросы и используют бинарную логистическую регрессию для анализа данных. Дополнительно они осуществляют частотный анализ текстовых предложений, чтобы выделить ключевые аспекты, которые потребители считают важными для развития медицинского туризма [27].

Индийский исследователь в области медицины Р. Шридхар в своих работах использует SWOT-анализ и матрицу количественного стратегического планирования (*quantitative strategic planning matrix, QSPM*) в целях определения потенциала стран для развития медицинского туризма. С помощью данных методов ученый выявляет сильные и слабые стороны Индии на международной арене в сфере медицинского туризма, а также предлагает стратегии его развития [28].

Представители азиатской науки Н. Покок и К. Фуа применяют концептуальную схему для анализа влияния медицинского туризма на систему здравоохранения, используя сравнительный метод для трех стран – Таиланда, Сингапура и Малайзии. Их исследование базируется на официальных данных Всемирной организации здравоохранения и национальных статистических институтов. Ученые применяют индуктивный подход для построения теории, что позволяет выявить ключевые взаимосвязи между медицинским туризмом и функциями системы здравоохранения, включая управление, финансирование, регулирование [29].

Таким образом, выполненный обзор методов и методик изучения медицинского туризма доказывает междисциплинарность объекта исследования данной работы. Кроме того, он свидетельствует о широком использовании как общенаучных, так и специальных методов для оценки уровня развития медицинского туризма и его роли на международной арене в разрезе стран и регионов мира, а также в плоскости нескольких научных дисциплин, включая социально-экономическую географию, медицину, экономику, социологию.

Материалы и методы исследования

Для проведения комплексной оценки современного состояния медицинского туризма в Беларуси и выявления региональных диспропорций в уровне его развития были выбраны ключевые статистические показатели. Их отбор базировался на сопоставлении и аналогии с показателями, которые используются для расчета индекса медицинского туризма¹², на систематизации подобных методик зарубежных исследователей, описанных в предыдущем разделе [30], а также на учете имеющихся в открытом доступе данных и особенностей национальной статистической системы¹³. В итоге для достижения поставленных исследовательских задач в работе были использованы следующие показатели: 1) число государственных медицинских учреждений; 2) число частных медицинских учреждений; 3) доля расходов на здравоохранение в бюджете административно-территориальных единиц; 4) объем расходов на

¹²MedicalTourism.com : website. URL: <https://www.medicaltourism.com/> (date of access: 16.01.2025).

¹³Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. URL: <https://pravo.by> (дата обращения: 16.01.2025) ; Регионы Республики Беларусь : стат. сб. : в 2 т. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь ; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. Минск : [б. и.], 2024. 2 т.

здравоохранение в расчете на одно государственное учреждение; 5) число больничных коек в расчете на 10 тыс. человек населения; 6) количество иностранных граждан, получивших медицинские услуги в Беларуси; 7) обеспеченность учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения; 8) обеспеченность практикующими врачами в расчете на 10 тыс. человек населения; 9) обеспеченность средними медицинскими работниками в расчете на 10 тыс. человек населения; 10) стоимость наиболее востребованной медицинской услуги для граждан Беларуси; 11) стоимость наиболее востребованной медицинской услуги для иностранных граждан. Показатели 1–5 являются показателями системы здравоохранения, отражающими потенциал для развития медицинского туризма, а показатели 6–11 выступают в роли ключевых показателей, характеризующих непосредственно медицинский туризм.

Число государственных медицинских учреждений служит базовым показателем, так как представляет собой основной компонент медицинской инфраструктуры, где непосредственно оказываются медицинские услуги. Число частных медицинских учреждений в рамках настоящего исследования рассматривается в качестве индикативного показателя, коррелирующего с интенсивностью развития и уровнем конкурентоспособности данного сектора экономики. Доля расходов на здравоохранение в бюджете административно-территориальных единиц и объем расходов на здравоохранение в расчете на одно государственное учреждение являются индикаторами экономической устойчивости системы здравоохранения и степени ее готовности обеспечить предоставление медицинских услуг необходимого качества. Также эти показатели позволяют оценить, насколько имеющиеся средства и ресурсы способствуют модернизации инфраструктуры и повышению уровня медицинского обслуживания. Число больничных коек в расчете на 10 тыс. человек населения используется для оценки материально-технического обеспечения учреждений здравоохранения.

Количество иностранных граждан, получивших медицинские услуги в Беларуси, служит индикатором привлекательности и конкурентоспособности страны на международном рынке медицинских услуг. Обеспеченность учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения является одним из главных показателей уровня развития медицинской сферы в республике, поскольку отражает их потенциальную загруженность пациентами, в том числе иностранными, выступающими в роли туристов. Показатели обеспеченности практикующими врачами и средними медицинскими работниками в расчете на 10 тыс. человек населения позволяют оценить кадровый потенциал учреждений здравоохранения. К числу важнейших показателей принадлежит стоимость медицинских услуг, которая может являться как сдерживающим, так и стимулирующим фактором для развития медицинского туризма. Прежде всего в данной работе используется стоимость наиболее распространенной и востребованной в Беларуси медицинской услуги – лечения кариеса, при этом осуществляется дифференциация тарифов на данный вид услуги, установленных для граждан Беларуси и для иностранных граждан.

При проведении сравнительного анализа уровня развития медицинского туризма в Беларуси и странах-соседях дополнительно используется средняя стоимость пяти наиболее востребованных медицинских услуг в ведущих учреждениях столицы, что позволяет более объективно охарактеризовать ценовую политику и уровень конкурентоспособности республики по сравнению с другими государствами, а также способствует корректировке маркетинговых стратегий для укрепления позиций Беларуси на глобальном рынке медицинского туризма.

Перечисленные показатели представлены в работе на трех пространственных уровнях – макроуровне (страна), мезоуровне (регионы) и микроуровне (административные районы). Показатели на уровне страны и регионов представлены за два ключевых года, а именно 2019 и 2024 гг. Показатели на уровне административных районов по причине неполноты статистических данных взяты только за 2024 г., однако этого оказалось достаточно, чтобы выполнить оценку современного состояния медицинского туризма в республике. Средняя стоимость пяти наиболее востребованных медицинских услуг в ведущих учреждениях столицы при проведении сравнительной характеристики специализации Беларуси и стран-соседей в области медицинского туризма также была использована за 2024 г.

В качестве основных источников информации в ходе проведения исследования выступили Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь (<https://pravo.by>), статистические сборники и ежегодники Национального статистического комитета Республики Беларусь¹⁴, официальные сайты и отчеты организаций здравоохранения и медицинских лабораторий «Инвитро» (<https://www.invitro.by>), «Синэво» (<https://www.synovo.by>), справочно-информационные порталы и онлайн-сервисы *103.by* (<https://www.103.by>), *Talon.by* (<https://www.talon.by>), *Bookimed* (<https://ru.bookimed.com/>).

Результатом комплексной оценки современного состояния медицинского туризма в Беларуси стала типология административно-территориальных единиц по уровню его развития. При распределении

¹⁴Регионы Республики Беларусь... 2 т.

районов по типам использовались следующие основные критерии: 1) обеспеченность учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения; 2) обеспеченность практикующими врачами и средними медицинскими работниками в расчете на 10 тыс. человек населения; 3) стоимость медицинских услуг по отношению к среднереспубликанскому уровню; 4) перечень оказываемых медицинских услуг.

В основу выделения подтипов легли различия в сочетаниях перечисленных показателей. Обеспеченность учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения считалась высокой при значениях более 10, средней при значениях от 5 до 10 и низкой при значениях менее 5. Обеспеченность практикующими врачами и средними медицинскими работниками в расчете на 10 тыс. человек населения принималась высокой, если она была больше 28 и 100 соответственно, средней, если находилась в диапазонах от 24 до 28 и от 90 до 100 соответственно, и низкой, если составляла менее 24 и 90 соответственно. Стоимость медицинских услуг считалась высокой, когда она превышала 110 % от среднереспубликанского уровня, средней, когда находилась в диапазоне от 90 до 110 %, и низкой, когда составляла менее 90 %. Для проведения данной типологии были изучены прейскуранты учреждений здравоохранения на оказание платных медицинских услуг, что позволило выделить 27 основных групп услуг. Из них 16 групп услуг предоставляются в 75 % административных районов страны, следовательно, все эти услуги являются базовыми. Исходя из вышеизложенного, перечень оказываемых медицинских услуг считался широким, если в прейскуранте было представлено свыше 16 наименований, и ограниченным, если в нем присутствовало менее 16 наименований.

В результате было выделено три основных типа районов по уровню развития медицинского туризма. Каждый из них подразделяется на два подтипа в зависимости от комбинаций качественной оценки четырех вышеупомянутых показателей.

Основными методами исследования в рамках настоящей работы являлись сравнительно-географический, статистический и картографический методы, а также методы типизации, обобщения и анализа.

Необходимым техническим инструментарием выступили специализированные пакеты компьютерных программ – *ArcGIS*, *Adobe Illustrator* и *Microsoft Office*. Программа *ArcGIS* использовалась для пространственного анализа и визуализации статистических данных. Векторный графический редактор *Adobe Illustrator* применялся для создания и оформления картографического материала. Среда *Microsoft Office* (*Word*, *Excel*) использовалась для сбора, систематизации и обработки текстовой и статистической информации, проведения необходимых расчетов и создания графического материала.

Таким образом, разработанная методика вносит вклад в совершенствование общей методологии экономико-географического анализа медицинского туризма и обобщает международный опыт изучения данного вида услуг. Она позволяет структурированно и последовательно раскрыть содержание сформулированных задач и достичь основной цели исследования.

Результаты и их обсуждение

На международном рынке медицинских услуг Беларусь специализируется на проведении онкологических, офтальмологических и кардиологических операций, оказании стоматологических услуг, осуществлении экстракорпорального оплодотворения (ЭКО), трансплантации органов и тканей, санаторно-курортном лечении и реабилитации. Что касается стран – соседей Беларуси, то в структуре услуг медицинского туризма Литвы¹⁵ и Латвии¹⁶ преобладают пластическая хирургия, стоматология и диагностика. Польша¹⁷ также оказывает данные услуги, однако дополнительно развивает ортопедию и репродуктивную медицину. Россия¹⁸ фокусируется на высокотехнологичных хирургических вмешательствах разной направленности, а Украина¹⁹ отдает приоритет развитию стоматологии, косметической хирургии и лечению онкологии²⁰ (табл. 2).

¹⁵ Medicininis turizmas Lietuvoje – seminarai ir konferencijos // Lietuvos Respublikos ekonomikos ir inovacijų ministerija : website. URL: <https://eimin.lrv.lt/lt/veiklos-sritys/turizmas/turizmo-renginiai/medicininis-turizmas-lietuvoje-seminarai-ir-konferencijos/> (date of access: 16.01.2025).

¹⁶ Medical tourism // Health Inspectorate, Republic of Latvia : website. URL: <https://www.vi.gov.lv/en/medical-tourism> (date of access: 16.01.2025).

¹⁷ Turystyka medyczna w Polsce // Kliniki.pl : website. URL: <https://www.kliniki.pl/wiedza/turystyka-medyczna-w-polsce/> (date of access: 16.01.2025).

¹⁸ Лечение в России : сайт. URL: <https://russiamedtravel.ru/> (дата обращения: 16.01.2025).

¹⁹ Медичний туризм в Україні: особливості та переваги // Alpha Cell: центр регенеративної медицини : сайт. URL: <https://alphacellclinic.com/blog/medychnyj-turyzm-v-ukrayini/> (дата звернення: 16.01.2025).

²⁰ Лечение в Беларуси // Belarus.by : офиц. сайт Респ. Беларусь. URL: <https://www.belarus.by/ru/travel/treatment-in-belarus> (дата обращения: 16.01.2025).

Сравнительная характеристика специализации Беларуси и стран-соседей в области медицинского туризма

Таблица 2

Table 2

Comparative characteristics of the specialisation of Belarus and neighbouring countries in the field of medical tourism

Страна	Индекс медицинского туризма / место в мировом рейтинге	Международная специализация страны в области медицинского туризма	Средняя стоимость наиболее востребованных медицинских услуг в ведущих учреждениях столицы в 2024 г., долл. США			
			Протезирование зубов	Эндопротезирование газобедренного сустава	Лечение катаракты	ЭКО
Беларусь	—	Онкологические, офтальмологические и кардиологические операции, стоматологические услуги, ЭКО, трансплантация органов и тканей, санаторно-курортное лечение и реабилитация	170	5700	520	690
Латвия	—	Косметическая, пластическая и реконструктивная хирургия, стоматология (включая эстетическую стоматологию и имплантацию), репродуктивная медицина, диагностика и комплексное оздоровление (wellness, SPA)	250	5600	1200	1800
Литва	—	Передовая диагностика (компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, ультразвуковое исследование), стоматологические услуги, косметическая и пластическая хирургия, реабилитация и оздоровление	570	9200	1100	3300
Польша	64,10/29	Стоматологические услуги, пластическая хирургия, ортопедия и восстановительная медицина, репродуктивная медицина и лечение бесплодия	250	6900	1200	2900
Россия	60,17/41	Высокотехнологичные хирургические вмешательства (онкология, кардиология, ортопедия), реабилитационные услуги и специализированная диагностика, стоматология и эстетическая (пластическая) хирургия	450	2800	1900	1000
Украина	—	Стоматология и косметическая хирургия, репродуктивная медицина, ортопедические и реабилитационные услуги, лечение онкологических заболеваний	270	1100	500	2200
					2400	

Причина. Значение индекса медицинского туризма и место в мировом рейтинге приводятся по данным сайта Medicaltourism.com, международная специализация стран в области медицинского туризма – по данным сайтов Belarusi.by, Kliniki.pl, Russia-medtravel.ru, Alphacellclinic.com и официальных сайтов Министерства здравоохранения Латвийской Республики, средняя стоимость наиболее востребованных медицинских услуг в ведущих учреждениях столицы – по данным сайта Bookimed.

Средняя стоимость медицинских услуг в Беларуси является одной из самых низких среди перечисленных государств²¹ (см. табл. 2), что делает республику привлекательным центром медицинского туризма, особенно для пациентов из стран с более дорогой медициной. Однако, несмотря на сравнительно низкие цены, высокое качество предоставляемых медицинских услуг и широкий их спектр, Беларусь отсутствует в мировом рейтинге по индексу медицинского туризма в отличие от Польши (29-е место) и России (41-е место)²², что свидетельствует о недостаточном продвижении республики на международной арене. На данный момент страны-соседи выигрывают за счет использования высокотехнологичных медицинских решений, точности диагностики и уровня пластической хирургии (см. табл. 2).

За период с 2010 по 2024 г. в Беларуси наблюдается устойчивый рост числа иностранных граждан, прибывших в нашу страну для получения медицинской помощи и прохождения реабилитации. Если в 2010 г. их количество составляло около 100 тыс. человек, то к 2024 г. оно достигло 160 тыс. человек (рис. 1). При этом начиная с 2020 г. данный показатель удерживается на стабильно высоком уровне, что связано в том числе с активной вакцинацией от COVID-19 еще в период пандемии. На лечение в Беларусь приезжают медицинские туристы из более чем 140 стран мира: России, Украины, Казахстана, Азербайджана, Молдовы, Грузии, Сирии, Латвии, Литвы, Австрии, Германии, Бельгии, Израиля, Италии, Кипра, Сербии, Китая, США и др.

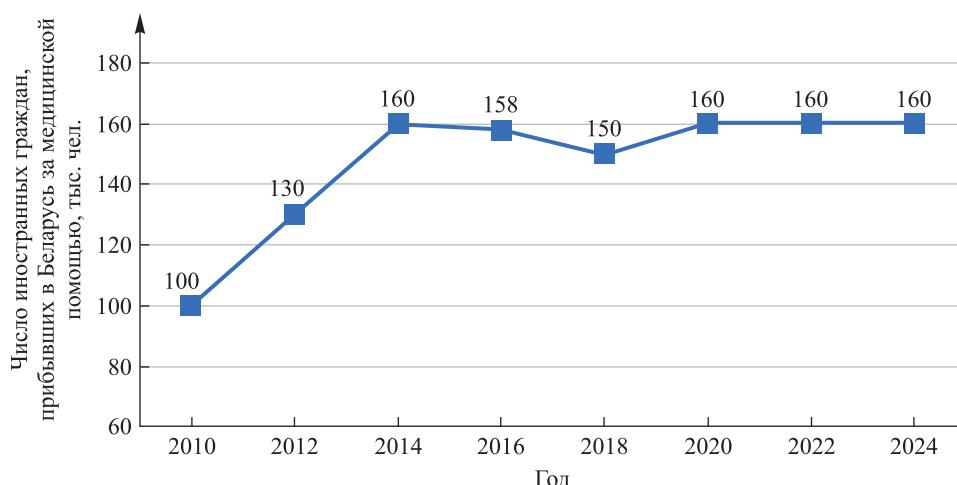


Рис. 1. Динамика численности иностранных граждан, прибывших в Беларусь за медицинской помощью в 2010–2024 гг. (составлено по данным сайта *Belarus.by*)

Fig. 1. Dynamics of the number of foreign citizens who arrived in Belarus for medical care in 2010–2024 (compiled according to the data from the website *Belarus.by*)

В ходе рассмотрения динамики региональной структуры расходов республиканского бюджета на сферу здравоохранения за период с 2019 по 2024 г. (рис. 2) были выявлены следующие особенности. Удельный вес Брестской области сократился с 19 до 13 %, в то время как доли Гомельской и Минской областей достигли 15 %, что может объясняться более приоритетным развитием последних двух регионов. Кроме того, данное обстоятельство может быть обусловлено уменьшением количества учреждений здравоохранения в Брестской области в связи с оптимизацией кадрового потенциала и материально-технической базы медицинских учреждений. Доли Витебской, Гродненской, Могилёвской областей и г. Минска остались практически неизменными, что указывает на завершение к 2019 г. оптимизации системы здравоохранения в этих регионах и выделение достаточного финансирования на ее функционирование. Региональная структура расходов республиканского бюджета на сферу здравоохранения во многом определяется государственными квотами и является практически идентичной структуре распределения населения по регионам страны. Данный факт свидетельствует о том, что все граждане Беларуси имеют равный доступ к медицинской помощи (см. рис. 2).

²¹Bookimed : сайт. URL: <https://ru.bookimed.com/> (дата обращения: 16.01.2025).

²²Medicaltourism.com : website. URL: <https://www.medicaltourism.com/> (дата обращения: 16.01.2025).



Рис. 2. Региональная структура расходов республиканского бюджета на сферу здравоохранения в Беларусь в 2019 г. (а) и 2024 г. (б), %
 (составлено по данным Национального правового интернет-портала Республики Беларусь)

Fig. 2. Regional structure of expenditures of the republican budget on healthcare in the Republic of Belarus in 2019 (a) and 2024 (b), %
 (compiled according to the data of the National legal internet portal of the Republic of Belarus)

За период с 2019 по 2024 г. доля расходов на здравоохранение в бюджете административно-территориальных единиц в целом по стране увеличилась с 20,6 до 24,3 %. Наибольшие значения были зафиксированы в Брестской области (25,3 % в 2019 г. и 26,1 % в 2024 г.) и Гродненской области (20,8 % в 2019 г. и 25,9 % в 2024 г.). Объем расходов на здравоохранение в расчете на одно государственное учреждение в целом по стране также увеличился (с 4,42 млн белорусских рублей в 2019 г. до 7,41 млн белорусских рублей в 2024 г.). Наибольший рост значений данного показателя зарегистрирован в Минской области (с 5,06 млн белорусских рублей в 2019 г. до 11,65 млн белорусских рублей в 2024 г.), где расположены узкопрофильные медицинские учреждения республиканского значения, требующие дополнительного финансирования. Минимальные значения данного показателя отмечаются в районах с областными центрами, а также в районах с более высоким демографическим потенциалом (Борисовский, Бобруйский, Солигорский, Лидский, Полоцкий районы), что объясняется наличием большего числа медицинских учреждений. Противоположная ситуация наблюдается в ряде районов Минской области (Клецкий, Несвижский, Столбцовский районы).

С 2019 по 2024 г. в Беларусь отмечается увеличение числа государственных медицинских учреждений (с 1029 до 1228 ед.), что свидетельствует о развитии инфраструктуры здравоохранения. Наибольший рост характерен для Гомельской области (с 90 до 141 ед.) и Могилёвской области (с 62 до 108 ед.). Число частных медицинских учреждений в стране также увеличилось, но менее значительно (с 458 до 500 ед.). Наибольшие темпы роста отмечены в г. Минске (с 178 до 187 ед.), что прежде всего связано с увеличением спроса на медицинские услуги, реализацией государственных программ по улучшению качества медицинского обслуживания. Государственные учреждения здравоохранения представлены во всех районах Беларусь. В большинстве районов размещается не более двух государственных учреждений, предоставляющих медицинские услуги населению, чаще всего это центральные районные больницы и амбулаторно-поликлинические организации. Более двух государственных учреждений здравоохранения представлено в районах, где также имеются частные медицинские инициативы, но при этом данные районы не обладают высоким демографическим потенциалом. Более 10 государственных учреждений здравоохранения расположено в районах с большой численностью населения и более высоким уровнем социально-экономического развития. Максимальное количество государственных учреждений здравоохранения (около 45 % от всех учреждений, предоставляющих медицинские услуги на платной основе) находится в столице. Частные медицинские учреждения также размещаются преимущественно в развитых в социально-экономическом плане районах. Главным образом они специализируются на оказании стоматологических и диагностических услуг населению и концентрируются в районах Минской, Брестской и Гродненской областей, а также г. Минске. При этом в ряде районов западных регионов (Слонимский, Новогрудский, Кобринский, Столинский районы) доля частных медицинских организаций превы-

шает долю государственных учреждений здравоохранения. Анализ обеспеченности учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения показал, что в большинстве районов Витебской, Гомельской и Могилёвской областей значения этого показателя выше, чем в остальных регионах. Данный факт свидетельствует о том, что развитие системы здравоохранения и медицинского туризма в них является одним из приоритетных направлений устойчивого социально-экономического развития. Для ряда районов Минской, Брестской и Гродненской областей (Несвижский, Каменецкий, Щучинский районы), наоборот, характерны наиболее низкие значения этого показателя. В целом по республике обеспеченность учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения выросла с 15,77 до 18,87 ед. (табл. 3, рис. 3).

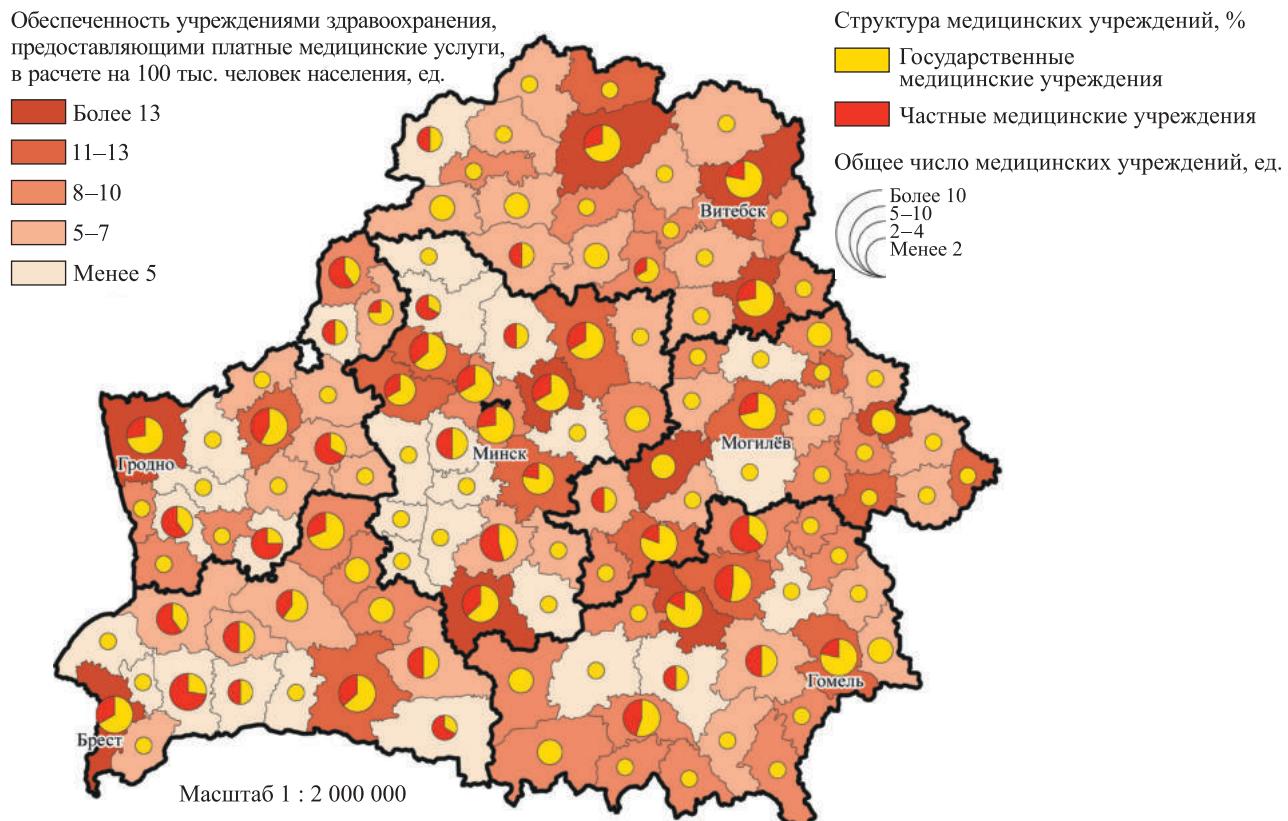


Рис. 3. Обеспеченность учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения, а также общее число и структура медицинских учреждений в разрезе административных районов Беларусь в 2024 г.

(составлено по данным Национального правового интернет-портала Республики Беларусь, официальных сайтов медицинских лабораторий «Инвитро» и «Синэво», справочно-информационного портала 103.by, онлайн-сервиса Talon.by и статистического сборника «Регионы Республики Беларусь» (2024))

Fig. 3. Provision of healthcare institutions providing paid medical services per 100 thousand people, as well as the total number and structure of healthcare institutions by administrative districts of Belarus in 2024 (compiled according to the data of the National legal internet portal of the Republic of Belarus, official websites of the medical laboratories «Invitro» and «Synevo», reference and information portal 103.by, online service Talon.by and the statistical collection «Regions of the Republic of Belarus» (2024))

Обеспеченность больничными койками в Беларусь регулируется государственными нормативами и стандартами. За период с 2019 по 2024 г. число больничных коек в расчете на 10 тыс. человек населения в целом по стране сократилось с 82,4 до 77,3 шт. Наименьших значений этот показатель достиг в г. Минске, снизившись с 73,3 до 68,5 шт., что связано с общей депопуляцией населения. Самые низкие показатели обеспеченности коекным фондом наблюдаются в районах Брестской области, поскольку за последние пять лет там отмечались сокращение объемов финансирования и переход со стационарного на амбулаторное обслуживание. Большинство районов Могилёвской и Гомельской областей довольно хорошо оснащены больничными койками, что, с одной стороны, может быть обусловлено успешным

развитием системы здравоохранения, а с другой – стремительным сокращением численности населения (главным образом в Могилёвской области) ввиду неблагоприятной демографической и социально-экономической ситуации [31]. Наибольшая обеспеченность больничными койками была зафиксирована в районах Гродненской области (Островецкий, Вороновский районы). Вокруг столицы сформировалась область с довольно низкими значениями данного показателя (Логойский, Смолевичский, Червенский, Пуховичский районы), поскольку жители районов, соседствующих с Минским районом, предпочитают получать медицинскую помощь в г. Минске, а не по месту регистрации, что в целом негативно сказывается на уровне развития их системы здравоохранения. Обеспеченность практикующими врачами в расчете на 10 тыс. человек населения за исследуемый период в целом по стране увеличилась незначительно (с 51,9 до 53,2). Наибольшие значения этого показателя отмечены в г. Минске (55,7 в 2024 г.). Аналогичная ситуация наблюдается и для показателя обеспеченности средними медицинскими работниками в расчете на 10 тыс. человек населения, который за период с 2019 по 2024 г. увеличился с 134,1 до 136,5. Максимальные его значения зафиксированы в Гомельской области (143,4 в 2024 г.). В связи с тем что на обслуживание большого числа больничных коек необходимо пропорционально большее количество медицинского персонала, все три показателя, характеризующие кадровый потенциал медицинских учреждений и уровень их оснащения больничными койками, имеют схожие тенденции. При этом чем выше доля расходов на систему здравоохранения в бюджете района, тем выше его показатели обеспеченности практикующими врачами и средними медицинскими работниками. Соответственно, чем более центральное место по уровню социально-экономического развития занимает район, тем большими значениями показателей обеспеченности медицинским персоналом и больничными койками он обладает (см. табл. 3, рис. 4).

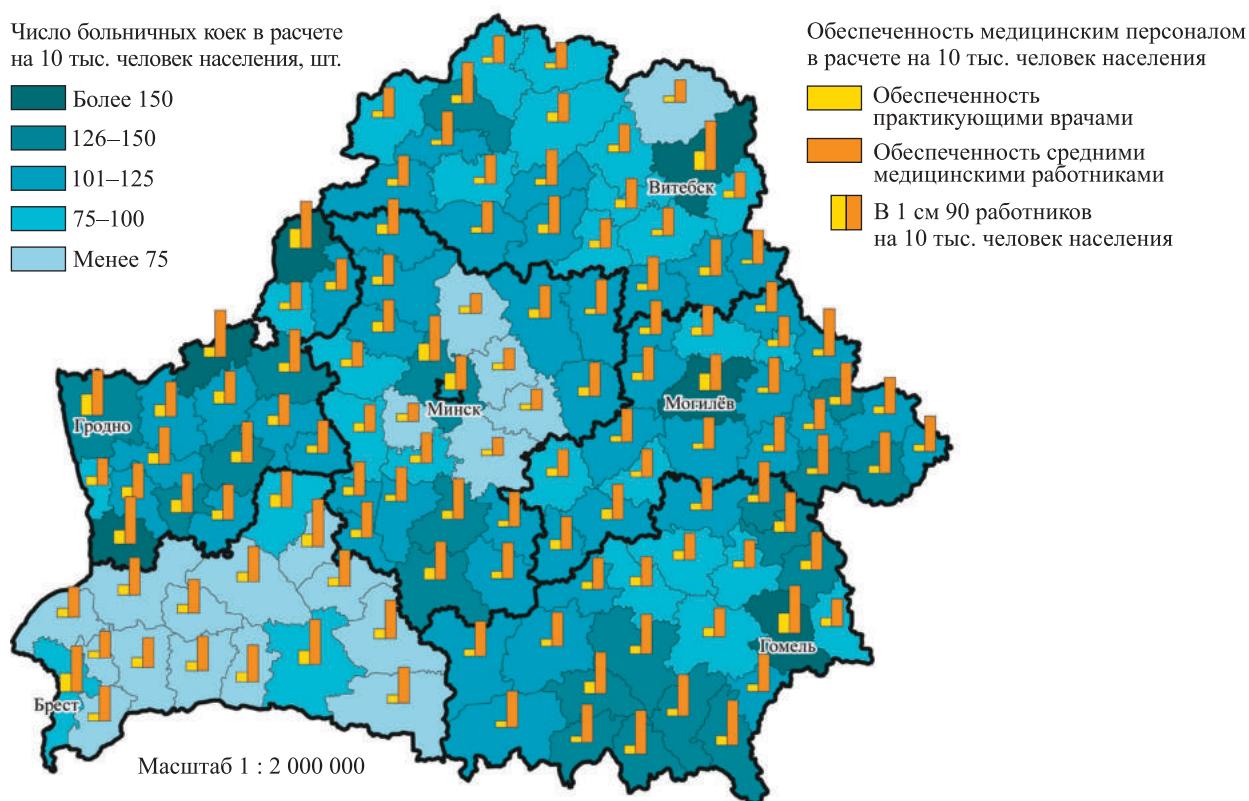


Рис. 4. Обеспеченность медицинским персоналом и больничными койками в расчете на 10 тыс. человек населения в разрезе административных районов Беларусь в 2024 г.
 (составлено по данным Национального правового интернет-портала Республики Беларусь и статистического сборника «Регионы Республики Беларусь» (2024))

Fig. 4. Provision of medical personnel and hospital beds per 10 thsd people by administrative districts of Belarus in 2024
 (compiled according to the data of the National legal internet portal of the Republic of Belarus and the statistical collection «Regions of the Republic of Belarus» (2024))

Стоимость медицинских услуг значительно влияет на развитие медицинского туризма. В нашей стране используются два прейскуранта цен на платные медицинские услуги: один – для граждан Беларуси, другой – для иностранных граждан. Цены в этих прейскурантах существенно различаются. В отдельных районах республики (Миорский, Зельвенский, Березовский районы) цены для иностранных граждан в 10 раз выше. Стоимость наиболее востребованной медицинской услуги (лечение кариеса) для граждан Беларуси за период с 2019 по 2024 г. в среднем по стране выросла с 65 до 85 белорусских рублей. Наиболее высокие значения показателя были отмечены в Минской области (115 белорусских рублей в 2024 г.). Стоимость лечения кариеса для иностранных граждан также пропорционально увеличилась (с 80 до 105 белорусских рублей). Самым дорогим лечение кариеса для иностранных граждан было в Гомельской области (130 белорусских рублей в 2024 г.). Пространственная дифференциация стоимости наиболее востребованной медицинской услуги во многом зависит от уровня доходов местного населения. В районах, где доходы населения ниже среднереспубликанского уровня, установлены меньшие цены на оказание платных медицинских услуг с целью сделать их более доступными для пациентов и обеспечить конкуренцию между государственными и частными учреждениями. Однако пример Поставского района может свидетельствовать об обратном: если в районе имеется центральная районная больница, которая не оказывает стоматологические услуги на платной основе, то эту нишу занимают частные организации, предоставляющие подобные услуги населению, но по более высоким ценам. Кроме того, в ходе исследования было отмечено, что в районах с большим числом учреждений здравоохранения стоимость медицинских услуг ниже, чем в районах с меньшим числом учреждений здравоохранения, ввиду высокого уровня конкуренции и проявления рыночных механизмов регулирования цен (см. табл. 3, рис. 5).

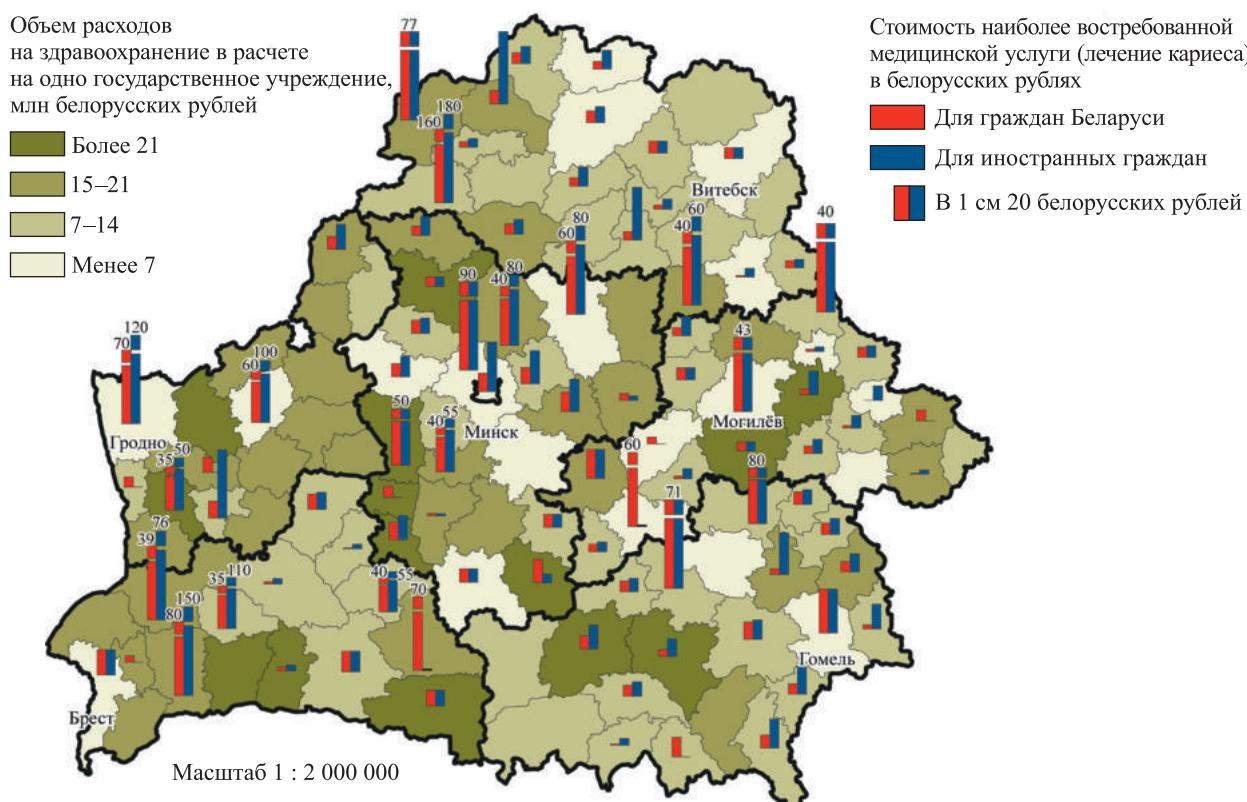


Рис. 5. Объем расходов на здравоохранение в расчете на одно государственное учреждение и стоимость наиболее востребованной медицинской услуги в разрезе административных районов Беларусь в 2024 г. (составлено по данным Национального правового интернет-портала Республики Беларусь, официальных сайтов медицинских лабораторий «Инвирто» и «Синево», справочно-информационного портала *103.by*, онлайн-сервиса *Talon.by* и статистического сборника «Регионы Республики Беларусь» (2024))

Fig. 5. Volume of healthcare expenditure per public institution and the cost of the most popular medical service by administrative districts of Belarus in 2024 (compiled according to the data of the National legal internet portal of the Republic of Belarus, official websites of the medical laboratories «Invitro» and «Synevo», reference and information portal *103.by*, online service *Talon.by* and the statistical collection «Regions of the Republic of Belarus» (2024))

Таблица 3

Table 3

Ключевые показатели сферы здравоохранения для развития медицинского туризма в Беларусь

Table 3

Показатели	Беларусь		Брестская область		Гомельская область		Гродненская область		Минская область		Могилёвская область		г. Минск			
	2019	2024	2019	2024	2019	2024	2019	2024	2019	2024	2019	2024				
<i>Некоторые показатели системы здравоохранения, характеризующие потенциал для развития медицинского туризма</i>																
Число государственных медицинских учреждений, ед.	1029	1228	106	119	113	148	90	141	79	97	96	114	62	108	483	501
Число частных медицинских учреждений, ед.	458	500	63	70	41	45	51	57	46	52	54	59	25	30	178	187
Доля расходов на здравоохранение в бюджете административно-территориальных единиц, %	20,6	24,3	25,3	26,1	20,2	23,3	18,5	24,1	20,8	25,9	20,8	25,2	20,7	22,2	18,9	22,1
Объем расходов на здравоохранение в расчете на одно государственное учреждение, млн белорусских рублей	4,42	7,41	8,36	10,23	4,83	7,65	5,96	9,60	6,59	9,92	5,06	11,65	8,69	9,44	2,15	4,16
Число больничных коек в расчете на 10 тыс. человек населения, шт.	82,4	77,3	85,5	78,6	86,0	78,0	89,1	83,0	81,3	77,5	82,6	80,1	87,6	80,8	73,3	68,5
<i>Ключевые показатели развития медицинского туризма</i>																
Количество иностранных граждан, получивших медицинские услуги в Беларусь, тыс. чел.	150	160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Обеспеченность учреждениями здравоохранения, предоставляемыми платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения, ед.	15,77	18,87	12,51	14,44	13,47	17,84	10,11	14,79	12,14	15,01	10,21	11,85	8,45	14,06	32,84	34,52
Обеспеченность практикующими врачами в расчете на 10 тыс. человек населения	51,9	53,2	43,6	43,4	41,2	40,7	43,6	45,4	53,3	51,3	34,0	34,4	39,5	39,7	56,4	55,7
Обеспеченность средними медицинскими работниками в расчете на 10 тыс. человек населения	134,1	136,5	138,4	140,8	138,2	137,7	139,3	143,4	137,7	141,6	134,7	136,7	119,6	120,2	136,4	137,8
Стоимость лечения карисса для граждан Беларусь, белорусские рубли	65	85	45	60	45	55	80	105	65	90	85	115	70	90	65	85
Стоимость лечения карисса для иностранных граждан, белорусские рубли	80	105	60	80	55	70	100	130	90	120	90	120	85	110	75	100

Прическания: 1. Составлено по данным Национального правового интернет-портала Республики Беларусь, официальных сайтов медицинских лабораторий «Инвилтро» и «Синэво», справочно-информационного портала *103.by*, онлайн-сервиса *Taon.by* и статистического журнала «Регионы Республики Беларусь» (2024). 2. Официальные статистические данные о количестве иностраных граждан, получивших медицинские услуги в Беларусь, на региональном уровне отсутствуют.

Выявленные в ходе комплексной оценки по представленным выше показателям региональные диспропорции в уровне развития медицинского туризма выступили основанием для проведения типизации административно-территориальных единиц Беларуси (табл. 4, рис. 6). Предложенная типология является одним из важнейших научных результатов настоящего исследования. Она дает целостное представление о текущем состоянии медицинского туризма в республике, опираясь на статистические показатели, которые характеризуют доступность и качество медицинских услуг, кадровый потенциал и уровень сервиса медицинских учреждений, развитие их инфраструктуры.

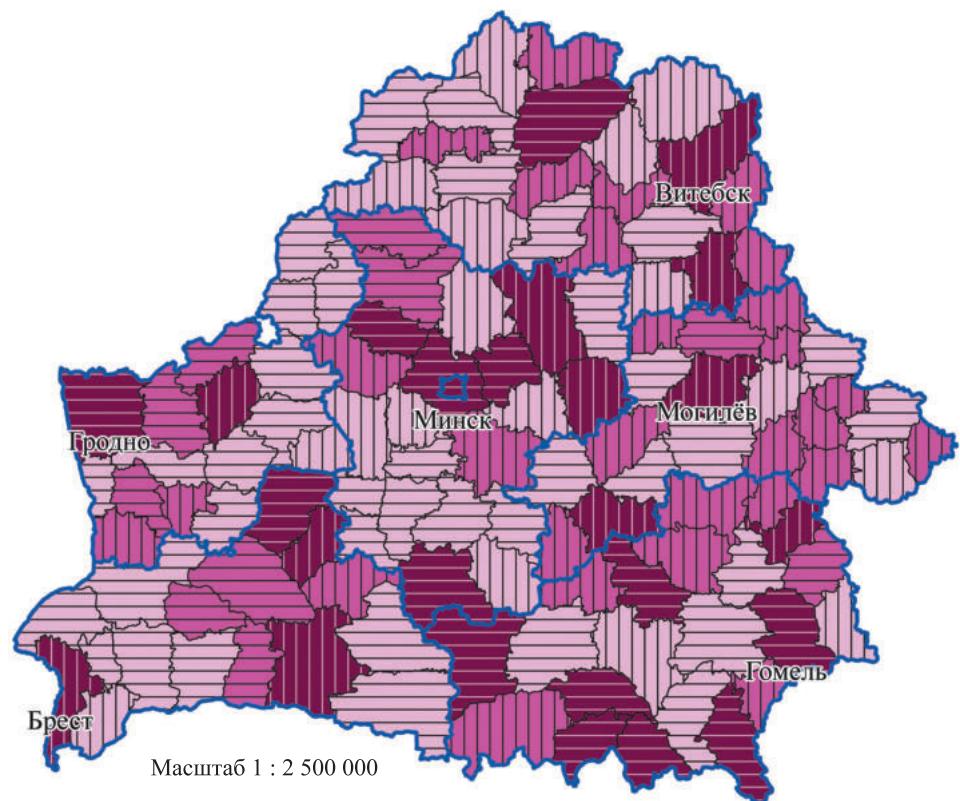
Таблица 4

**Комплексная типология административно-территориальных единиц Беларуси
по уровню развития медицинского туризма в 2024 г.**

Table 4

**Comprehensive typology of administrative-territorial units of Belarus
by the level of development of medical tourism in 2024**

Типы	Подтипы	Количество (доля) административно- территориальных единиц	Доля типа в структуре общей типовологии, %
Тип 1. Районы с высоким уровнем развития медицинского туризма	Подтип 1.1. Районы с высокой обеспеченностью уч- реждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, доступными ценами, высокой обеспеченностью медицинским персона- лом и широким перечнем оказываемых медицин- ских услуг	11 (9 %)	22
	Подтип 1.2. Районы с высокой обеспеченностью уч- реждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, доступными ценами, средней обеспеченностью медицинским персоналом и широким перечнем оказываемых медицинских услуг	15 (13 %)	
Тип 2. Районы со средним уровнем развития медицинского туризма	Подтип 2.1. Районы с высокой обеспеченностью уч- реждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, доступными ценами, низкой обеспеченностью медицинским персоналом и ограниченым перечнем оказываемых медицин- ских услуг	28 (24 %)	32
	Подтип 2.2. Районы со средней обеспеченностью уч- реждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, доступными ценами, высокой обеспеченностью медицинским персона- лом и широким перечнем оказываемых медицин- ских услуг	10 (8 %)	
Тип 3. Районы с низким уровнем развития медицинского туризма	Подтип 3.1. Районы с низкой обеспеченностью уч- реждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, доступными ценами, средней обеспеченностью медицинским персоналом и ограниченным перечнем оказываемых медицин- ских услуг	38 (32 %)	46
	Подтип 3.2. Районы с низкой обеспеченностью уч- реждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, высокими ценами, низкой обеспеченностью медицинским персоналом и ограниченным перечнем оказываемых медицин- ских услуг	17 (14 %)	



- Тип 1. Районы с высоким уровнем развития медицинского туризма
- Подтип 1.1. Районы с высокой обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, доступными ценами, высокой обеспеченностью медицинским персоналом и широким перечнем оказываемых медицинских услуг
- Подтип 1.2. Районы с высокой обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, доступными ценами, средней обеспеченностью медицинским персоналом и широким перечнем оказываемых медицинских услуг
- Тип 2. Районы со средним уровнем развития медицинского туризма
- Подтип 2.1. Районы с высокой обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, доступными ценами, низкой обеспеченностью медицинским персоналом и ограниченным перечнем оказываемых медицинских услуг
- Подтип 2.2. Районы со средней обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, доступными ценами, высокой обеспеченностью медицинским персоналом и широким перечнем оказываемых медицинских услуг
- Тип 3. Районы с низким уровнем развития медицинского туризма
- Подтип 3.1. Районы с низкой обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, доступными ценами, средней обеспеченностью медицинским персоналом и ограниченным перечнем оказываемых медицинских услуг
- Подтип 3.2. Районы с низкой обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, высокими ценами, низкой обеспеченностью медицинским персоналом и ограниченным перечнем оказываемых медицинских услуг

Rис. 6. Комплексная типология административно-территориальных единиц Беларуси по уровню развития медицинского туризма в 2024 г.

Fig. 6. Comprehensive typology of administrative-territorial units of Belarus by the level of development of medical tourism in 2024

К типу 1 относятся районы с высоким уровнем развития медицинского туризма, которые характеризуются наиболее благоприятными условиями для привлечения пациентов, в том числе иностранных. Такие районы отличаются высокой обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения, доступными ценами, обеспеченностью медицинским персоналом не ниже среднереспубликанского уровня и широким перечнем оказываемых медицинских услуг, что достигается благодаря достаточному финансированию сферы здравоохранения и наличию значительного числа частных медицинских учреждений. Преимущественно они локализуются в районах с областными центрами, недалеко от столицы, а также в районах с общим демографическим потенциалом, превышающим 100 тыс. жителей (см. табл. 4, рис. 6).

В тип 2 входят районы со средним уровнем развития медицинского туризма, которые отличаются высокой или средней обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения, доступными ценами, дифференцированной обеспеченностью медицинским персоналом и широким либо ограниченным перечнем оказываемых медицинских услуг в зависимости от выделенных подтипов. Они точно представлены в центральной части страны, ареально – на западе и востоке Беларуси (Вилейский, Воложинский, Пуховичский, Чечерский, Вороновский районы и др.) (см. табл. 4, рис. 6).

К типу 3 принадлежат районы с низким уровнем развития медицинского туризма, которые характеризуются низкой обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения, часто высокими ценами на медицинские услуги, средней либо низкой обеспеченностью медицинским персоналом и ограниченным перечнем оказываемых медицинских услуг, что связано с низким уровнем развития инфраструктуры, недостаточным объемом финансирования сферы здравоохранения и малым количеством частных медицинских учреждений. Районы данного типа представлены повсеместно, но наибольшее их число сконцентрировано в северо-западной, западной и центральной частях страны (Браславский, Верхнедвинский, Докшицкий, Ошмянский, Столбцовский районы и др.) (см. табл. 4, рис. 6).

Полученные результаты дают возможность комплексно оценить текущее состояние и перспективы развития медицинского туризма в Беларуси.

Заключение

Медицинский туризм представляет собой междисциплинарный объект исследования, который входит в проблемное научное поле экономической географии, медицины, экономики и социологии. Его главной особенностью является уникальная возможность сочетать получение медицинских услуг с путешествиями и отдыхом за пределами своего основного места проживания. Международная специализация Беларуси в области медицинского туризма основывается на проведении онкологических, офтальмологических и кардиологических операций, оказании стоматологических услуг, осуществлении ЭКО, трансплантации органов и тканей, санаторно-курортном лечении и реабилитации. Несмотря на то что на данный момент наша страна не входит в авторитетные мировые рейтинги медицинского туризма, она привлекает внимание иностранных пациентов и является перспективной для развития данного вида туризма благодаря доступным ценам на большинство услуг при высоком качестве оказания медицинской помощи, а также выгодному экономико-географическому положению в центре Европы.

За период с 2010 по 2024 г. количество иностранных граждан, получивших медицинскую помощь в Беларуси, выросло с 100 тыс. до 160 тыс. человек. С 2019 по 2024 г. отмечается увеличение числа государственных медицинских учреждений (с 1029 до 1228 ед.) при пропорциональном росте числа частных медицинских учреждений (с 458 до 500 ед.), причем большая их часть сконцентрирована в столице. Обеспеченность учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения за аналогичный период увеличилась с 15,77 до 18,87 ед. Наибольшие значения данного показателя зафиксированы в г. Минске (свыше 32 ед.). Кроме того, с 2019 по 2024 г. выросли объемы расходов на здравоохранение в расчете на одно государственное учреждение (с 4,42 млн до 7,41 млн белорусских рублей). Доля расходов на здравоохранение в бюджете административно-территориальных единиц в целом по стране также увеличилась (с 20,6 до 24,3 %). Обеспеченность практикующими врачами и младшими медицинскими работниками в расчете на 10 тыс. человек населения за указанный период возросла незначительно (с 51,9 до 53,2 и с 134,1 до 136,5 соответственно). Число больничных коек в расчете на 10 тыс. человек населения, определяемое государственными нормами и квотами, при этом имело тенденцию к снижению (с 82,4 до 77,3 шт.). Стоимость наиболее востребованной медицинской услуги (лечение кариеса) для граждан Беларуси за период с 2019 по 2024 г. в среднем по стране увеличилась с 65 до 85 белорусских рублей, а стоимость этой же услуги для иностранных граждан – с 80 до 105 белорусских рублей.

Выявленные региональные диспропорции в уровне развития медицинского туризма выступили основанием для проведения типизации административно-территориальных единиц Беларуси, результатом чего стала их комплексная типология. Районы с высоким уровнем развития медицинского туризма (тип 1) характеризуются наиболее благоприятными условиями для привлечения пациентов, в том числе иностранных, и занимают 22 % в общей структуре типологии. Они отличаются высокой обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения, доступными ценами, обеспеченностью медицинским персоналом не ниже среднереспубликанского уровня и широким перечнем оказываемых медицинских услуг. Районы с низким уровнем развития медицинского туризма (тип 3) являются наиболее распространенными, их доля в общей структуре типологии достигает 46 %. Эти районы отличаются низкой обеспеченностью учреждениями здравоохранения, предоставляющими платные медицинские услуги, в расчете на 100 тыс. человек населения, часто высокими ценами на медицинские услуги, средней либо низкой обеспеченностью медицинским персоналом и ограниченным перечнем оказываемых медицинских услуг, что связано с низким уровнем развития инфраструктуры, недостаточным объемом финансирования сферы здравоохранения и малым количеством частных медицинских учреждений. Районы со средним уровнем развития медицинского туризма (тип 2), удельный вес которых в общей структуре типологии составляет 32 %, занимают промежуточное положение по большинству анализируемых показателей.

Полученные результаты позволяют комплексно оценить текущее состояние и перспективы развития медицинского туризма в Беларуси. Они могут служить основой для разработки адресных рекомендаций и стратегий по совершенствованию региональной политики в сфере здравоохранения и медицинского туризма. В целом наиболее перспективными с точки зрения развития медицинского туризма являются Минская и Гомельская области, а также г. Минск. Наименьшим уровнем его развития на данный момент характеризуются районы Витебской и Гродненской областей.

Библиографические ссылки

1. Соколов АС, Манько НП, Гуляев ВГ. Теоретико-методологические аспекты медицинского туризма. *Вестник РМАТ*. 2017; 3:105–111. EDN: YXIAMC.
2. Nahrstedt H. *Die Kurorten Medizine und Vorteile*. Bern: [s. n.]; 1997. 243 S.
3. Ефимов СА, Ефимова АС. Лечебно-оздоровительный, лечебный и оздоровительный туризм: уточняем понятийно-терминологический аппарат. *Вестник физиотерапии и курортологии*. 2017;23(4):155–160. EDN: ZTSNIB.
4. Bookman MZ, Bookman KR. *Medical tourism in developing countries*. New York: Palgrave Macmillan; 2007. XI, 245 p. DOI: 10.1057/9780230605657.
5. Набедрик ВА. *География лечебного туризма в Европе: модели развития и трансформационные процессы* [диссертация]. Москва: [б. и.]; 2005. 148 с.
6. Наводничий РМ. *Управление развитием сферы лечебно-оздоровительных услуг в России* [диссертация]. Москва: [б. и.]; 2011. 188 с.
7. Разумов АН, Яшина ЕР, Бережнов ЕС, Петрунь ИБ, Мердок Д, Бобровницкий ИП. Лечебный туризм как современное направление курортной медицины в России. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*. 1999; 3:46–49.
8. Морозов МА, Львова ТВ. Оздоровительный туризм в России: особенности и перспективы развития. *Вестник Российской государственной торгово-экономической университета*. 2011;12:87–99. EDN: FZIRJZ.
9. Савельева НА, Шмелева ТВ, Топоров СИ. Подход к классификации услуг медицинского туризма. *Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление*. 2019;7:15–19. EDN: ESGOWS.
10. Johnston R, Crooks VA, Snyder J, Kingsbury P. What is known about the effects of medical tourism in destination and departure countries? A scoping review. *International Journal for Equity in Health*. 2010;9:24. DOI: 10.1186/1475-9276-9-24.
11. Johnston R, Crooks VA. Medical tourism in the Caribbean region: a call to consider environmental health equity. *West Indian Medical Journal*. 2013;62(3):250–253.
12. Johnston R, Crooks VA, Ormond M. Policy implications of medical tourism development in destination countries: revisiting and revising an existing framework by examining the case of Jamaica. *Globalization and Health*. 2015;11:29. DOI: 10.1186/s12992-015-0113-0.
13. Johnston R, Crooks VA, Adams K, Snyder J, Kingsbury P. An industry perspective on Canadian patients' involvement in medical tourism: implications for public health. *BMC Public Health*. 2011;11:416. DOI: 10.1186/1471-2458-11-416.
14. Pagán R, Horsfall D. Medical tourism trends in the United Kingdom 2000–2016: global economic crisis, migration and UK expats under consideration. *Journal of Tourism Analysis: Revista de Análisis Turístico*. 2020;27(1):20–40. DOI: 10.1108/JTA-06-2019-0025.
15. Parsiyan A. Medical tourism: the commodification of health care in Latin America. *Law and Business Review of the Americas*. 2009;15(2):379–404.
16. Béland D, Zarzecny A. Medical tourism and national health care systems: an institutionalist research agenda. *Globalization and Health*. 2018;14:68. DOI: 10.1186/s12992-018-0387-0.
17. Haist K. Medical tourism and its effect on United States healthcare industry in a highly connected global landscape. *The Hilltop Review*. 2018;10(2):28–40.
18. Vovk V, Beztelezna L, Pliashko O. Identification of factors for the development of medical tourism in the world. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(21):11205. DOI: 10.3390/ijerph182111205.

19. Daykhes AN, Jakovljevic M, Reshetnikov VA, Kozlov VV. Promises and hurdles of medical tourism development in the Russian Federation. *Frontiers in Psychology*. 2020;11:1380. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.01380.
20. Bagheri M, Mobasher AA, Shekari F, Moaven Z, Nikbakht A. Identifying and prioritizing strategies for Iran's medical tourism development. *Interdisciplinary Journal of Management Studies*. 2024;17(1):331–345. DOI: 10.22059/ijms.2023.340379.675010.
21. Anshasi RJ, Alsyouf A, Alhazmi FN. Jordan as a medical hotspot: views on medical tourism. *International Journal of Professional Business Review*. 2022;7(6):e0457. DOI: 10.26668/businessreview/2022.v7i6.e457.
22. Gholipour HF, Esfandiar K. Does medical tourism promote growth in healthcare sector? *The European Journal of Health Economics*. 2025;26(2):233–241. DOI: 10.1007/s10198-024-01700-3.
23. Bulatovic I, Iankova K. Barriers to medical tourism development in the United Arab Emirates (UAE). *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(3):1365. DOI: 10.3390/ijerph18031365.
24. Pirzada N. The expansion of Turkey's medical tourism industry. *Voices in Bioethics* [Internet]. 2022 [cited 2024 December 25];8. Available from: <https://journals.library.columbia.edu/index.php/bioethics/article/view/9894>. DOI: 10.52214/vib.v8i.9894.
25. Kılavuz E. Medical tourism competition: the case of Turkey. *International Journal of Health Management and Tourism*. 2018;3(1):42–58. DOI: 10.31201/ijhmt.372364.
26. Fengmin Z, Baijun W, Jiangtao B, Li L, Patwary AK. Investigating revisit intention of medical tourists in China through nutritional knowledge, perceived medical quality, and trust in the physiologist: a recommendation on health tourism policy measures. *Frontiers in Public Health*. 2022;10:893497. DOI: 10.3389/fpubh.2022.893497.
27. Liu Y, Lin Q, Zhang D. Understanding the reality of China's health tourism and consumer demand from the perspective of consumers: a cross-sectional study. *Frontiers in Psychology*. 2022;13:824328. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.824328.
28. Shridhar R. The future of medical tourism in India. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*. 2022;13(special issue 9):4763–4767.
29. Pocock NS, Phua KH. Medical tourism and policy implications for health systems: a conceptual framework from a comparative study of Thailand, Singapore and Malaysia. *Globalization and Health*. 2011;7:12. DOI: 10.1186/1744-8603-7-12.
30. Костянин АА. Характеристики потребительского поведения на российском рынке выездного медицинского туризма. *Вестник Московского университета. Серия 6, Экономика*. 2020;1:135–155. DOI: 10.38050/01300105202017.
31. Антипова ЕА, Трифонова ЗА. Региональные различия масштабов демографического старения Беларуси и России. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2017;1:36–49. EDN: ХУРАНВ.

Получена 21.01.2025 / исправлена 07.03.2025 / принята 10.03.2025.
Received 21.01.2025 / revised 07.03.2025 / accepted 10.03.2025.

ОЦЕНКА ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ВОДОСБОРОВ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГИС НА ПРИМЕРЕ г. МИНСКА

Е. П. ОВЧАРОВА¹⁾, С. В. АЛИСИЕВИЧ¹⁾, Н. В. КОВАЛЬЧИК²⁾

¹⁾Институт природопользования НАН Беларусь, ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь

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

Аннотация. С использованием цифровой модели рельефа и инструментов гидрологического моделирования Arc Hydro в среде ArcGIS Desktop (версия 10.7) выделены 73 локальных водосбора в современных границах г. Минска. На основе полученной картосхемы выполнено моделирование исторической гидрографической сети и границ существующих в настоящее время естественных водосборов на территории города. С учетом данных по формированию коллекторной сети дождевой канализации для отвода поверхностного стока определены участки трансформации и скорректированы границы водосборов. На территории г. Минска выявлены четыре направления трансформации водосборов. Первое направление связано с исчезновением естественного водотока и переходом функции по отводу поверхностного стока к коллекторной сети (доля площади таких водосборов составляет 18,4 %). Второе направление сопряжено с фрагментацией водосборов центральной части города вследствие создания сети мелких коллекторов с самостоятельными выпусками в водоток (18,9 % от площади города). Третье направление обусловлено укрупнением водосборов магистральных коллекторов по сравнению с водосборами исходных водотоков за счет присоединения части стока смежных водосборов. Четвертое направление связано с уменьшением площади водосборов магистральных коллекторов относительно площади водосборов исходных водотоков в результате фрагментации и отведения части стока в другие коллекторы. Доля территорий города, изменивших водосборную принадлежность, составляет 17,9 % (59,3 км²).

Ключевые слова: ГИС-технологии; гидрологическое моделирование; урбанизированная территория; естественный водосбор; трансформация пространственной структуры.

Образец цитирования:

Овчарова ЕП, Алисевич СВ, Ковалчик НВ. Оценка трансформации пространственной структуры водосборов урбанизированной территории с применением гидрологического моделирования в ГИС на примере г. Минска. Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2025;1:24–34.

EDN: OSRCYE

For citation:

Aucharova AP, Alisievich SV, Kavalchik NV. Assessment of the spatial structure transformation of catchments on the urban territory using hydrological modelling in GIS on the example of Minsk. Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology. 2025;1:24–34. Russian.

EDN: OSRCYE

Авторы:

Елена Петровна Овчарова – кандидат географических наук; старший научный сотрудник лаборатории оптимизации геосистем.

Святослав Владимирович Алисевич – младший научный сотрудник лаборатории оптимизации геосистем.

Надежда Владимировна Ковалчик – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Alena P. Aucharova, PhD (geography); senior researcher at the laboratory of geosystems optimisation.

geosystem1@rambler.ru

Svyatoslav V. Alisievich, junior researcher at the laboratory of geosystems optimisation.

sviatolv@gmail.com

Nadzeya V. Kavalchik, PhD (geography), docent; associate professor at the department of soil science and geographic information systems, faculty of geography and geoinformatics.

kovalchiknv@gmail.com

ASSESSMENT OF THE SPATIAL STRUCTURE TRANSFORMATION OF CATCHMENTS ON THE URBAN TERRITORY USING HYDROLOGICAL MODELLING IN GIS ON THE EXAMPLE OF MINSK

A. P. AUCHAROVA^a, S. V. ALISIEVICH^a, N. V. KAVALCHYK^b

^a*Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
10 F. Skaryny Street, Minsk 220076, Belarus*

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

Corresponding author: A. P. Aucharova (geosystem1@rambler.ru)

Abstract. Using a digital elevation model and Arc Hydro hydrological modelling tools in the *ArcGIS Desktop* (version 10.7) environment, 73 local catchments within the modern boundaries of Minsk were identified. Based on the resulting schematic map, the historical hydrographic network and boundaries of currently existing natural catchments in the city were modelled. Taking into account the data on the formation of rainwater drainage network for urban runoff removal, transformation areas were identified and the catchments boundaries were adjusted. On the territory of Minsk, four directions of catchments transformation were identified. The first direction is associated with the disappearance of the natural catchments and the transfer of the urban runoff draining function to the rainwater drainage network (the share of the area of such catchments is 18.4 %). The second direction is driven by fragmentation of catchments in the city central part due to creation of small rainwater drainage network with independent discharges into the water stream (18.9 % of the city area). The third direction is caused by the catchments enlargement of the main collectors of rainwater drainage network in comparison with the river natural catchments due to the addition of part of the neighbour catchments. The fourth direction is associated with the catchment reduction of the main collectors relative to the river natural catchments as a result of fragmentation and partial drainage of urban runoff to other collectors. The part of city area that have changed their catchment is 17.9 % (59.3 km²).

Keywords: GIS technologies; hydrological modelling; urban area; natural catchment; spatial structure transformation.

Введение

В современных условиях урбанизированные территории подвергаются значительной трансформации из-за застройки и формирования инфраструктуры, обеспечивающей жизнь городов [1–3]. В результате освоения территорий естественная гидрографическая сеть редко остается в исходном состоянии, а водные объекты приобретают природно-антропогенные либо природно-техногенные черты. Как правило, происходит сокращение длины рек, дренирующих территорию города, формируются техногенные водосборы сети дождевой канализации, реки заключаются в коллекторы и пересыхают, в том числе из-за эксплуатации водозаборов подземных вод [4; 5].

За последние 50–60 лет структура водных объектов г. Минска существенно изменилась. Если ранее реками и русловыми водоемами было занято около 76 % водопокрытой площади, отдельными водоемами – 10 %, каналами и открытыми коллекторами – 7 %, мелиоративными системами и ручьями – 4 и 3 % соответственно, то в настоящее время на реки и русловые водоемы приходится 72 %, на отдельные водоемы – 21 %, на каналы и открытые коллекторы (включая Слепянскую водную систему) – не более 7 % водопокрытой площади [6].

Наибольшей трансформации естественные водные объекты г. Минска подверглись в 1968–1976 гг. при строительстве Вилейско-Минской водной системы, когда были созданы ряд водохранилищ (Дрозды, Комсомольское озеро и др.) и водообмен р. Свисочи возрос в пять раз. В результате площадь, занимаемая водными объектами, увеличилась примерно на 4,0 км². Следующее существенное увеличение водопокрытой площади (на 1,1 км²) наблюдалось в 1982–1985 гг. при строительстве Слепянской водной системы и водохранилищ Лошица и Цнянское. При этом произошло сокращение водотоков в естественном состоянии, исчезли реки Дражня, Немига, Переспа, ручьи Грушевский, Серебрянка и др. (площадь зеркала водотоков уменьшилась примерно на 1,5 км²) [5].

В настоящее время общая площадь водного зеркала составляет 8,3 км², что на 5,0 км² больше, чем в 1950-х гг., а водные объекты г. Минска представлены:

- водотоками (1,8 км²);
- системообразующими водоемами, такими как водохранилища Чижовское, Цнянское, Дрозды, Лошица, пруд Лебяжий, Комсомольское озеро, водоем ТЭЦ-2 (5,97 км²);

- Слепянской водной системой без вдхр. Цнянское ($0,23 \text{ км}^2$);
- малыми водоемами, в число которых входят остаточные водоемы от пересохших рек и ручьев ($0,1 \text{ км}^2$), бывшие копани и искусственно созданные водоемы ($0,2 \text{ км}^2$).

Основной этап строительства сети магистральных коллекторов дождевой канализации для отвода поверхностного стока с территории города пришелся на период 1960–90-х гг. Так, в 1977 г. было закончено строительство коллектора «Запад», в 1980 г. – коллекторов «Юго-Запад» и «Комаровский», в 1990 г. – коллектора «Дражня», в 1991 г. – коллектора «Центр», в 1992 г. – коллектора «Слепянка». В 2010–2011 гг. проведена реконструкция коллектора «Центр», а в 2014 г. сдан в эксплуатацию магистральный коллектор «Немига». Начиная с 2000-х гг. ведется проектирование, строительство и реконструкция сооружений по очистке поверхностного стока города, в том числе для сети мелких коллекторов [7]. Ввиду перечисленных факторов оценка современной пространственной структуры водосборов на территории г. Минска и ее изменения под влиянием антропогенной нагрузки представляет собой актуальную задачу.

Работа выполнена с применением ГИС-технологий, которые являются важным современным инструментом для исследования гидрологических процессов. Спектр гидрологических приложений ГИС довольно широк: они используются для обработки пространственных данных, моделирования, прогнозирования и поддержки принятия решений [8]. Гидрологическое моделирование в ГИС применяется для решения таких задач, как расчет русловых и бассейновых морфометрических характеристик [9], прогнозирование паводков и половодий на реках [10], определение зон возможного подтопления [11], устранение неточностей гидрологического районирования [12] и др. При моделировании гидрологических процессов в условиях города наряду с показателями проницаемости и запечатанности почвенного покрова следует учитывать обеспеченность территории сетями дождевой канализации, от которой существенно зависит скорость отвода поверхностного стока и его добегания до принимающего водотока [13]. Так, ранее анализ пространственно-временных изменений естественной и искусственной дренажных сетей был выполнен для городов Великого Новгорода [14] и Саратова [15].

При изучении антропогенной преобразованности водосборов на территории г. Минска в работе [16] исходное состояние гидрографической сети воссоздано по картам и снимкам 1930–40-х гг.¹ В публикации [17] оно восстановлено с использованием инструментов ГИС-моделирования. В этом случае основой моделирования дренажной сети города послужили данные по гипсометрии территории, полученные путем натурной съемки и представляющие собой набор основных горизонталей, проведенных через 1,0 и 0,5 м, и дополнительных горизонталей, проведенных через 0,5 и 0,25 м соответственно. Построение бассейнов реализовано в программе *Global Mapper* (версия 15) с использованием инструмента *generate watershed* (создать водораздел).

Целью данного исследования было выявить направления и уровень трансформации естественных водосборов в результате формирования на территории г. Минска системы дождевой канализации для отвода поверхностного стока. Для этого выполнялось ГИС-моделирование границ водосборов естественной гидрографической сети, далее проводилась корректировка границ водосборов с учетом современной ситуации с отводом поверхностного стока магистральными и более мелкими коллекторами дождевой канализации. Информация о сети дождевой канализации на территории г. Минска взята из работы [4] и актуализирована по фондовым материалам унитарного предприятия «Минскинжпроект».

Материалы и методы исследования

Работа выполнялась в два этапа.

Этап 1: выделение локальных водосборов и естественной гидрографической сети г. Минска с помощью инструментов гидрологического моделирования *Arc Hydro*² в среде *ArcGIS Desktop* (версия 10.7). В качестве исходных данных использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) территории города с пространственным разрешением 10 м (рис. 1, а). Определение границ водосборов проводилось в несколько шагов.

Шаг 1: обработка исходной ЦМР в целях создания гидрологически корректной ЦМР. Чтобы максимально приблизить модель к действительной поверхности рельефа, были устраниены погрешности и неточности в значениях ячеек раstra путем нивелирования локальных понижений и повышений (некорректных областей внутреннего стока) с помощью инструмента *fill sinks* (заполнение понижений). В процессе заполнения локальных понижений инструмент определяет ячейки раstra исходной

¹ Аэрофотоснимки немецких спутников Второй мировой войны, 28.05.1944 и 15.05.1943 [Электронный ресурс]. URL: <http://warfly.ru/?lat=53.895033&lon=27.569160&z=12> (дата обращения: 12.06.2019); Минск и окрестности [Карты] / сост. Душка ; ред. Самотей. 1 : 50 000, 1 км в 2 см. [Б. м.] : [Б. и.], 1933. 1 к. : цв.

² Arc Hydro: GIS for water resources [Electronic resource] / ed. D. R. Maidment. 3rd ed. Redlands : Esri Press, 2022. XIV, 203 p. : ill., maps. URL: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/files/pdfs/library/fliers/pdfs/archydro.pdf> (date of access: 04.10.2024).

ЦМР, которые имеют более низкие численные значения, чем окружающие их ячейки, и часто являются ошибками, возникающими из-за разрешения набора данных³. Затем он корректирует значения этих ячеек для обеспечения более точного выделения водосборов и водотоков. Если не заполнить локальные понижения, в последующем дренажная сеть может иметь разрывы. В большинстве случаев, когда понижения являются артефактами ЦМР, такая обработка верна, однако иногда устраняются и значимые понижения, что тоже может повлиять на дальнейшее моделирование. Инструмент был использован также для удаления локальных повышений – ячеек растра с высотой больше ожидаемой, учитывая высоту окружающей поверхности. В результате обработки получена гидрологически корректная ЦМР (*hydro DEM*) территории (рис. 1, б).

Шаг 2: определение направления стока в каждой ячейке грид-модели путем анализа углов и экспозиций склонов с помощью инструмента *flow direction* (направление потока). Инструмент принимает в качестве входных данных гидрологически корректную ЦМР (*hydro DEM*) и вычисляет соответствующий растр направления стока (*flow direction grid*) (рис. 1, в). В процессе вычисления сканируется высота каждой ячейки для определения направления самого крутого спуска и присваиваются численные значения выходному растру, указывающие, в какую соседнюю ячейку будет поступать вода. Всего выделяется восемь направлений спуска, в зависимости от которых каждой ячейке присваивается численное значение: восточное (ему соответствует значение 1), юго-восточное (2), южное (4), юго-западное (8), западное (16), северо-западное (32), северное (64), северо-восточное (128).

Шаг 3: вычисление суммарного стока (количество всех ячеек, чей сток попадает в ячейку, лежащую ниже по склону) с помощью инструмента *flow accumulation* (накопление стока). Инструмент принимает в качестве входных данных модель направления стока (*flow direction grid*) и вычисляет модель накопления стока (*flow accumulation grid*), которая содержит суммарное количество ячеек вверх по течению для каждой ячейки во входном растре. Ячейки с самым большим значением суммарного стока образуют линии, являющиеся основой для выделения в дальнейшем сети водотоков. Ячейки с суммарным стоком, принимающим значение 0, – это территориальные «пики» (возвышения), с помощью которых визуализируются линии водоразделов.

Шаг 4: определение сети водотоков с помощью инструмента *stream definition* (определение водотоков). Инструмент принимает в качестве входных данных модель накопления стока (*flow accumulation grid*) и выделяет сеть постоянных водотоков (*stream grid*) для заданного порога точности. Этот порог определяется либо количеством ячеек растра (по умолчанию 1 % от максимального накопления стока), либо минимальной площадью водосбора. Таким образом задается показатель суммарного стока, при котором поток будет считаться водотоком. В ходе данного исследования было принято значение порога по умолчанию.

Шаг 5: выделение звеньев каждого водотока на основе полученной сети водотоков с использованием инструмента *stream segmentation* (сегментация водотоков). Инструмент создает грид-модель сегментов, имеющих уникальную идентификацию согласно их порядку: сегмент водотока классифицируется как верхний сегмент (верхняя часть водотока) либо как сегмент, соединяющий два сегмента. Всем ячейкам растра, относящимся к определенному сегменту, присваивается уникальный код, характерный для этого сегмента. В результате был получен растр сегментации потоков (*stream link grid*).

Шаг 6: создание грид-модели, в которой каждая ячейка содержит грид-код (*grid code*), указывающий, к какому водосбору она относится, с использованием инструмента *catchment grid delineation* (очертание водосборов). Грид-код соответствует тому значению, которое имеет сегмент водотока, осушающий водосборную область, определенную во входном растре (*stream link grid*). На выходе была получена грид-модель водосборов (*catchment grid*) (рис. 1, г).

Шаг 7: автоматизированное выделение границ водосборов с использованием инструмента *catchment polygon processing* (обработка полигонов водосборов). Инструмент принимает в качестве входных данных грид-модель водосборов (*catchment grid*) и конвертирует ее в полигональный слой (*catchment*) (рис. 1, д). Соседние ячейки исходного растра водосборов, имеющие одинаковый код, объединяются в единую область, граница которой векторизуется.

Далее выполнялась ручная корректировка границ водосборов. Из полученного векторного слоя водосборов вырезались крупные площадные водные объекты – водохранилища Чижовское, Дрозды, Куровщина, пруд Лебяжий. Также удалялись полигоны водосборов, заходящих на территорию г. Минска лишь незначительной частью своей площади. Кроме того, уточнялись некоторые границы водосборов, проходящие по речным долинам и определенные в результате применения функции *fill sinks* неестественно прямой линией. В итоге на территории г. Минска были выделены 73 естественных локальных водосбора (рис. 1, е).

³How fill works // Esri : website. URL: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fill-works.htm> (date of access: 04.10.2024).

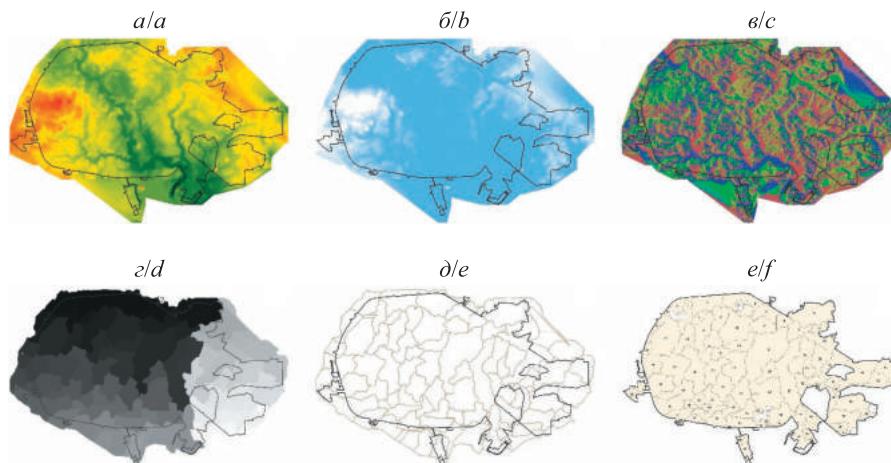


Рис. 1. Этапы выделения локальных водосборов на территории г. Минска инструментами гидрологического моделирования

Fig. 1. Stages of local catchments identification on the territory of Minsk using hydrological modelling tools

Этап 2: моделирование естественной гидрографической сети г. Минска и агрегация полученных локальных водосборов в водосборы водотоков, ранее протекавших по территории города, оцифровка современной коллекторной сети дождевой канализации с выпусками в водотоки г. Минска.

В завершение работы была проведена корректировка границ водосборов естественной гидрографической сети города с учетом современной ситуации с отводом поверхностного стока магистральными и более мелкими коллекторами дождевой канализации.

Результаты и их обсуждение

В современных границах г. Минска выделены естественные водосборы 15 водотоков: Грушевского, Дививелки (Тарасовки), Дражни (Словсти), Крупицы (Крупки), Лошицы, Мышки, Немиги, Переспы, Свислочи, Сеницы, Серебрянки, Слепянки (Слепни), Слоуста, Тростянки и Цны (рис. 2). Часть указанных водотоков существуют в настоящее время, некоторые исчезли (например, ручьи Грушевский и Серебрянка) или были заключены в подземные коллекторы (например, р. Немига), а некоторые преобразованы в коллекторы дождевой канализации (реки Переспа, Дражня и др.).

Характеристики водосборов исторической гидрографической сети (до создания водохранилищ и сети коллекторов) приведены в табл. 1. Так, горизонтальная расчлененность водосборов на территории г. Минска колебалась в пределах 1,9–2,4 км/км². Минимальные значения были характерны для водосборов рек Немиги и Сеницы, максимальные – для водосборов рек Дививелки, Лошицы, Свислочи и Слепянки.

Наименьшей площадью водосбора в границах города отличались следующие малые водотоки, не существующие в настоящее время: Крупица, Серебрянка, Немига и Дививелка. Другие не существующие в настоящее время водотоки – Грушевский, Переспа и Дражня – имели более крупные водосборы, объединявшие 1–2 локальных водосбора. Далее по возрастанию площади водосбора следовали водотоки Лошица и Мышка, которые включали 6 и 4 локальных водосбора соответственно (см. табл. 1).

Самыми крупными по площади водосборами исторической гидрографической сети являются водосборы рек Тростянки, Слепянки и Свислочи (см. табл. 1). В отдельную группу можно выделить водотоки Сеницу, Слоуст и Цну, которые протекают за границами или по окраинам города, вследствие чего в пределах городской черты расположена лишь небольшая часть их водосборов.

В настоящее время система дождевой канализации г. Минска включает 7 крупных магистральных коллекторов (объем сброса более 1000 тыс. м³ в год): «Комаровский», «Центр», «Немига», «Запад», «Юго-Запад», «Дражня» и «Слепянка» (рис. 3). Коллекторы «Комаровский», «Центр» и «Немига» имеют самостоятельные выпуски в р. Свислочь после очистных сооружений в центральной части города, коллекторы «Дражня» и «Слепянка» – общий выпуск в р. Свислочь после пруда-регулятора в районе ул. Инженерной, коллекторы «Запад» и «Юго-Запад» – общий выпуск в р. Лошицу после очистных сооружений в районе ул. Семашко. На долю этих 5 выпусков приходится 85,7 % поверхностного стока, формирующегося в пределах города и поступающего в водотоки через систему дождевой канализации. Еще 9,5 % поверхностного стока приходится на 15 выпусков средних коллекторов (объем сброса 100–1000 тыс. м³ в год). На остальные 80 выпусков мелких коллекторов (объем сброса менее 100 тыс. м³ в год) приходится только 4,8 % поверхностного стока.

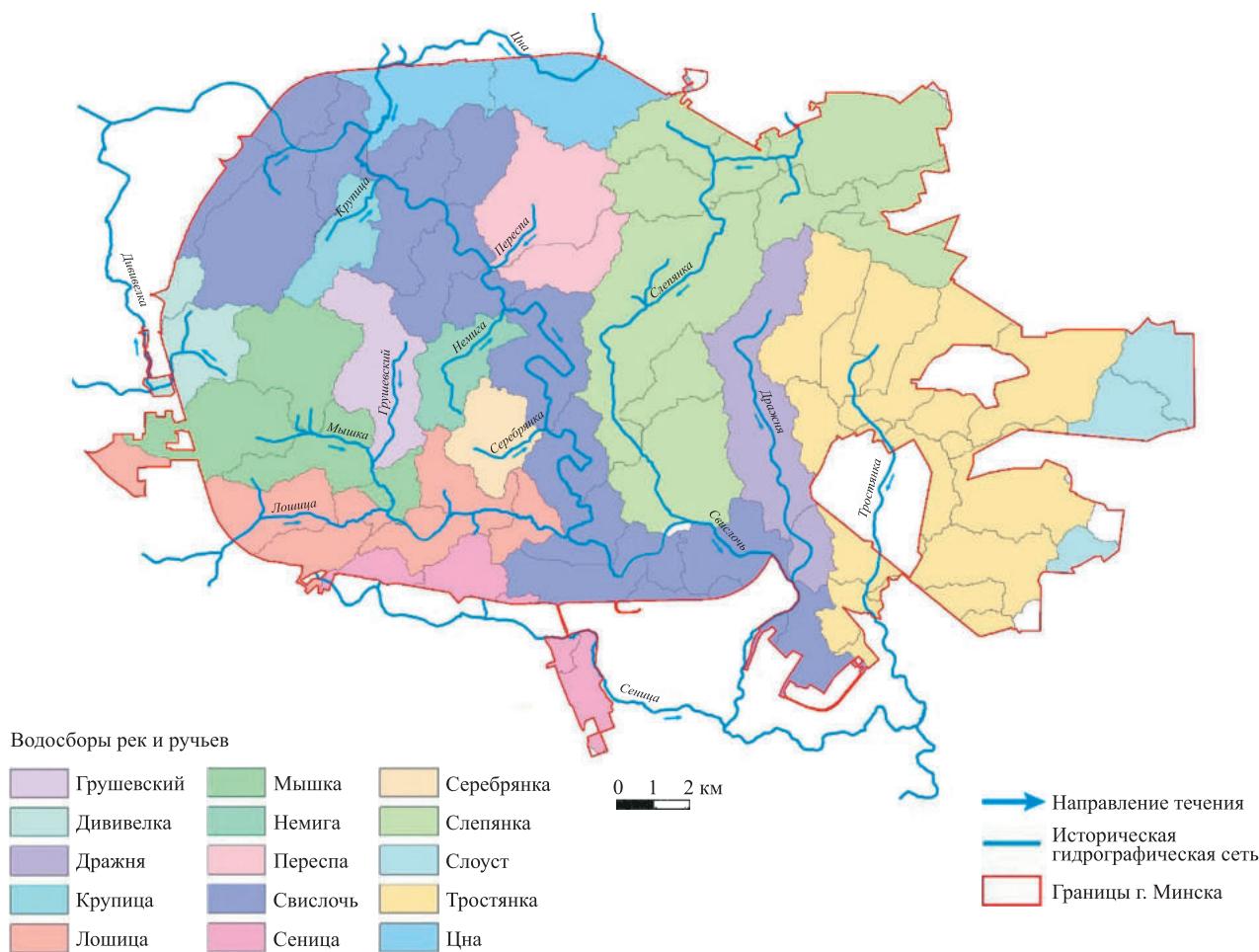


Рис. 2. Картосхема водосборов исторической гидрографической сети на территории г. Минска
Fig. 2. Schematic map of catchments of the historical hydrographic network on the territory of Minsk

Таблица 1

Характеристика водосборов естественной гидрографической сети
в современных границах г. Минска

Table 1

Characteristics of catchments of the natural hydrographic network
within the modern borders of Minsk

Водоток	Площадь водосбора, км ²	Количество локальных водосборов, шт.	Средняя площадь локального водосбора, км ²	Длина естественной дренажной сети, км	Горизонтальная расчлененность, км/км ²
Грушевский	9,14	1	9,1	18,94	2,1
Дививелка	6,46	2	3,2	15,74	2,4
Дражня	15,58	2	7,8	34,99	2,2
Крупица	4,80	1	4,8	9,95	2,1
Лошица	21,41	6	3,6	51,43	2,4
Мышка	23,32	4	5,8	52,72	2,3
Немига	5,35	1	5,4	10,23	1,9
Переспа	14,25	2	7,1	33,02	2,3
Свишльч	71,25	19	3,8	172,91	2,4
Сеница	8,20	4	2,0	15,63	1,9

Окончание табл. 1
 Ending of the table 1

Водоток	Площадь водосбора, км ²	Количество локальных водосборов, шт.	Средняя площадь локального водосбора, км ²	Длина естественной дренажной сети, км	Горизонтальная расчлененность, км/км ²
Серебрянка	5,26	1	5,3	12,26	2,3
Слепянка	64,78	10	6,5	153,87	2,4
Слоуст	9,30	3	3,1	18,59	2,0
Тростянка	57,36	15	3,8	120,54	2,1
Цна	14,25	2	7,1	29,84	2,1

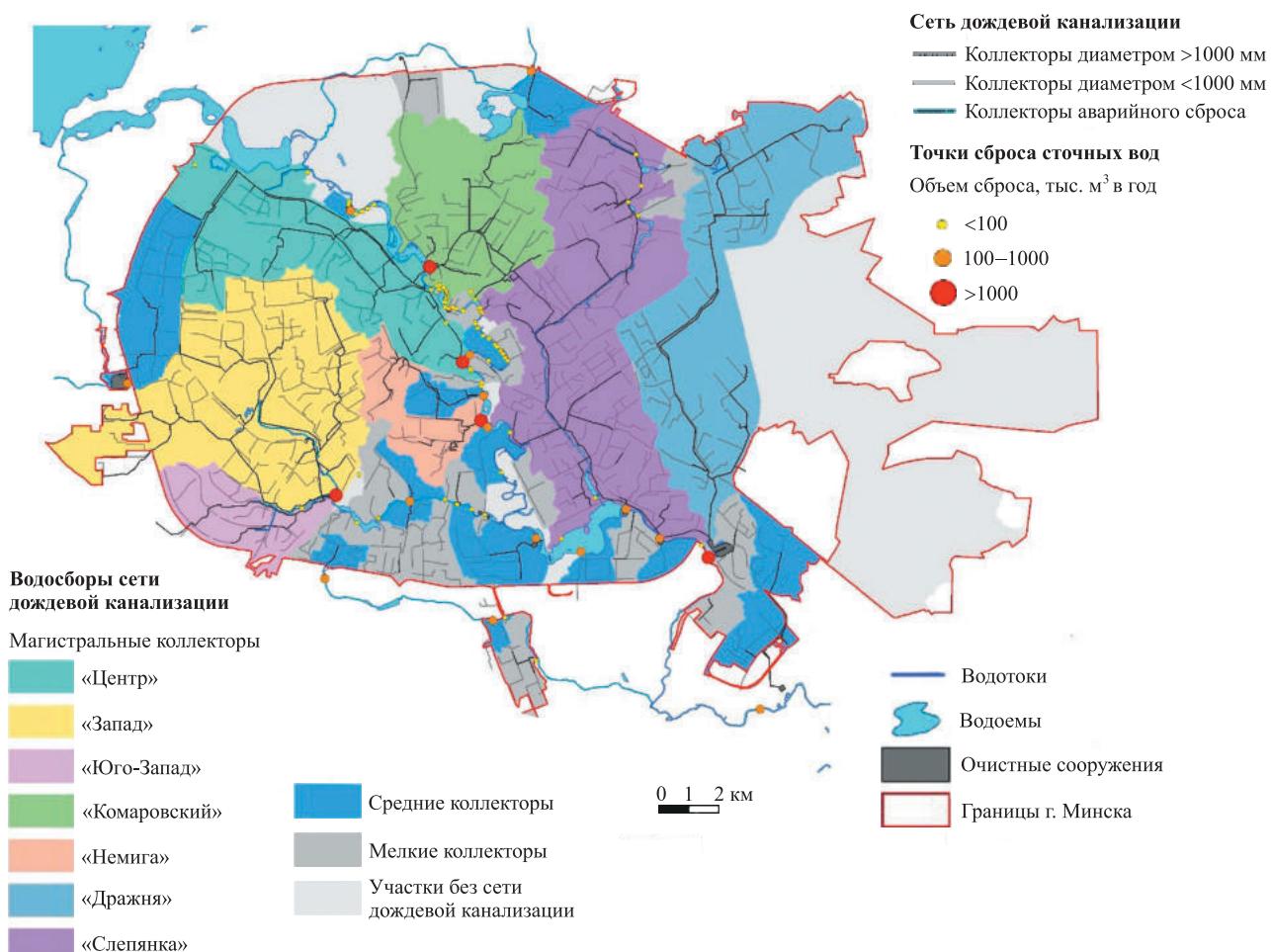


Рис. 3. Картосхема системы коллекторов дождевой канализации г. Минска для отвода поверхностного стока
 Fig. 3. Schematic map of the Minsk storm sewer systems for urban runoff drainage

Данные о площади водосборов современной сети коллекторов дождевой канализации на территории г. Минска приведены в табл. 2.

Сформированная на территории г. Минска система дождевой канализации для отвода поверхностного стока существенно трансформировала водосборную сеть водотоков города. Так, в настоящее время доля участков городской территории, обеспеченных сетями дождевой канализации, составляет 75,0 %. Из них 55,7 % обслуживается магистральными коллекторами, 10,5 % – средними, 8,8 % – мелкими коллекторами дождевой канализации.

В целом существующую на территории г. Минска коллекторную сеть с выпусками в р. Свислочь и ее притоки можно считать новыми техногенными притоками, возникшими в результате урбанизации водосбора. При этом, как правило, магистральные коллекторы в той или иной мере наследуют водосборы естественной речной сети.

Таблица 2

Площадь водосборов системы коллекторов дождевой канализации г. Минска
для отвода поверхностного стока

Table 2

Catchment's square of the Minsk storm sewer systems for urban runoff drainage

Водосбор	Площадь, км ²
Вся канализированная территория	248,1
Водосборы магистральных коллекторов	184,4
В том числе:	
водосбор коллектора «Центр»	26,5
водосбор коллектора «Запад»	38,0
водосбор коллектора «Юго-Запад»	8,3
водосбор коллектора «Комаровский»	20,9
водосбор коллектора «Немига»	7,3
водосбор коллектора «Дражня»	36,7
водосбор коллектора «Слепянка»	46,7
Водосборы средних коллекторов	34,7
Водосборы мелких коллекторов	29,0
Водосборы без сети дождевой канализации	82,7

Проведенный анализ данных показал, что на территории г. Минска в настоящее время можно выделить следующие направления трансформации пространственной структуры водосборов.

1. Формирование водосборов, где функцию по отводу поверхностного стока выполняет коллекторная сеть ввиду полного исчезновения естественных водотоков. Данная ситуация наблюдается для исчезнувших или канализированных водотоков (Грушевский, Дививелка, Дражня, Крупица, Немига, Серебрянка, Переспа). Доля площади таких водосборов на территории города составляет 18,4 % (рис. 4).

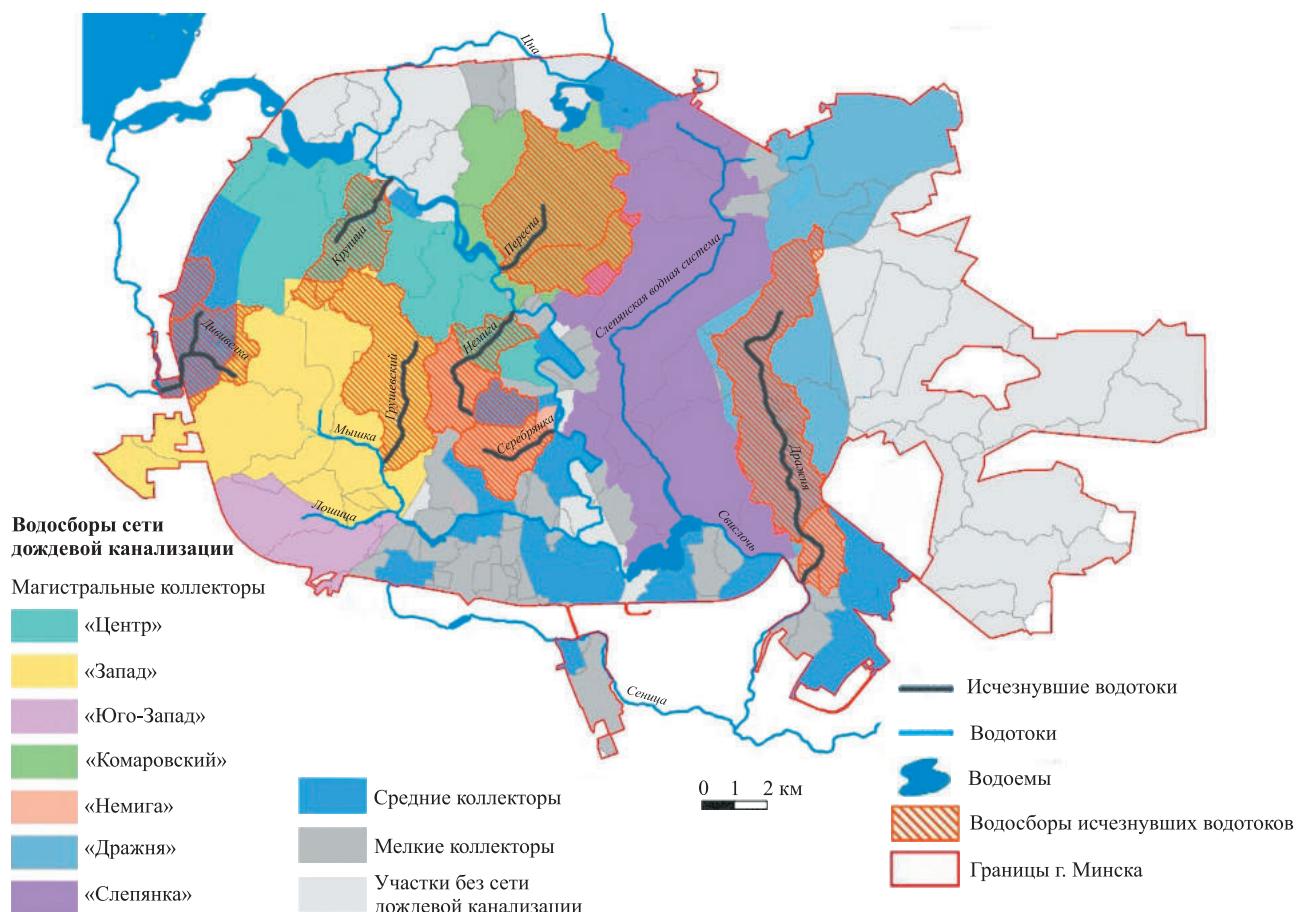


Рис. 4. Картосхема водосборов исчезнувших водотоков на территории г. Минска

Fig. 4. Schematic map of the disappeared watercourses catchments on the territory of Minsk

2. Фрагментация естественных водосборов вследствие создания сети мелких коллекторов с самостоятельными выпусками в водоток (см. рис. 3). Большинство этих выпусков приурочены к р. Свисочи в центральной части города и к р. Лошице в микрорайонах Курасовщина, Лошица, Минск-Мир и Серова. Доля площади таких водосборов составляет 18,9 %.

3. Укрупнение водосборов магистральных коллекторов по сравнению с исходными водосборами водотоков за счет присоединения части стока смежных водосборов. Данная ситуация характерна для коллекторов дождевой канализации «Комаровский», «Запад», «Немига» и «Дражня» (рис. 5).

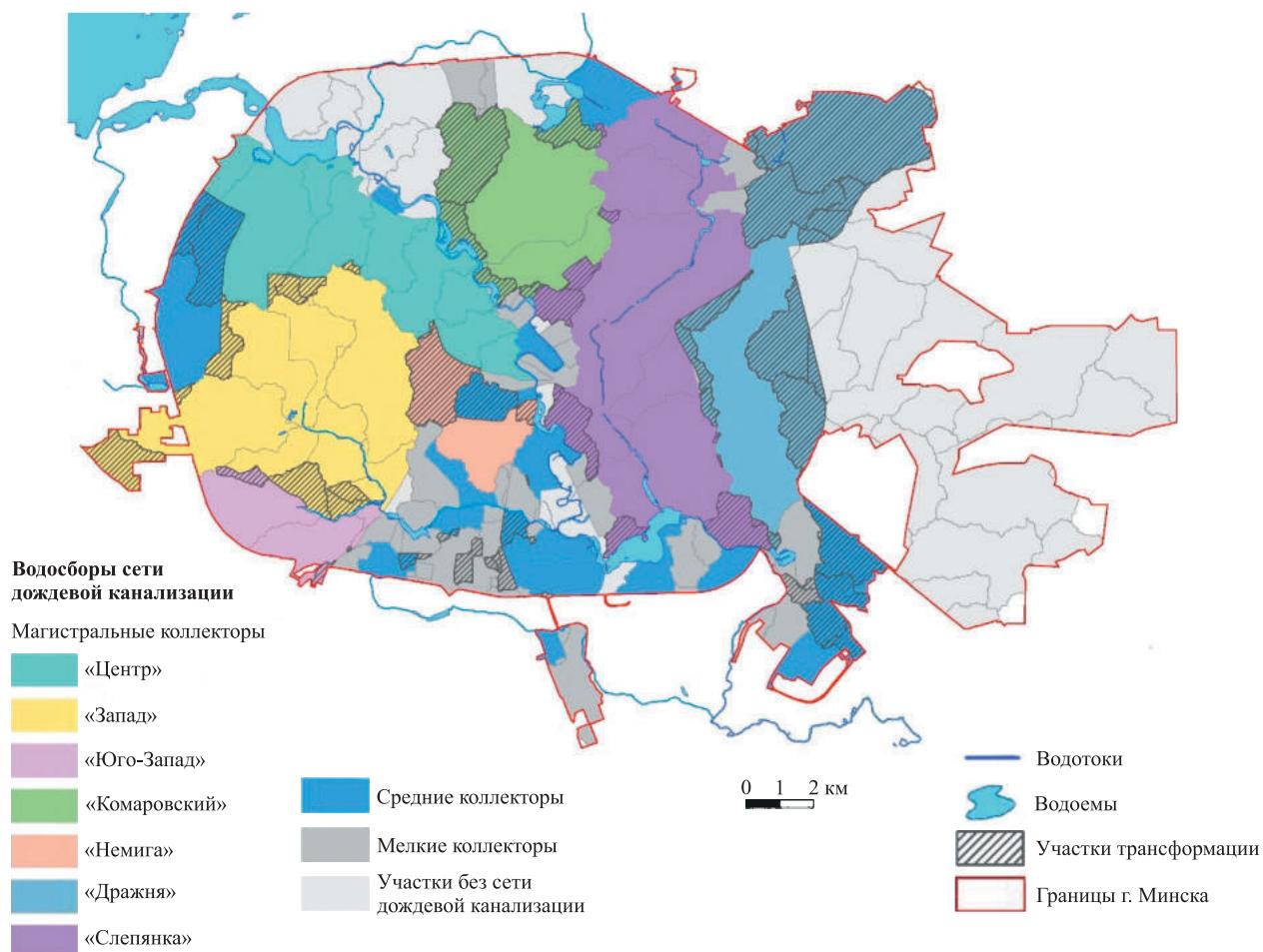


Рис. 5. Картосхема участков водосборов, где произошла переброска поверхностного стока из одного водосбора в другой, на территории г. Минска

Fig. 5. Schematic map of the catchment parts where urban runoff was transferred from one catchment to another on the territory of Minsk

4. Формирование водосборов магистральных коллекторов меньшей площади относительно площади исходных водотоков за счет фрагментации и отведения части стока в другие коллекторы. Такая ситуация наблюдается для коллекторов дождевой канализации «Центр», «Юго-Запад» и «Слепянка» (см. рис. 5).

Доля территорий, водосборная принадлежность которых изменилась из-за антропогенной трансформации и перешла к другому водотоку, в пределах г. Минска составила 17,9 % (59,3 км²).

Заключение

Таким образом, выполненная с применением гидрологического моделирования в ГИС оценка трансформации пространственной структуры естественных водосборов на территории г. Минска позволила сделать следующие выводы.

Несмотря на то что в настоящее время на 75,0 % территории города водотоки канализированы, водосборы системы дождевой канализации для отвода поверхностного стока наследуют черты водосборов естественной гидрографической сети.

Использование гидрологически корректной ЦМР при дальнейшей обработке дает возможность выделить локальные водосборы. Их агрегация позволяет восстановить структуру естественных водосборов, которую можно принять за точку отсчета для оценки антропогенной трансформации.

Анализ данных по формированию коллекторной сети дождевой канализации для отвода поверхностного стока дал возможность провести корректировку границ, получить модель современной структуры водосборов города и выявить участки их пространственной трансформации.

По результатам исследования на территории г. Минска выделены четыре направления трансформации структуры водосборов. Первое направление связано с исчезновением естественного водотока и переходом функции по отводу поверхностного стока к коллекторной сети (доля площади таких водосборов составляет 18,4 %). Второе направление обусловлено фрагментацией водосборов центральной части города вследствие создания сети мелких коллекторов с самостоятельными выпусками в водоток (18,9 % от площади города). Третье направление сопряжено с укрупнением водосборов магистральных коллекторов по сравнению с водосборами исходных водотоков за счет присоединения части стока смежных водосборов. Четвертое направление связано с уменьшением площади водосборов магистральных коллекторов относительно площади исходных водотоков в результате фрагментации и отведения части стока в другие коллекторы. Доля территорий города, изменивших водосборную принадлежность, составляет 17,9 % (59,3 км²).

Библиографические ссылки

1. Алексеева ТИ, Белоконь ЛС, Година ЕЗ, редакторы. *Урбэкология*. Москва: Наука; 1990. 240 с. (Современные проблемы биосфера).
2. Курбатова АС. *Ландшафтно-экологические основы формирования градостроительных структур*. Башкин ВН, редактор. Москва: Маджента; 2004. 400 с.
3. Хомич ВС, Какарека СВ, Кухарчик ТИ, Кравчук ЛА, Струк МИ, Кадацкая ОВ и др. *Городская среда: геоэкологические аспекты*. Минск: Беларусская наука; 2013. 301 с.
4. Овчарова ЕП. *Эколого-геохимическая оценка поверхностного стока с городской территории (на примере г. Минска)* [диссертация]. Минск: [б. и.]; 2006. 174 с.
5. Кадацкая ОВ, Санец ЕВ, Овчарова ЕП. Гидографическая сеть урбанизированных территорий как элемент формирования природного каркаса города. В: Витченко АН, Марцинкевич ГИ, Счастная ИИ, Воробьев ДС, редакторы. *Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии. Материалы VI Международной научной конференции (к 110-летию со дня рождения профессора В. А. Дементьева); 13–16 ноября 2018 г.*; Минск, Беларусь. Минск: Белорусский государственный университет; 2018. с. 194–196.
6. Овчарова ЕП, Санец ЕВ, Бокая ГМ. Малые водные объекты г. Минска: гидрохимическая трансформация и эколого-рекреационная значимость. В: Лукашёв ОВ, Зуй ВИ, Санько АФ, Литвинюк ГИ, Творонович-Севрук ДЛ, Силицкая ОВ, редакторы. *Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий. Материалы II Международной научной конференции; 16 февраля 2021 г.*; Минск, Беларусь. Минск: Белорусский государственный университет; 2021. с. 258–262.
7. Овчарова ЕП. Этапы формирования водохозяйственной геотехсистемы крупного города (на примере г. Минска). В: Ледащева ТН, Редина ММ, Станис ЕВ, Парахина ЕА, редакторы. *Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сборник трудов XXV Международной научно-практической конференции; 26–28 апреля 2024 г.*; Москва, Россия. Том 2. Москва: Российский университет дружбы народов; 2024. с. 318–322.
8. Пьянков СВ, Шихов АН. *Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2017. 148 с.
9. Курлович ДМ, Гриб СВ, Ковальчик НВ, Иванов ДВ. Использование ГИС-моделирования для оценки гидрологических процессов. *Вестник БГУ. Серия 2. Химия. Биология. География*. 2013;2:75–80. EDN: STENMD.
10. Борщ СВ, Самсонов ТЕ, Симонов ЮА, Львовская ЕА. Визуализация гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек средствами ГИС-технологий. *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2013;349:47–62. EDN: RDJAJB.
11. Куракина НИ, Ковчик ВС. Геоинформационная система моделирования гидрологических процессов подтопления территории. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2020;5:66–73. EDN: YNOHJY.
12. Клебанович НВ, Киндеев АЛ, Сазонов АА. Обоснование уточнения элементарных бассейнов методом геоинформационного моделирования (на примере р. Синюхи). В: Кольмакова ЕГ, Гагина НВ, Гледко ЮА, Карпиченко АА, Лукашёв ОВ, Матюшевская ЕВ и др., редакторы. *Материалы I Белорусского географического конгресса: к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества; 8–13 апреля 2024 г.*; Минск, Беларусь. Часть 1, Современные проблемы гидрометеорологии. Минск: Белорусский государственный университет; 2024. с. 240–244.
13. Kaur R, Gupta K. Blue-green infrastructure (BGI) network in urban areas for sustainable storm water management: a geospatial approach. *City and Environment Interactions*. 2022;16:100087. DOI: 10.1016/j.cacint.2022.100087.
14. Васильева НВ. Антропогенные изменения гидрографической сети в Великом Новгороде. *Общество. Среда. Развитие (Terra Humana)*. 2011;1:215–222. EDN: NTLVLT.

15. Яшков ИА, Иванов АВ, Шешнёв АС. Анализ пространственно-временных изменений городской естественной и искусственной дренажных сетей по серии карт (на примере Саратова). В: Тикунов ВС, редактор. *ИнтерКарто/ИнтерГИС-14. Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Материалы международной конференции; 24 июня – 1 июля 2008 г.; Саратов – Урумчи, Россия – Китай. Том 1.* Саратов: [б. и.]; 2008. с. 204–208.

16. Савич-Шемет ОГ, Томина НМ, Антух ЮП. Оценка антропогенной преобразованности водосборов малых рек г. Минска. В: Карабанов АК, Бамбалов НН, Березовский НИ, Бровка ГП, Гаврильчик АП, Волчек АА и др., редакторы. *Природопользование. Выпуск 18.* Минск: Институт природопользования НАН Беларуси; 2010. с. 74–80.

17. Радчикова ЕС. Исследование истории трансформации гидрографической сети урбанизированных территорий на примере г. Минска. *Российский журнал прикладной экологии.* 2017;1:44–49. EDN: YOCYVJ.

Получена 05.01.2025 / исправлена 03.03.2025 / принята 06.03.2025.
Received 05.01.2025 / revised 03.03.2025 / accepted 06.03.2025.

УДК 528.94:556.535.2(282.247.322):004

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ В ГИС «ПАНОРАМА» НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА р. ПРИПЯТИ

А. П. ЗАЙЦЕВА¹⁾, Н. А. ШЕСТАКОВ¹⁾, А. А. ТОПАЗ¹⁾, А. Б. КАФТАНЧИКОВА¹⁾

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

Аннотация. Представлены методика и результаты картографического моделирования зон затопления участка долины р. Припяти вблизи г. Петрикова в ГИС «Панорама» на основе создания цифровых моделей рельефа. Построение цифровых моделей рельефа выполнено двумя методами: по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 и данным дистанционного зондирования Земли, полученным в рамках международного исследовательского проекта «Радиолокационная топографическая миссия шаттла» (*Shuttle radar topography mission*, SRTM). С использованием инструментов ГИС «Панорама» (версия 14) осуществлено моделирование зон затопления методом створов в пределах исследуемой территории. В результате картографического моделирования получены теоретические модели зон затопления при условии подъема уровня воды в р. Припяти на 3 и 6 м. Дополнительно рассчитаны площади зон вероятного затопления при подъеме уровня воды на 3; 4; 5; 6; 7; 8 и 9 м. Проведен сравнительный анализ цифровых моделей рельефа, построенных по данным топографических карт и радиовысотным данным SRTM, а также результатов картографического моделирования зон затопления на основе этих цифровых моделей рельефа. Результаты моделирования позволили определить границы возможного затопления в пределах исследуемого участка долины р. Припяти в случае возникновения опасной гидрологической обстановки, вызванной кратковременным (паводки) или долгосрочным (половодье) подъемом уровня воды в реке.

Ключевые слова: зона затопления; ГИС «Панорама»; картографическое моделирование; топографические карты; данные дистанционного зондирования Земли; SRTM; цифровая модель рельефа; ЦМР.

Образец цитирования:

Зайцева АП, Шестаков НА, Топаз АА, Кафтанчикова АБ. Картографическое моделирование зон затопления в ГИС «Панорама» на примере участка р. Припяти. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;1:35–46.

EDN: PZBVZU

For citation:

Zaitseva HP, Shastakou MA, Tapaz AA, Kaftanchykava HB. Cartographic modelling of flood zones in GIS «Panorama» on the example of a section of the Pripyat River. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;1: 35–46. Russian.
EDN: PZBVZU

Авторы:

Анна Павловна Зайцева – преподаватель-стажер кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Никита Алексеевич Шестаков – преподаватель кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Антонина Анатольевна Топаз – кандидат географических наук, доцент; заведующий кафедрой геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Анна Борисовна Кафтанчикова – старший преподаватель кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Hanna P. Zaitseva, trainee lecturer at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.

zaiceva65297@gmail.com

Mikita A. Shastakou, lecturer at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.

shastakou23@gmail.com

Antonina A. Tapaz, PhD (geography), docent; head of the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.

topaz_antonina@mail.ru

Hanna B. Kaftanchykava, senior lecturer at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.

abkaft@rambler.ru



CARTOGRAPHIC MODELLING OF FLOOD ZONES IN GIS «PANORAMA» ON THE EXAMPLE OF A SECTION OF THE PРИПЯТ RIVER

H. P. ZAITSEVA^a, M. A. SHASTAKOU^a, A. A. TAPAZ^a, H. B. KAFTANCHYKAVA^a

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

Corresponding author: H. P. Zaitseva (zaiceva65297@gmail.com)

Abstract. The article presents the methodology and results of cartographic modelling of flood zones of the Pripyat River valley section near Petrikov in GIS «Panorama» based on the creation of digital elevation models. The digital elevation models were created using two methods: based on 1 : 100 000 scale topographic maps and Earth remote sensing data obtained within the framework of the international research project «Shuttle radar topography mission» (SRTM). Flood zones were modelled using the cross-section method within the study area using the tools of GIS «Panorama» (version 14). As a result of cartographic modelling, theoretical models of flood zones were obtained under the condition of a water level rise in the Pripyat River by 3 and 6 m. Additionally, the areas of probable flood zones were calculated with a water level rise of 3; 4; 5; 6; 7; 8 and 9 m. A comparative analysis of digital elevation models created using topographic maps and SRTM radio altitude data, and the results of cartographic modelling of flood zones based on these digital elevation models was conducted. The results of the modelling made it possible to determine the boundaries of probable flooding within the study section of the Pripyat River valley in the event of a dangerous hydrological situation caused by a short-term (floods) or long-term (flood) rise in the water level in the river.

Keywords: flood zone; GIS «Panorama»; cartographic modelling; topographic maps; Earth remote sensing data; SRTM; digital elevation model; DEM.

Введение

Наводнение – это значительное затопление местности в результате подъема уровня воды в реке, озере или море. Наиболее распространенными причинами наводнений являются снеготаяние, продолжительные дожди и ливни, заторы и зажоры льда на реках, прорывы дамб и плотин. На территории Беларуси наводнения обычно связывают с гидрологическим режимом рек: в период весеннего половодья фиксируют долгосрочное, а в период паводков – кратковременное повышение уровня воды. В начале весны на крупных реках могут происходить заторы (перегораживание русла многослойным скоплением льда во время ледохода), что в некоторых случаях также приводит к затоплению территорий, расположенных выше по течению.

Актуальность исследования обусловлена ежегодно наблюдающимися в Беларуси половодьями и паводками на крупных реках и, соответственно, необходимостью совершенствования и автоматизации систем мониторинга чрезвычайных ситуаций в целях своевременного прогнозирования и, как следствие, сокращения негативных последствий затоплений и наносимого ими ущерба для населения и хозяйственной деятельности.

Эффективным инструментарием для решения подобного рода задач обладают геоинформационные системы (ГИС) – системы, реализованные в виде аппаратно-программных многофункциональных комплексов, которые обеспечивают сбор, хранение, обработку, отображение и распространение пространственно координированных данных, интеграцию информации и знаний о территории (географическом объекте). В отличие от сложных методик математического моделирования современное программное ГИС-обеспечение позволяет выполнять компьютерное моделирование зон затопления достаточно быстро, наглядно и эффективно.

Целью работы является изучение возможностей картографического моделирования зон затопления прирусловых территорий на основе применения цифровых моделей рельефа (ЦМР) в ГИС «Панорама» на примере участка долины р. Припяти.

Объектом исследования выступают зоны затопления (в том числе вероятного) – участки местности, затапливаемые в результате поднятия уровня воды в реке (водоеме).

Материалы и методы исследования

Для прогнозирования и зонирования областей подтопления, подготовки к этому населения необходимо иметь не только исторические и метеорологические данные, но и оперативную информацию о зонах затопления, продолжительности паводка или половодья, геометрии русла реки, местах образования

заторов и наносов и т. п. В этом отношении методы дистанционного зондирования обладают явными преимуществами перед полевыми исследованиями, которые требуют больших затрат времени и имеют ряд дополнительных ограничений¹.

В Беларуси подтопление территорий чаще всего происходит во время разлива крупных рек в период весеннего половодья. Наиболее ярко выражены разливы рек весной в Гомельской (бассейны рек Припять, Днепр, Сож), Могилёвской (бассейны рек Днепр, Сож) и Гродненской (бассейн р. Неман) областях. В частности, слаборасчлененный водно-ледниковый, озерно-аллювиальный и аллювиальный рельеф территории Полесья способствует выходу р. Припяти из берегов на значительные площади при повышении уровня воды в реке. Помимо прочего, в районе г. Турова наблюдается сужение поймы р. Припяти до 6–8 км, а в районе г. Мозыря – до 1,5–2,0 км. На этом участке в р. Припять впадают такие крупные притоки, как Горынь, Случь, Уборть, Птичъ² [1]. Все вышеизложенное дает основание выбрать для исследования участок долины р. Припяти в районе г. Петрикова (рис. 1).



Рис. 1. Территория моделирования зон затопления

Fig. 1. The territory of flood zones modelling

Для реализации практической части исследования взят участок р. Припяти, ограниченный створами в районе населенных пунктов Переров (на западе) и Жаховичи (на востоке). В пределах выделенного участка находится гидропост Петриков.

Площадь исследуемой территории составляет 2537,8 км² (253 780 га). Крайние точки участка имеют следующие географические координаты: 52° 20' с. ш., 28° 00' в. д. – северо-западная точка; 52° 20' с. ш., 29° 00' в. д. – северо-восточная точка; 52° 00' с. ш., 29° 00' в. д. – юго-восточная точка; 52° 00' с. ш., 28° 00' в. д. – юго-западная точка.

К настоящему времени накоплена достаточно обширная информация о водном режиме Полесья, позволяющая охарактеризовать его с учетом преобразования в процессе осушительной мелиорации. В водном режиме водотоков внутри года выделяются основные фазы – половодье, паводки и межень. Половодье ежегодно происходит весной в результате снеготаяния и выпадения дождей при снеготаянии. На р. Припяти оно обычно начинается в первой половине марта, в отдельные годы – в феврале или апреле. Продолжительность половодья составляет в среднем 3,0–3,5 мес.

Согласно данным Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (Белгидромет)³ в первом квартале 2024 г. мониторинг поверхностных вод в бассейне р. Припяти проводился в 33 пунктах наблюдений.

Паводковая ситуация на р. Припяти в течение первого квартала 2024 г. выглядела следующим образом: за январь в среднем по бассейну р. Припяти выпало 80,8 мм осадков, что составило 193 % от климатической нормы, за февраль – 64,5 мм осадков (159 %), за март – 32,3 мм осадков (72 %). В начале января на реках возобновились ледообразовательные процессы, в первой декаде почти повсеместно установился ледостав. В уровненном режиме рек в основном отмечался рост уровней воды до 34 см в сутки, в результате чего

¹Топаз А. А., Шестаков Н. А., Лис К. Я. Картографирование зон затоплений по данным дистанционного зондирования Земли : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Цифровая обработка космических снимков» для студентов специальностей 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)». Минск : БГУ, 2024. 47 с.

²Блакітная книга Беларусі (водныя аб'екты Беларусі) : энцыклапедыя / рэдкал.: Н. А. Дзісько [і інш.] ; маст. В. Г. Загародні. Мінск : Беларус. энцыкл. імя Петруся Броўкі, 1994. 415 с.

³Сеть мониторинга поверхностных вод. Припять // Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды : сайт. Минск, 2008–2025. URL: <https://rad.org.by/articles/voda/observation-points-voda/basseyн.pripyati.html> (дата обращения: 25.02.2025).

на притоках р. Припяти (р. Случь у аг. Ленин и р. Птич у д. Першая Слободка) уровни воды превысили опасные высокие отметки. На большинстве рек бассейна р. Припяти вода находилась в пойме. Таким образом, водность р. Припяти в первом квартале 2024 г. была значительно выше нормы.

По данным Гомельского областного управления МЧС Республики Беларусь, по состоянию на 22 марта 2024 г. в Гомельской области талыми и паводковыми водами были подтоплены 130 жилых домов, 25 подвалов жилых домов, 450 подворий, 211 хозяйственных построек, 34 участка дорог и 135 иных зданий и сооружений. Угроза неблагоприятных последствий затоплений для населения и хозяйственной деятельности обуславливает необходимость и актуальность выбора оперативных и эффективных методов решения задач.

Исследования по выявлению, расчету и моделированию зон затопления в бассейне р. Припяти и на территории Полесья в целом проводились многими авторами из Беларуси (А. А. Волчек, Т. А. Шелест, Д. А. Костюк, Д. О. Петров и др. [1; 2]). В ряде работ расчеты зон затопления были основаны на использовании оцифрованных профилей рельефа и матриц высот совместно с применением математических алгоритмов (моделей) распределения воды, однако не всегда интерпретировались в виде картографических данных.

Основные этапы исследования. Реализация исследования предусматривает последовательное выполнение следующих этапов.

Этап 1: выбор исходных данных.

Этап 2: создание проекта в ГИС «Панорама».

Этап 3: интеграция исходных данных в ГИС-проект.

Этап 4: построение ЦМР по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 и данным дистанционного зондирования Земли, полученным в рамках международного исследовательского проекта «Радиолокационная топографическая миссия шаттла» (*Shuttle radar topography mission, SRTM*).

Этап 5: сравнительный анализ результатов построения ЦМР и оценка их точности.

Этап 6: картографическое моделирование зон затопления на основе ЦМР, полученных по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 и данным SRTM.

Этап 7: сравнительный анализ результатов моделирования и оценка их точности.

Применение ГИС-технологий необходимо уже на этапе подготовки исходных данных, а также непосредственно при расчете ЦМР, моделировании зон затопления, анализе результатов прогнозирования развития гидрологической обстановки на территории региона для определения потенциальных социальных и экономических последствий наводнений [3].

В качестве исходных данных для построения графической и картографической информации, как правило, используются данные многолетних наблюдений за уровнем воды в реке, фактические и спрогнозированные расходы воды, а также подверженность пойменных территорий неблагоприятным и опасным гидрологическим явлениям [4; 5]. В таком случае картографическое моделирование является не только средством отображения процессов и явлений на географической карте, но и объективным критерием проверки данных, методом, генерирующим новую информацию об объектах окружающей действительности в виде информационных моделей [6; 7].

Построение ЦМР. Картографическое моделирование зон затопления и расчет основных морфометрических показателей временно затопленных участков в среде ГИС осуществляются прежде всего исходя из данных о рельефе местности и гидрологической обстановке (абсолютные отметки высот и водной поверхности реки): разность отметки водной поверхности и отметок высот точек местности берется за основу при определении зоны распространения разлива воды в период паводка или половодья. Отметки уровня воды в реке могут быть взяты из данных гидрометеорологических наблюдений (по гидропосту), а также из картографического материала, имеющегося для объекта исследования. Векторные топографические карты содержат сведения и о рельефе, и о среднем уровне воды в реке на определенную дату. Электронный формат карты позволяет оперативно обновлять информацию о семантике и метрике объектов на карте с учетом произошедших (или предполагаемых) изменений гидрологических условий местности.

Главная идея, на основе которой, как правило, реализуется моделирование паводкоопасных ситуаций, заключается в построении пересечения поверхности рельефа с водным зеркалом. Для этих целей используется ЦМР, построенная по горизонталям и отметкам высот на топографической карте, совместно с моделью секущей плоскости водной поверхности, построенной на основе результатов моделирования уровней воды.

Согласно определению Геологической службы США ЦМР, или матрица высот, – это цифровое картографическое представление высот поверхности Земли в узлах регулярной сетки в направлениях x и y , вертикальное значение которого привязано в пространстве к общему вертикальному датуму.

Технические инструкции ГИС «Панорама», с помощью которой выполнялись расчеты, определяют матрицу высот как трехмерную растровую модель местности, получаемую путем преобразования исходных векторных данных о местности в растровый вид и дальнейшего дополнения растровой модели

методом интерполяции. Матрица высот рельефа местности строится на основе информации об объектах на карте, имеющих абсолютную высоту или 3D-метрику, содержит абсолютные высоты рельефа местности либо сумму абсолютных и относительных высот объектов.

Стоит отметить, что ЦМР может применяться в качестве элемента географической основы при составлении общегеографических карт. С использованием данной модели производятся разнообразные расчеты и преобразования, выполняется построение производных морфометрических карт в автоматическом режиме, осуществляется создание гидрографических моделей. В ГИС «Панорама» ЦМР применяется в таких задачах анализа рельефа, как построение профилей и зон видимости, вычисление длины и площади объектов с учетом рельефа, моделирование зон затопления, определение направлений склонов, формирование трехмерной карты местности. Кроме того, ЦМР позволяет оценить спектр высот (статистику поверхности) заданного участка местности, получить отмывку рельефа в виде растра.

Растровая ЦМР содержит достаточный объем данных для определения общего рисунка сети стока и водосборных бассейнов. При этом точность ЦМР зависит от качества и разрешения исходной информации.

В качестве исходной информации для построения ЦМР в первом случае в работе использовались векторные топографические карты масштаба 1 : 100 000. Исследуемая территория ограничена рамками карт номенклатуры N-35-141 и N-35-142. Данные векторные карты были загружены в ГИС «Панорама» (версия 14). Построение матрицы высот исследуемой территории выполнено с помощью инструмента создания матрицы. В окне настроек параметров инструмента при этом были указаны область вывода (весь район), метод построения поверхности (в данном случае средневзвешенная интерполяция по 8 направлениям) и размер элемента (50 м).

Полученная матрица высот представлена на рис. 2. Для наглядности может быть применено наложение на матрицу высот основных (или же всех) элементов содержания топографической карты масштаба 1 : 100 000 (рельеф, гидрография, растительность и грунты, дорожная сеть, населенные пункты и пр.) в пределах листов исходных топографических карт (рис. 3).

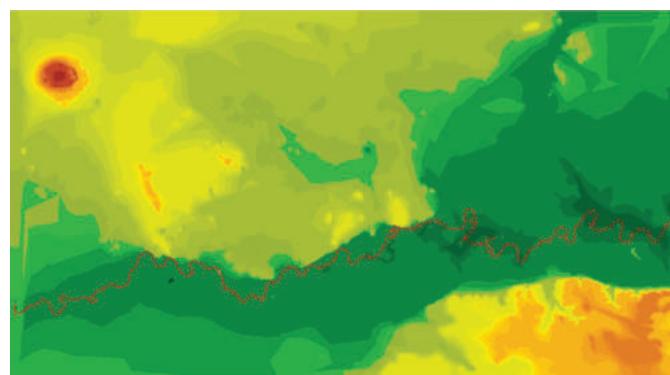


Рис. 2. Матрица высот, составленная по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 (красным цветом выделено русло р. Припяти)

Fig. 2. The terrain matrix based on topographic map data at a scale of 1 : 100 000 (the Pripyat riverbed is highlighted in red colour)

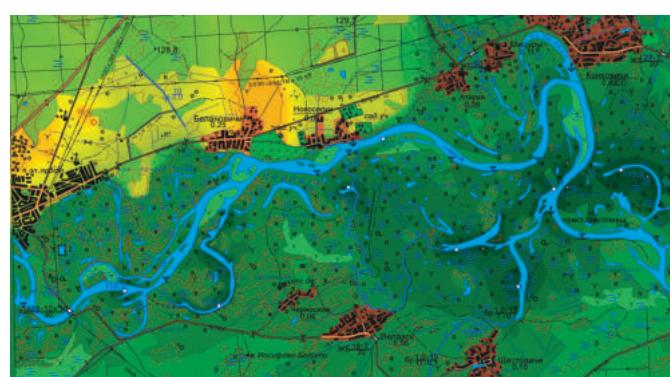


Рис. 3. Совмещение слоев векторной топографической карты и растра ЦМР

Fig. 3. Combining layers of the vector topographic map and the digital elevation model (DEM) raster

В качестве альтернативных данных о рельефе для построения ЦМР во втором случае в работе использовались радиовысотные данные SRTM, полученные в результате радиолокационных съемок Земли в 2000 г. с помощью радаров SIR-C и X-SAR. Общедоступными являются значения высот в углах ячейки размером $3 \times 3''$ [8–10]. Точность высот заявлена не ниже 16 м, однако, по оценкам исследований [11; 12], высоты ЦМР, построенных по данным SRTM, имеют ошибку, которая для равнинной местности составляет в среднем 2,9 м, а для холмистой – 5,4 м. Необходимо отметить, что отклонение от данных топографических карт не остается постоянным в пространстве. Такие погрешности возникли ввиду определения абсолютных высот любых относительно твердых поверхностей, в том числе поверхности крон деревьев. Согласно работе [13] применение матриц высот, полученных по данным SRTM, эффективно в случае отсутствия крупномасштабных топографических карт (от 1 : 10 000 до 1 : 50 000) при расчетах и картографировании границ и глубин зон затопления при любых заданных уровнях воды в реке. Использование этих матриц допустимо в условиях территории, не покрытой густой древесной и кустарниковой растительностью, при незначительной высоте снегового покрова, отсутствии старичных озер и оврагов в удалении на несколько десятков метров от пойменных бровок и крутых уступов надпойменных террас.

Радиовысотные данные о рельефе являются хорошей альтернативой данным, полученным традиционными методами (в особенности данным о рельефе территории, снятым с топографических карт). Кроме того, согласно исследованиям [14; 15] ЦМР, построенные по данным SRTM, схожи с ЦМР, построенными по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000. Стандартные отклонения в этом случае составляют 27 м, а в случае использования топографических карт масштабов 1 : 200 000 и 1 : 50 000 равны 43 и 30 м соответственно [16]. В целом плоскоравнинный гравистый рельеф речных пойм относительно удовлетворительно отражают лишь крупномасштабные карты (1 : 10 000 и крупнее) с высотой сечения рельефа 1–2 м, но такие карты не являются общедоступными. По этой причине модели, построенные по данным SRTM, целесообразно применять в предварительных исследованиях при проектировании и поиске оптимальных вариантов детальных наземных инженерных изысканий в условиях плоскоравнинных безлесных территорий.

Следует учитывать, что ЦМР, используемая при определении гидрографических характеристик рек и их бассейнов, должна быть гидрологически корректной. Исходя из этого, в ЦМР должны отсутствовать фиктивные точки стока (фиктивные депрессии), а потоковые линии (talwegi) должны совпадать с исходными отрезками речной сети. Проведение гидрологической коррекции предполагает заполнение локальных понижений – небольших артефактных несуществующих замкнутых впадин на ЦМР, появление которых обычно связано с неточностью исходных данных. Локальные понижения или вершины представляют собой небольшие ошибки, возникающие из-за пространственного разрешения используемых данных или округления чисел до ближайшего целого значения [17]. В среде ГИС «Панорама» подобного рода недочеты могут быть исправлены программой при импорте матриц из файла формата GeoTIFF (при условии установки флашка напротив пункта «Вычислять значения высот в пустых элементах методом интерполяции»).

Точность построения ЦМР ограничена ввиду того, что модели высокой детальности, как и крупномасштабные карты, не являются доступными для широкого круга лиц.

Для построения матрицы рельефа данные SRTM необходимо импортировать в ГИС «Панорама». Исходная проекция данной матрицы (WGS-84) также требует преобразования к проекции используемых ранее топографических карт (рис. 4).

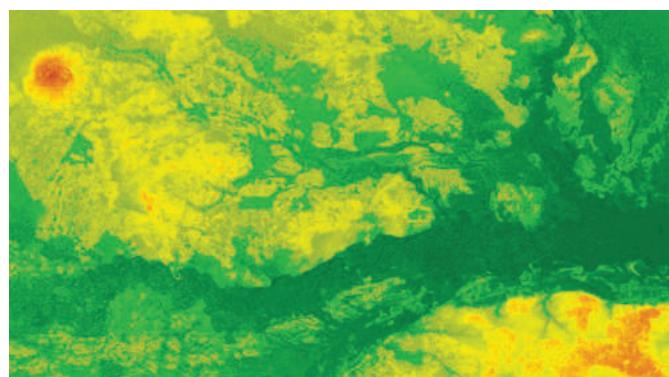


Рис. 4. Результат преобразования проекции матрицы рельефа по данным SRTM

Fig. 4. The result of transformation of elevation matrix projection from SRTM data

Сравнение результатов построения ЦМР. Полученная по данным SRTM матрица рельефа отличается большей детальностью, чем ЦМР, построенная по данным топографических карт, где ввиду значительной высоты сечения рельефа (20 м) поверхность интерполирована и отображена весьма обобщенно. В результате применения инструмента сравнение матриц получена карта, отражающая разность высот (модулей экстремумов) созданных ЦМР (рис. 5).

В ходе визуального анализа результатов сравнения матриц рельефа отмечено, что различия в высотах между ними являются незначительными и на большей части исследуемой территории (>70 %) составляют 1–5 м. Максимальная амплитуда высот на данном участке равна 13 м, что в два раза меньше, чем упомянутое ранее стандартное отклонение (27 м).

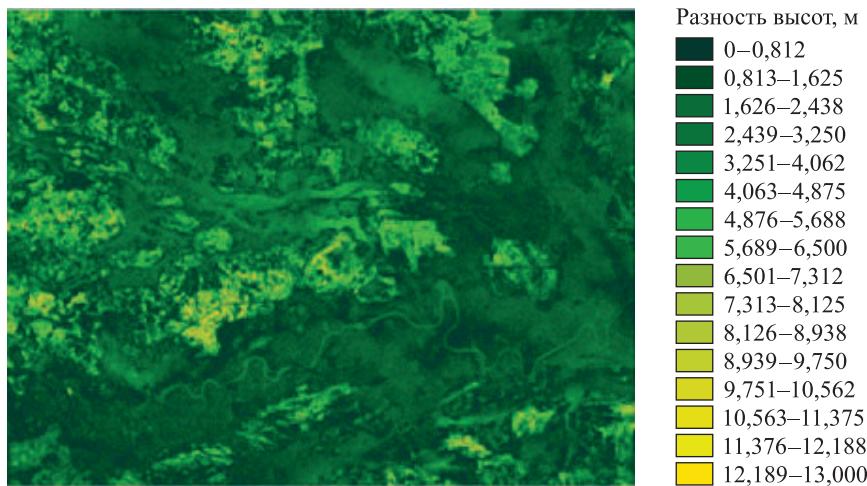


Рис. 5. Результат сравнения матриц, полученных по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 и данным SRTM

Fig. 5. The result of matrices comparison derived from 1 : 100 000 scale topographic maps and SRTM data

Картографическое моделирование зон затопления. При изучении местности в целях предварительной оценки природного риска для проектируемых и функционирующих инженерных сооружений, населенных пунктов, сельскохозяйственных земель, располагающихся в речных долинах, исходной информацией являются сведения о границах возможного затопления.

С помощью модуля «Прогноз ЧС» в ГИС «Панорама» смоделирован сценарий затопления участка долины р. Припяти по методу створов (инструмент расчет затопления методом створов). Для расчета моделей оператором вводятся следующие входные данные: метеорологические условия, координаты центра аварии, условия окружающей обстановки, а также сведения о рельефе местности в виде матриц высот (MTW). В окне настройки параметров инструмента необходимо выбрать векторный объект, указать уровень подъема воды, максимальную ширину зоны затопления и шаг расчета матрицы. Выходными данными являются расчетные показатели, полученные в результате моделирования, пространственные данные, пользовательские векторные карты в формате SIT, матрицы качеств (MTQ), содержащие результаты расчета поражающего фактора на местности.

В матрице качеств соответствующими весовыми коэффициентами заполняются те ячейки, координаты которых относятся к результатам расчета. Матрицы качеств и матрицы высот имеют единую структуру.

Полученная по описанной выше методике модель предназначена для оценки численных характеристик водонаполнения заданного бассейна при изменении уровня подъема воды, а также для получения графических документов, соответствующих рассчитанным численным характеристикам. При расчете зоны затопления используется информация о рельефе местности, следовательно, без матрицы высот в составе исходных данных его выполнение невозможно.

Для построения зоны затопления необходимо выбрать векторный площадный или линейный гидрографический объект на карте и указать точки, для которых задается уровень подъема воды. Первой указывается начальная точка подъема воды на берегу, второй – точка, задающая направление обхода берега, третьей – конечная точка подъема воды. На выбранном участке, где согласно сведениям Белгидромета в период половодья уровень воды в р. Припяти может подняться на 3 м, была построена соответствующая модель зоны затопления, а также спрогнозированы зоны вероятного затопления при подъеме уровня воды в реке на 6 м.

На основе матрицы высот, по которой выполняется моделирование, и значений превышения уровня воды в точках, ограничивающих исследуемый участок, программой определяется уклон местности (значения высот в точках участка выбираются из матрицы рельефа), формируются створы (отрезки, перпендикулярные осевым отрезкам русла реки), вычисляется уровень подъема воды для каждого створа, а затем производится радиально-секторная развертка участков земной поверхности между соседними створами, построение профилей рельефа по направлениям развертки и расчет пространственных координат граничных точек распространения волны пропуска по линиям развертки. В результате решаются две задачи: вычисляются координаты граничных точек зоны затопления и уровень подъема воды в каждой точке (в пределах зоны затопления). Все значения помещаются в матрицу качеств (глубин). При отображении на экране растровая составляющая матрицы глубин визуализирует зону затопления. Кроме получения матрицы глубин, предусмотрена возможность создания объекта, отображающего границы зоны затопления.

По завершении работы инструмента в отдельном окне представляются как исходные, так и рассчитанные данные (рис. 6).

Исходные данные		
Параметр	Значение	Размерность
Координаты первой точки	52,074543	° с. ш.
Координаты первой точки	27,998851	° в. д.
Координаты второй точки	52,136698	° с. ш.
Координаты второй точки	28,998184	° в. д.
Уровень подъема воды в первой точке	3	м
Уровень подъема воды во второй точке	3	м
Максимальная ширина зоны	10000	м
Шаг матрицы	50	м

Рассчитанные данные		
Параметр	Значение	Размерность
Список зон		
Название зоны	Зона возможного наводнения (паводка)	
Периметр зоны	691,687698	км
Площадь зоны	243,69408	кв. км
Название зоны	Зона возможного затопления	
Периметр зоны	501,719415	км
Площадь зоны	538,552638	кв. км

Рис. 6. Результаты расчета модели зоны затопления на р. Припять при превышении меженного уровня воды на 3 м на основе ЦМР, построенной по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000

Fig. 6. The results of the flood zone on the Pripyat River modelling if the low-water level rises by 3 m based on a DEM derived from 1 : 100 000 scale topographic maps

Посредством инструмента построение зон затоплений методом створов были смоделированы зоны затопления при повышении уровня воды в р. Припять на 3 и 6 м на основе ЦМР, построенных по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000 (рис. 7) и данным SRTM (рис. 8).

Результаты и их обсуждение

При сравнительном визуальном анализе результатов картографического моделирования (см. рис. 7 и 8) видны различия в построении зон затопления на основе ЦМР, полученных с использованием разных источников информации – топографических карт и данных SRTM. В первом случае из-за высокой степени обобщения рельефа, обусловленного масштабом карт, построение зон затопления осуществляется на основе ЦМР, созданной в результате интерполяции рельефа по горизонталям, проведенным через 20 м. Из этого следует получение весьма обобщенных зон затопления, построенных по окружностям соответствующего радиуса с центрами в точках линии тальвега долины реки. Использование такого подхода к построению ЦМР является целесообразным только при моделировании зон затопления на мелкомасштабном уровне (например, 1 : 200 000, 1 : 500 000, 1 : 1 000 000). Картографирование зон затопления на крупно- и среднемасштабном уровнях требует более подробных данных о рельефе мест-

ности. Как отмечалось ранее, доступ к топографическим картам крупного масштаба ограничен, в связи с чем возникает необходимость в поиске альтернативных источников информации (данные SRTM).

Сравнительный анализ результатов построения ЦМР показал, что даже в случае получения незначительной разницы в высотах рельефа при использовании инструмента сравнение матриц результаты моделирования зон затопления имеют существенные различия.

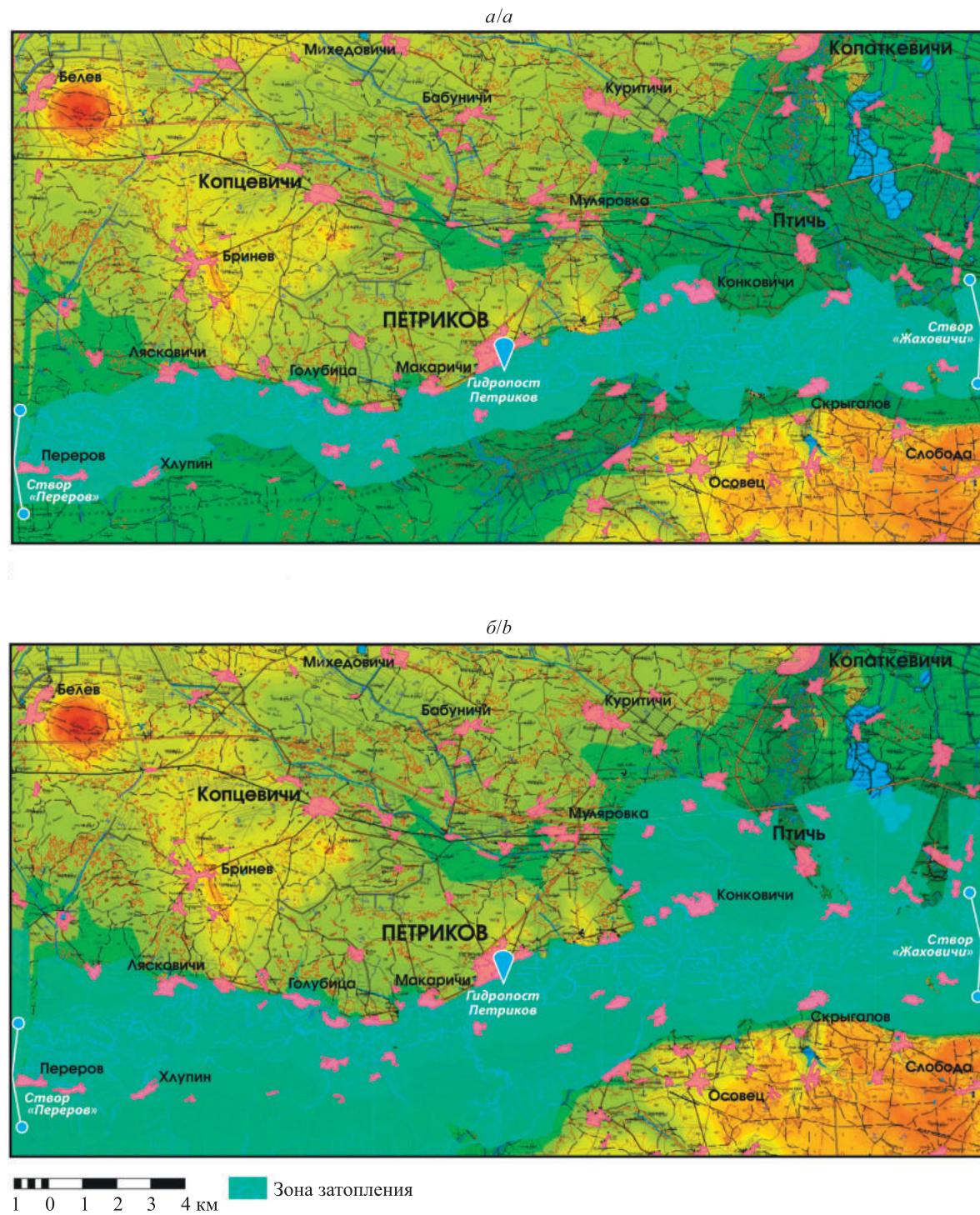
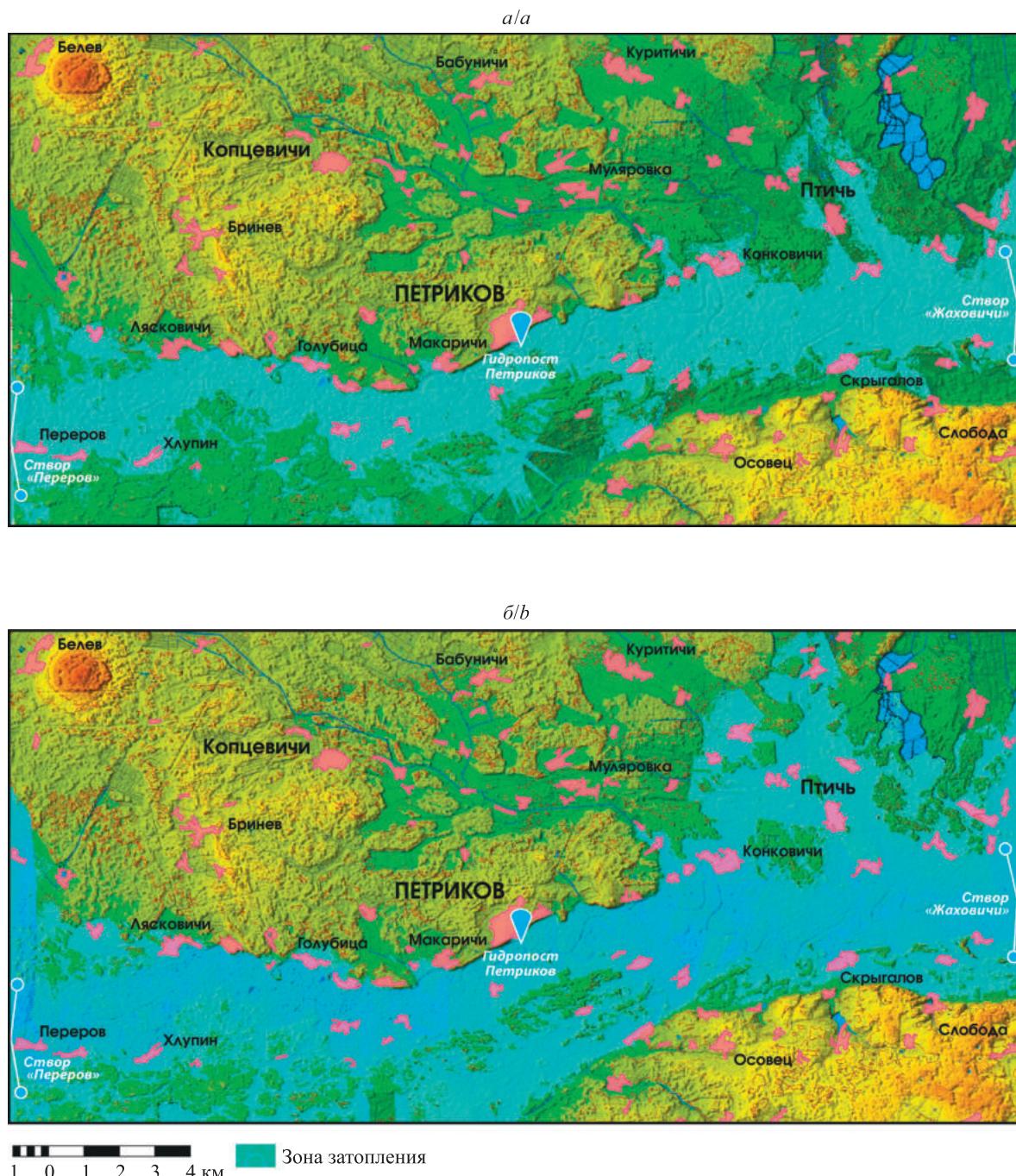


Рис. 7. Моделирование зон вероятного затопления на р. Припять при превышении меженного уровня воды на 3 м (а) и 6 м (б) с использованием ЦМР, построенной по данным топографических карт масштаба 1 : 100 000

Fig. 7. Modelling of probable flood zones on the Pripyat River when the low-water level exceeds 3 m (a) and 6 m (b) using DEM based on 1 : 100 000 scale topographic maps



Rис. 8. Моделирование зон вероятного затопления на р. Припять при превышении меженного уровня воды на 3 м (а) и 6 м (б) с использованием ЦМР, построенной по данным SRTM

Fig. 8. Modelling of probable flood zones on the Pripyat River when the low-water level exceeds 3 m (a) and 6 m (b) using DEM based on SRTM data

По данным Белгидромета, максимальный уровень воды в р. Припять в 2024 г. достиг 811 см в период с 28 февраля по 2 марта. Абсолютный максимум за 2021–2024 гг. составил 878 см. Опасным уровнем воды на гидропосту Петриков считается отметка 760 см.

По результатам моделирования зон вероятного затопления в ГИС «Панорама» с помощью инструмента построение зон затоплений методом створов были проведены расчеты площади зон вероятного затопления при поднятии уровня воды на 3 и 6 м. Дополнительно рассчитаны значения площади в случае поднятия уровня воды в р. Припять на 4; 5; 7; 8 и 9 м (см. таблицу).

Расчет площади зоны вероятного затопления на р. Припять
с учетом изменения уровня водыCalculation of the area of the probable flood zone on the Pripyat River
taking into account changes in the water level

Уровень подъема воды, м	Площадь зоны вероятного затопления, км ² (га)	Число населенных пунктов, попадающих в расчетные зоны затопления
3	339,77 (33 977)	27
4	500,81 (50 081)	31
5	528,95 (52 895)	36
6	697,46 (69 746)	46
7	843,46 (84 346)	48
8	945,25 (94 525)	50
9	1038,26 (103 826)	51

Кроме того, в таблице приведено количество населенных пунктов, входящих в зону вероятного затопления при заданном уровне подъема воды. Всего на территории исследования насчитывается 147 населенных пунктов (преимущественно сельских), из них 65 населенных пунктов имеют численность населения менее 100 человек, 63 населенных пункта – от 100 до 500 человек, 15 населенных пунктов – от 500 до 1000 человек, 4 населенных пункта (г. Петриков, аг. Птич, п. Копцевичи и г. п. Копаткевичи) – более 1000 человек.

Зоны затопления, построенные на основе ЦМР, полученных по данным SRTM, являются более подробными и правдоподобными, что связано с разрешением матрицы высот (около 30 м/пк). Однако необходимо учитывать, что в некоторых случаях разрешение данных может быть чуть хуже из-за различных факторов (сильно расчлененный рельеф местности, ошибки и погрешности в исходной информации). В ситуации с пологим рельефом указанные факторы будут иметь весьма малое значение.

Таким образом, приведенные выше результаты подтверждают пригодность используемых данных для моделирования зон затопления. Однако для проведения более детальных исследований следует использовать картографические источники масштаба 1 : 50 000 и крупнее (при наличии доступа к таким картам).

Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Для моделирования зон затопления могут быть использованы как топографические карты, так и радиовысотные данные SRTM. При этом точность построения ЦМР зависит от детальности и подробности исходных данных: масштаба (для топографических карт), который, в свою очередь, влияет на высоту сечения рельефа, изображаемого на картах; разрешения раstra (для данных SRTM). Выбор источника пространственных данных определяется целями и задачами моделирования, а также требованиями, предъявляемыми к точности получаемых моделей. Исходя из результатов построения ЦМР, устанавливается необходимость в гидрологической коррекции.

2. Инструментарий ГИС «Панорама» (версия 14) позволяет достаточно эффективно и в полной мере производить моделирование зон затопления (в том числе вероятного), а также рассчитывать их площадь в зависимости от уровня подъема воды в реке.

3. Полученный картографический материал (результаты моделирования зон затопления) может применяться при прогнозировании и оценке потенциального риска наступления чрезвычайной ситуации в районах с высокой угрозой подтоплений при условии комплексного использования результатов картографического моделирования и гидрометеорологической информации как в кратковременный (паводки), так и в долгосрочный (половодье) период, а также при разработке наиболее рациональных подходов к защите населения, что позволит своевременно предпринять меры по снижению материального и социального ущерба от последствий затоплений.

В заключение стоит отметить, что картографическое моделирование зон затопления может проводиться при недостатке сведений или отсутствии гидрометрических наблюдений для территорий с неблагоприятной паводковой обстановкой, что в дальнейшем дает возможность оценивать риски ущерба населению, инфраструктуре, промышленным и социально-культурным объектам, в том числе мелиорируемым сельскохозяйственным землям и их инфраструктуре, а также разрабатывать наиболее рациональные способы защиты от последствий чрезвычайных ситуаций на водных объектах и гидротехнических сооружениях.

Библиографические ссылки

1. Волчек АА, Шелест ТА. *Паводки на реках Беларуси*. Брест: Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина; 2016. 199 с.
2. Волчек АА, Костюк ДА, Петров ДО. К вопросу расчета затопления для системы мониторинга и прогнозирования паводка. В: Пойта ПС, Волчек АА, Валуев ВЕ, Басов СВ, Водчиц НН, Житенев БН и др., редакторы. *Научно-технические проблемы водохозяйственного и энергетического комплекса в современных условиях Беларуси. Сборник материалов Международной научно-практической конференции; 21–23 сентября 2011 г.; Брест, Беларусь. Часть 1*. Брест: Издательство Брестского государственного технического университета; 2011. с. 27–29.
3. Стакан ТН. Моделирование наводнений с использованием геоинформационных систем (ГИС). *Студенческий форум [Интернет]*. 2019 [процитировано 17 декабря 2024 г.];22(часть 2):5–9. Доступно по: <https://nauchforum.ru/journal/stud/73/54767/>. EDN: HKWKYH.
4. Орлянкин ВН, Алешина АР. Способы расчетов и картографирования пространственно распределенных гидрологических характеристик рек при возможных катастрофических паводках в условиях отсутствия данных гидрометрических наблюдений в целях предотвращения ЧС или снижения ущерба от наводнения. В: Центр «Антистихия» МЧС России. *Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Сборник докладов и выступлений на XVI Всероссийской научно-практической конференции; 27–28 сентября 2017 г.; Москва, Россия*. Москва: Центр «Антистихия» МЧС России; 2017. с. 172–177.
5. Павлов СВ, Христодуло ОИ, Шарафутдинов РР. Разработка геоинформационной модели речной сети с учетом картографической, гидрологической и морфометрической информации для определения границ зон затоплений при изменении уровня воды в водных объектах. *Вестник УГАТУ. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2008;11(1):18–27. EDN: JXEBWF.
6. Борщ СВ, Самсонов ТЕ, Симонов ЮА, Львовская ЕА. Визуализация гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек средствами ГИС-технологий. *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2013;349:47–62. EDN: RDJAJB.
7. Балдаков НА, Ловцкая ОВ. Способы визуализации результатов расчета зон затопления пойменных территорий средствами ГИС. В: Сибирский государственный университет геосистем и технологий. *Интерэкспо Гео-Сибирь. XIV Международный научный конгресс; 23–27 апреля 2018 г.; Новосибирск, Россия. Сборник материалов Международной научной конференции «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»*. Том 1. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий; 2018. с. 267–274. EDN: VSFLPY.
8. Farr TG, Hensley S, Rodriguez E, Martin J, Kobrick M. The shuttle radar topography mission. In: Harris RA, Ouwehand L, editors. *Proceedings of the CEOS SAR Workshop; 1999 October 26–29; Toulouse, France*. Noordwijk: European Space Agency; 2000. p. 361–363 (European Space Agency special publications; volume 450).
9. Karwel AK, Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland. In: Jun C, Jie J, van Gendren J, editors. *The International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Volume 37, part B7*. Beijing: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing; 2008. p. 169–172.
10. Rodríguez E, Morris CS, Belz JE, Chapin EC, Martin JM, Daffer W, et al. *An assessment of the SRTM topographic product*. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory; 2005. 143 p. Report No.: D-31639.
11. Карионов ЮИ. Оценка точности матрицы высот SRTM. *Геопрофы*. 2010;1:48–51.
12. Орлянкин ВН, Алешина АР. Использование матриц высот SRTM в предварительных расчетах и картографировании глубин потенциального паводкового затопления речных пойм. *Исследование Земли из космоса*. 2019;5:72–81. DOI: 10.31857/S0205-96142019572-81.
13. Павлова АН. Геоинформационное моделирование речного бассейна по данным спутниковой съемки SRTM (на примере бассейна р. Терешки). *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле*. 2009;9(1):39–44. DOI: 10.18500/1819-7663-2009-9-1-39-44.
14. Ерицян ГГ. Сравнение цифровых моделей рельефа, полученных с топографических карт масштаба 1 : 50 000, 1 : 100 000 и 1 : 200 000, с ЦМР SRTM. *Известия НАН Республики Армения. Науки о Земле*. 2013;66(1):39–47.
15. Трофимов АА, Филиппова АВ. Оценка точности матрицы высот SRTM по материалам топографических съемок. *Геопрофы*. 2014;6:13–17.
16. Муравьев ЛА. Высотные данные SRTM против топографической съемки. В: Маловичко АА, Маловичко ДА, Костицын ВИ, Уткин ВИ, редакторы. *Восьмая Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник научных материалов; 19–23 марта 2007 г.; Пермь, Россия*. Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук; 2007. с. 174–177.
17. Чумаченко АН, Хворостухин ДП, Морозова ВА. Построение гидрологически корректной цифровой модели рельефа (на примере Саратовской области). *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле*. 2018;18(2):104–109. DOI: 10.18500/1819-7663-2018-18-2-104-109.

Получена 07.11.2024 / исправлена 03.03.2025 / принята 06.03.2025.
Received 07.11.2024 / revised 03.03.2025 / accepted 06.03.2025.

УДК 911.6-911.7

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСТРЕМАЛЬНОСТИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА СИБИРИ

Л. М. КИТАЕВ¹⁾, Т. Б. ТИТКОВА¹⁾, М. А. АЛЕШИНА¹⁾

¹⁾Институт географии РАН, пер. Старомонетный, 29, стр. 4, 119017, г. Москва, Россия

Аннотация. Продолжительное (до семи месяцев в году) залегание снежного покрова на севере Евразии определяет возможность влияния изменчивости величины и частоты проявления экстремумов снегозапасов на скорость и направление изменений климата и водного баланса. В связи с этим проведена оценка многолетней изменчивости средних и экстремальных (процентили 5 и 95 %) значений толщины снежного покрова в Сибири с учетом особенностей метеорологического режима региона в 1976–2022 гг. С использованием данных наблюдений метеорологических станций выявлены преобладающие на территории положительные многолетние тенденции изменений средних значений и экстремумов толщины снежного покрова (более 1,5 см за 10 лет) на фоне увеличения средних значений и экстремумов приземной температуры воздуха (от 0 до 2,5 °C за 10 лет) и осадков (более 0,40 и 0,04 мм за 10 лет для средних значений и максимальных экстремумов, а также 0,2–1,0 дня за 10 лет для количества дней без осадков), что в целом соответствует закономерностям общего потепления. Наиболее интенсивные многолетние изменения характеристик отмечены в Западной и Центральной Сибири. Зависимость многолетних изменений характеристик толщины снежного покрова в наибольшей степени проявляется для максимальных экстремумов осадков (бета-коэффициенты составляют 10,91–64,71 при коэффициентах регрессии, равных 0,34–0,68) ввиду прямой связи изменений толщины снежного покрова и количества осадков при многолетнем увеличении температуры воздуха, но в области отрицательных значений. Анализ разностных интегральных кривых показал наличие двух понижений в многолетнем ходе характеристик (в 1985–1995 и 2005–2015 гг.), соответствующих понижениям в многолетнем ходе индексов арктической и североатлантической осцилляций. Для толщины снежного покрова определена недостаточная точность воспроизведения средних значений, экстремумов и коэффициентов линейного тренда реанализом ERA5-Land с отклонениями от коэффициентов данных наблюдений в 2–5 раз.

Ключевые слова: снежный покров; температура воздуха; осадки; средние значения; процентили; коэффициенты линейных трендов; корреляция; разностные интегральные кривые.

Благодарность. Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (тема FMWS-2024-0001 «Изменения климата, их причины и последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России», задание 1021051403088-5).

Образец цитирования:

Китаев ЛМ, Титкова ТБ, Алешина МА. Изменчивость характеристик экстремальности снежного покрова в условиях современного климата Сибири. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;1: 47–59.

EDN: UOCFFJ

For citation:

Kitaev LM, Titkova TB, Aleshina MA. Variability of snow cover extreme characteristics in the modern climate of Siberia. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;1:47–59. Russian.
EDN: UOCFFJ

Авторы:

Лев Михайлович Китаев – кандидат географических наук; старший научный сотрудник лаборатории климатологии.

Татьяна Борисовна Титкова – кандидат географических наук; старший научный сотрудник лаборатории климатологии.

Мария Александровна Алешина – кандидат географических наук; младший научный сотрудник лаборатории климатологии.

Authors:

Lev M. Kitaev, PhD (geography); senior researcher at the laboratory of climatology.

lkitaev@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0618-9209>

Tatiana B. Titkova, PhD (geography); senior researcher at the laboratory of climatology.

ttitkova@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3232-083X>

Maria A. Aleshina, PhD (geography); junior researcher at the laboratory of climatology.

alesina_maria@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8416-7657>



VARIABILITY OF SNOW COVER EXTREME CHARACTERISTICS IN THE MODERN CLIMATE OF SIBERIA

L. M. KITAEV^a, T. B. TITKOVA^a, M. A. ALESHINA^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
29 Staromonetnyj Lane, 4 building, Moscow 119017, Russia*
Corresponding author: L. M. Kitaev (lkitaev@mail.ru)

Abstract. Long-term (up to seven months a year) occurrence of snow cover in the north of Eurasia determines the possibility of the influence of variability of the magnitude and frequency of manifestations of extremes of snow reserves on the speed and direction of climate and water balance changes. In this regard, an assessment of the long-term variability of average and extreme (percentiles 5 and 95 %) values of snow cover thickness in Siberia was carried out taking into account the features of the meteorological regime of the region in 1976–2022. Using observation data from meteorological stations, positive long-term trends in average values and extremes of snow cover thickness (more than 1.5 cm in 10 years) prevailing across the territory were identified against the background of an increase in average values and extremes of air temperature (from 0 to 2.5 °C in 10 years) and precipitation (more than 0.40 and 0.04 mm in 10 years for average values and maximum extremes, as well as 0.2–1.0 days in 10 years for the number of days without precipitation), which generally corresponds to the patterns of global warming. The most intense long-term changes in characteristics were noted in Western and Central Siberia. The dependence of long-term changes in snow cover thickness characteristics on the meteorological regime as a whole is most pronounced for maximum precipitation extremes (beta coefficients are 10.91–64.71 with regression coefficients equal to 0.34–0.68) due to the direct connection between changes in snow cover thickness and precipitation with a long-term increase in air temperature, but in the region of negative values. The analysis of the difference integral curves showed the presence of two decreases in the long-term course of the period characteristics (in 1985–1995 and 2005–2015), corresponding to decreases in the long-term course of the Arctic and North Atlantic oscillation indices. For the snow cover thickness, insufficient accuracy of reproduction of average values, extremes and linear trend coefficients by ERA5-Land reanalysis with deviations from observation data coefficients of 2–5 times was determined.

Keywords: snow cover; air temperature; precipitation; average values; percentiles; linear trend coefficients; correlation; difference integral curves.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the Programme of fundamental scientific research of state academies of sciences (topic FMWS-2024-0001 «Climate changes, their causes and consequences for the environment and life of the population in Russia», assignment 1021051403088-5).

Введение

Исследование частоты проявления экстремальных значений метеорологических характеристик является одной из важнейших задач в изучении современного климата. Количество и масштаб экстремальных явлений, таких как аномалии температуры воздуха и осадков, засухи и наводнения, могут усугублять последствия текущего потепления, выходя за рамки изменчивости средних значений климатических характеристик, что согласно оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) 2022 г. вызывает в настоящее время широкомасштабные неблагоприятные воздействия на природные процессы и хозяйственную деятельность [1]. Сложность проведения оценки значимости экстремальных явлений обусловливается неравномерностью хода потепления и связанных с ним процессов. Так, в начале XXI в. отмечен период замедления роста температуры воздуха в Северном полушарии при увеличении повторяемости аномально холодных зим на севере в связи с усилением влияния арктических циклонов, а период 2015–2020 гг. признан самым теплым за всю историю наблюдений в Евразии [1–4].

Снежный покров при общей тенденции к сокращению в Северном полушарии с 1950-х гг. тем не менее часто имеет разнонаправленные (в связи с особенностями климата) региональные временные тренды [4; 5]. На фоне потепления и увеличения количества осадков, происходящих в последние десятилетия, на западе и юге Восточно-Европейской равнины наблюдается многолетнее уменьшение снегозапасов [6; 7], тогда как на значительной территории северо-восточной части Восточно-Европейской равнины и севера Сибири отмечается увеличение снежности [8; 9], что соответствует региональным различиям в количестве жидких осадков зимнего периода.

Исследование экстремальных гидрометеорологических явлений проводится в первую очередь для оценки изменчивости температуры воздуха и осадков. Уже в конце 1990-х гг. в рамках работы МГЭИК

были даны рекомендации по унификации определения экстремумов с использованием индексов средних, максимальных и минимальных значений температуры воздуха для интервалов в процентах распределения [10], после чего методические подходы неоднократно уточнялись. Экстремальные явления, связанные с изменчивостью снежности, исследованы в меньшей степени. В частности, в отчетах МГЭИК и Росгидромета фиксируются годы и территории с аномально высокими и низкими снегозапасами относительно средних многолетних величин. Известны результаты параметризации экстремальных значений снежности в горах для оптимизации мероприятий по учету лавинной опасности [11]. Строительные нормы и правила регламентируют учет предельной величины снеговой нагрузки на инженерные конструкции¹. При этом масштаб и частота возникновения экстремальных снегозапасов на сегодня изучены недостаточно в связи с отсутствием детальных региональных оценок скорости и направленности их изменений. Цель настоящего исследования состоит в выявлении закономерностей пространственно-временного распределения экстремумов толщины снежного покрова на фоне изменчивости метеорологического режима Сибири.

Материалы и методы исследования

Первые предложения о необходимости координации исследований экстремумов климатических характеристик обсуждались в рамках МГЭИК. В частности, было предложено исследовать критические значения температуры воздуха в диапазонах 2; 5; 10; 90; 95 и 98 % распределения. В качестве пороговых значений также использовались значения 10 и 90 %. Так, для глобальной температуры было выявлено уменьшение экстремальных максимумов в конце XIX в., снижение экстремальных минимумов в первой половине XX в. и повышение экстремальных максимумов начиная с 1960-х гг. [10]. Анализ изменчивости сезонной температуры воздуха показал значимое многолетнее увеличение как средних значений, так и процентиелей 5 и 95 % в 1966–2000 гг. на севере Восточно-Европейской равнины. Суммарное сезонное количество осадков в это время имеет многолетнюю тенденцию к повышению на фоне увеличения сезонных значений процентиля 95 % [12]. В статье М. Ю. Бардина и Т. В. Платовой для температуры воздуха показан рост как минимальных, так и максимальных значений (процентиелей 5 и 95 %) на большей части территории России при наличии тем не менее регионов с отрицательными трендами [13].

В ходе проведения исследований для территории Сибири авторами настоящей работы были использованы результаты суточных наблюдений 198 метеорологических станций за толщиной снежного покрова в 1976–2022 гг. Исходные ряды данных имеют минимум пропусков и позволяют рассмотреть особенности снегонакопления с начала периода устойчивого многолетнего потепления. Исследована территория восточнее 60° в. д. и севернее 55° с. ш. Плотность и равномерность распределения метеорологических станций здесь нельзя считать идеальными, но тем не менее наблюдениями охвачены основные ландшафтные комплексы. Уточнение региональных особенностей изменчивости выполнено на примере данных наблюдений реперных метеорологических станций Западной Сибири (сектор 60–90° в. д.), Центральной Сибири (сектор 90–120° в. д.) и Восточной Сибири (сектор 120–180° в. д.). Список реперных станций приведен в табл. 1–3.

Оценка сезонных изменений характеристик проведена для условий с устойчивым снежным покровом (с января по март включительно), и, таким образом, пороговые экстремальные значения толщины снега определены как процентиeli 5 и 95 % для выборки в 90 сут холодного периода каждого года. Для выявления отклика особенностей снегонакопления на изменчивость метеорологического режима использованы суточные и осредненные за холодный период данные о температуре воздуха и осадках с учетом количества в сезоне дней с их наличием. В связи с дискретностью хода осадков как аналог экстремально малых значений здесь рассматривается количество случаев (дней) без осадков [13]. Для упрощения формулировок пороговые значения процентиля 5 % далее упоминаются как минимальные экстремумы, пороговые значения процентиля 95 % – как максимальные экстремумы, отсутствие осадков (их нулевые значения) приводится как количество дней без осадков. Актуальность применения данной методики состоит в возможности оценки многолетней динамики не только средних, но и экстремальных сезонных значений толщины снежного покрова, что позволяет уточнить их значимость для катастрофических природных событий.

Проведена оценка точности воспроизведения изменчивости средних значений и экстремумов толщины снежного покрова реанализом Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5-Land [14; 15]. Исходный материал представлен ежечасными данными с разрешением сетки 9 км ($0,1 \times 0,1^\circ$), осредненными в суточные значения с привязкой соответствующих ячеек к координатам реперных метеорологических станций.

¹СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. М. : ФГУП ЦПП, 2005. 44 с.

Результаты и их обсуждение

Тенденции многолетних изменений средних сезонных значений температуры воздуха в подавляющем большинстве положительны и значимы с коэффициентами линейного тренда в диапазоне от 0 до 2,5 °C за 10 лет (рис. 1, *a*). Тренды экстремумов имеют аналогичное распределение в пространстве при меньшем диапазоне – от 0,5 до 1,5 °C за 10 лет (рис. 1, *б* и *в*). Преобладают небольшие по величине положительные значимые тренды средних за сезон значений и максимальных экстремумов осадков – более 0,40 и 0,04 мм за 10 лет (рис. 2, *а* и *в*). Количество дней без осадков на большей части региона увеличивается со значимыми коэффициентами линейного тренда в диапазоне 0,2–1,0 дня за 10 лет (преимущественно в Западной Сибири и южной части Центральной Сибири) (рис. 2, *б*), что на фоне роста количества осадков является косвенным признаком усиления их интенсивности. Положительные значимые коэффициенты линейных трендов средних сезонных значений толщины снежного покрова (более 1,5 см за 10 лет) располагаются в основном в Центральной Сибири, в бассейне р. Оби. Тенденции изменений минимальных и максимальных сезонных экстремумов в целом невелики (более 0,2 и 0,4 см за 10 лет соответственно) и равномерно распределены по площади (рис. 1–3, табл. 1).

Таблица 1

Многолетняя изменчивость характеристик толщины снежного покрова
 по данным наблюдений реперных метеорологических станций и реанализа ERA5-Land

Table 1

Long-term variability of snow cover thickness characteristics
 based on data from reference meteorological stations and ERA5-Land reanalysis

Метеорологическая станция	Тип данных	Толщина снежного покрова, см			Коэффициенты линейных трендов, см за 10 лет		
		Среднее значение	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %	Среднее значение	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %
<i>Западная Сибирь</i>							
Игарка (67,47° с. ш., 86,57° в. д.)	Наблюдения	70	56	83	2,50	2,20	3,86
	Реанализ	89	72	105	-10,50	-10,92	-10,44
Толька (63,98° с. ш., 82,08° в. д.)	Наблюдения	71	58	82	0,99	0,66	1,40
	Реанализ	75	53	88	-3,15	-5,40	-2,77
Бакчар (57,00° с. ш., 82,07° в. д.)	Наблюдения	60	44	72	1,43	0,79	3,63
	Реанализ	52	13	70	0,83	-1,03	-2,73
<i>Центральная Сибирь</i>							
Оленёк (68,50° с. ш., 112,43° в. д.)	Наблюдения	37	31	46	0,49	0,93	0,33
	Реанализ	43	33	51	-4,66	-4,08	-4,60
Ербогачён (61,27° с. ш., 108,02° в. д.)	Наблюдения	47	33	54	2,92	2,55	3,17
	Реанализ	50	31	59	-1,58	-2,60	-1,60
Киренск (57,77° с. ш., 108,07° в. д.)	Наблюдения	41	33	47	2,19	1,64	2,67
	Реанализ	47	16	60	-8,11	-8,47	-8,85
<i>Восточная Сибирь</i>							
Чокурдах (70,62° с. ш., 147,88° в. д.)	Наблюдения	35	28	43	3,10	1,11	4,25
	Реанализ	48	37	57	1,17	-2,93	-1,30
Оймякон (63,25° с. ш., 143,15° в. д.)	Наблюдения	28	23	31	0,18	0,27	0,17
	Реанализ	31	23	36	-3,33	-3,09	-3,97
Талон (59,77° с. ш., 148,63° в. д.)	Наблюдения	76	61	93	3,70	3,34	4,33
	Реанализ	94	77	117	2,26	-0,85	-5,11

Примечание. Курсивом выделены незначимые коэффициенты линейных трендов (уровень 95 %).

Общей закономерностью изменчивости характеристик метеорологического режима и толщины снежного покрова является преобладающее на территории многолетнее увеличение как средних значений, так и экстремумов, хотя теоретически возможно присутствие трендов противоположных направлений. Многолетний рост толщины снежного покрова на фоне потепления связан с увеличением количества осадков при повышении температуры воздуха зимой в области отрицательных значений.

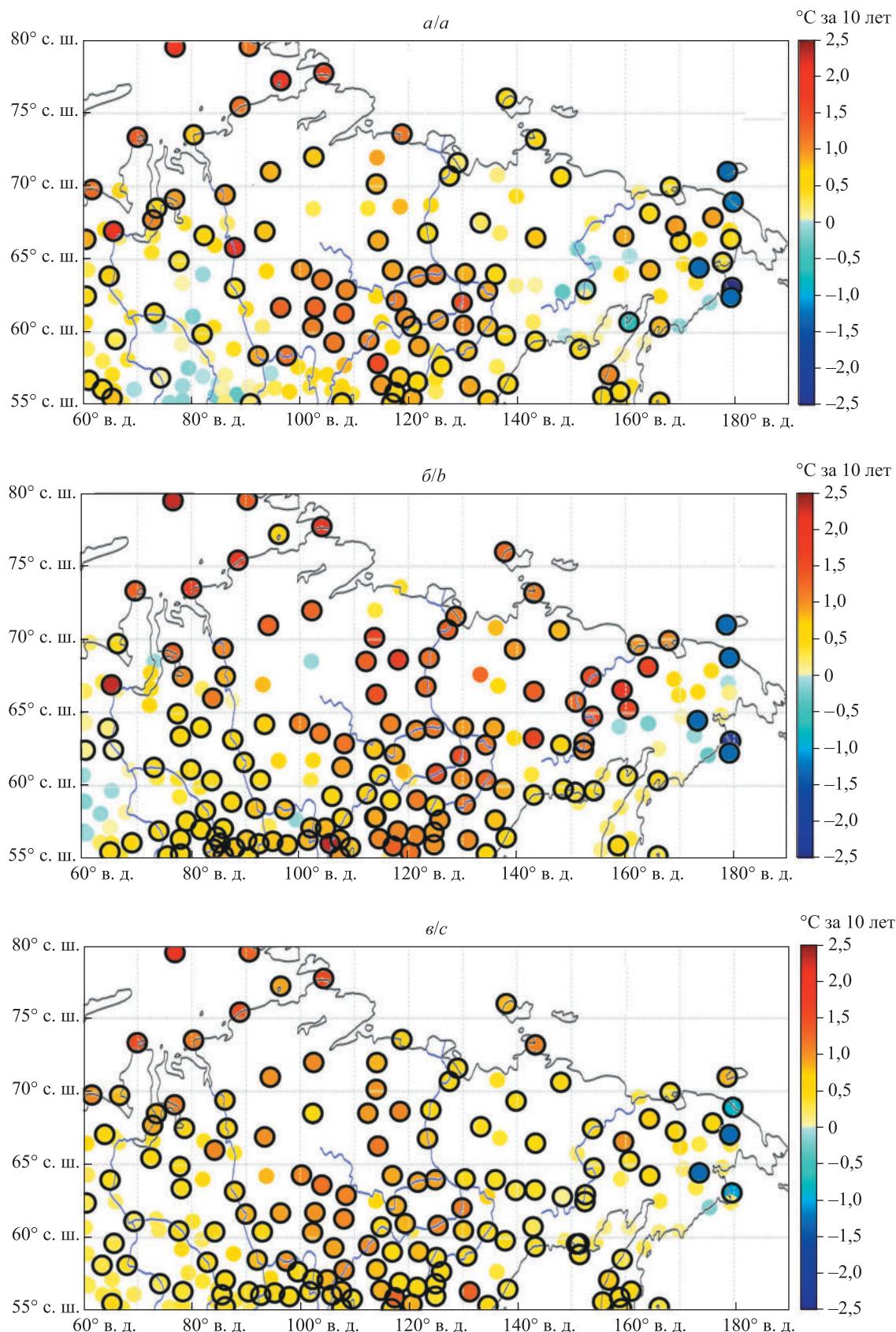
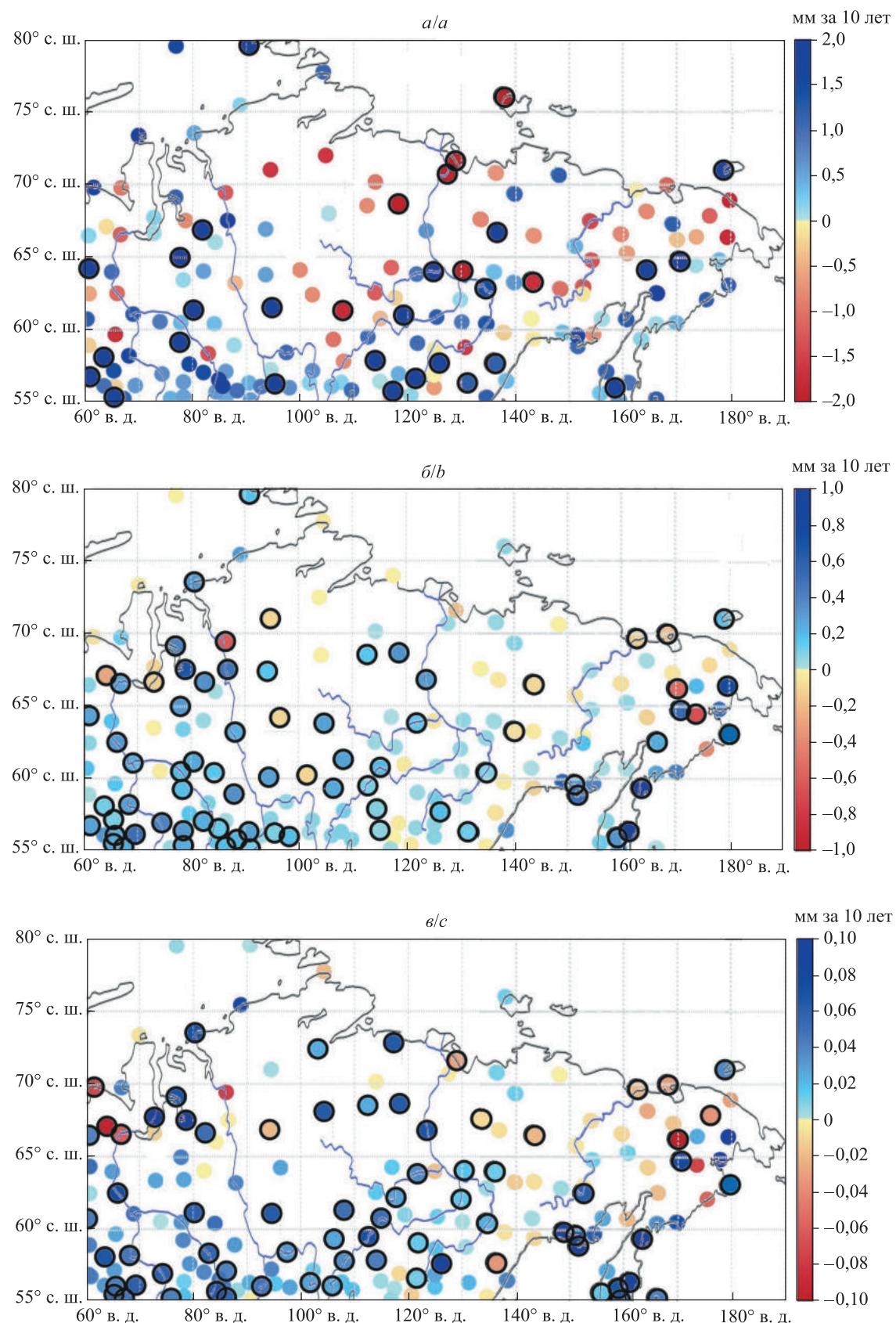


Рис. 1. Многолетние тренды температуры воздуха:
 a – среднее значение; b – процентиль 5 %; c – процентиль 95 %.
 Точки, имеющие контур, являются значимыми трендами

Fig. 1. Long-term temperature trends:
 a – average value; b – percentile 5 %; c – percentile 95 %.
 Dots with contour are significant trends



Rus. 2. Многолетние тренды осадков:
а – среднее значение; б – количество дней без осадков; в – процентиль 95 %.
 Точки, имеющие контур, являются значимыми трендами

Fig. 2. Long-term precipitation trends:
a – average value; b – number of days without precipitation; c – percentile 95 %.
 Dots with contour are significant trends

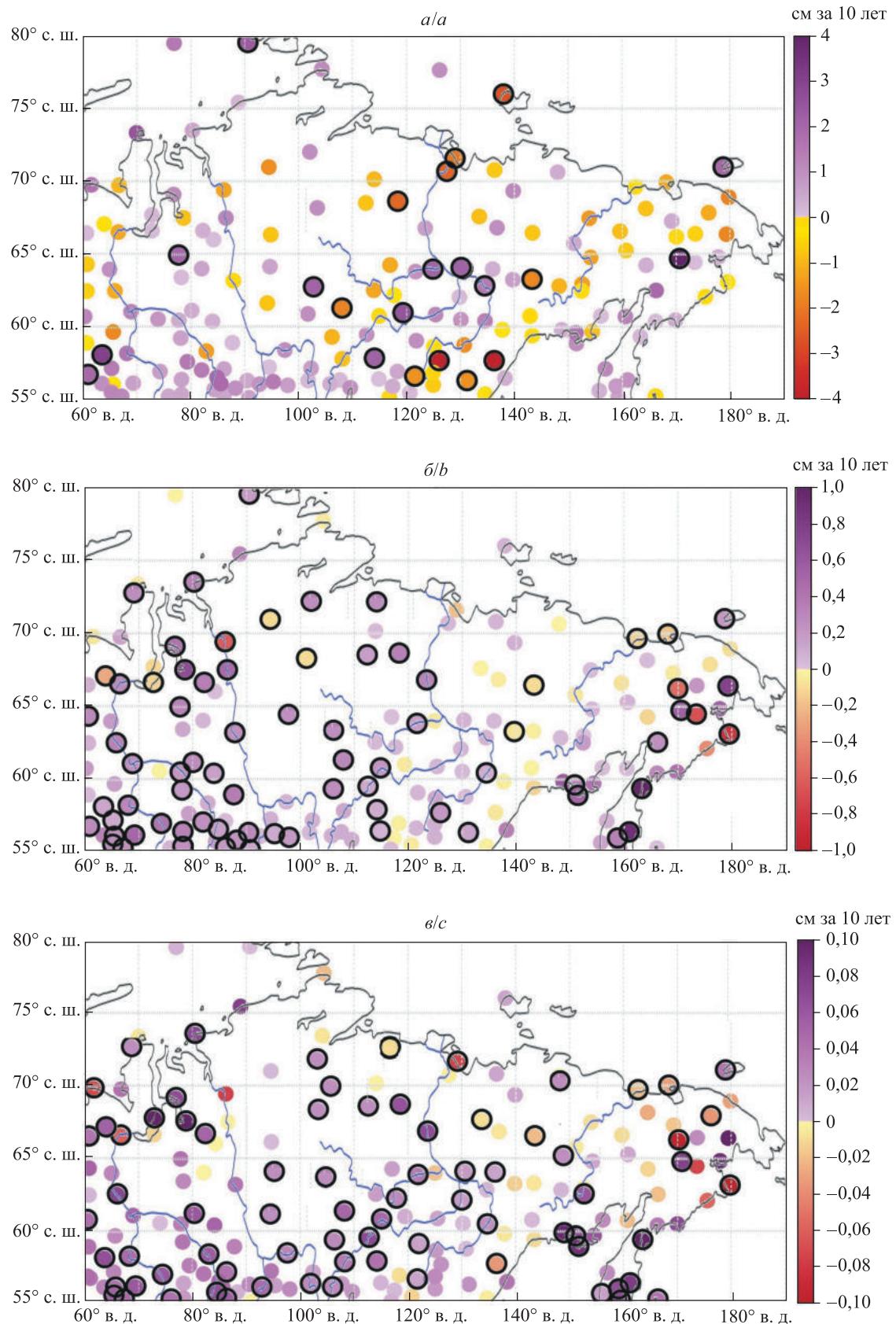


Рис. 3. Многолетние тренды толщины снежного покрова:
а – среднее значение; *б* – процентиль 5 %; *в* – процентиль 95 %.
 Точки, имеющие контур, являются значимыми трендами

Fig. 3. Long-term snow cover thickness trends:
a – average value; *b* – percentile 5 %; *c* – percentile 95 %.
 Dots with contour are significant trends

В табл. 2 приведены результаты анализа регрессионной зависимости характеристик толщины снежного покрова от температуры воздуха и осадков. Коэффициенты множественной регрессии для максимальных экстремумов (0,34–0,68) превышают коэффициенты множественной регрессии для минимальных экстремумов (0,13–0,42). Превышение значений максимальных экстремумов над значениями минимальных экстремумов характерно также для бета-коэффициентов, согласно которым преобладающий значимый вклад в многолетнюю динамику именно максимальных экстремумов вносят осадки.

Таблица 2
**Зависимость многолетнего хода экстремумов толщины снежного покрова
 от хода температуры воздуха и осадков**

Table 2
**Dependence of the long-term variation of snow cover thickness extremes
 on changes in air temperature and precipitation**

Метеорологическая станция	Коэффициент регрессии		Бета-коэффициенты			
			Температура воздуха		Осадки	
	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %
<i>Западная Сибирь</i>						
Игарка (67,47° с. ш., 86,57° в. д.)	0,15	0,41	0,29	0,70	4,96	17,52
Толька (63,98° с. ш., 82,08° в. д.)	0,41	0,62	1,37	4,30	1,04	29,21
Бакчар (57,00° с. ш., 82,07° в. д.)	0,19	0,38	0,98	0,63	0,97	23,05
<i>Центральная Сибирь</i>						
Оленёк (68,50° с. ш., 112,43° в. д.)	0,13	0,35	0,04	0,56	2,54	10,91
Ербогачён (61,27° с. ш., 108,02° в. д.)	0,42	0,59	0,61	0,79	12,91	25,48
Киренск (57,77° с. ш., 108,07° в. д.)	0,32	0,52	-0,37	-0,37	25,15	42,06
<i>Восточная Сибирь</i>						
Чокурдах (70,62° с. ш., 147,88° в. д.)	0,15	0,34	0,81	2,01	4,78	21,43
Оймякон (63,25° с. ш., 143,15° в. д.)	0,25	0,58	-0,55	-0,44	24,02	64,71
Талон (59,77° с. ш., 148,63° в. д.)	0,34	0,68	-1,87	-1,52	14,11	43,99

Примечание. Курсивом выделены незначимые коэффициенты (уровень 95 %).

Как упоминалось ранее, для исследуемого периода (1976–2022) характерно устойчивое потепление при разной скорости повышения температуры воздуха. Так, в начале XX в. в Северном полушарии отмечено замедление роста температуры с последующим ускорением потепления и увеличением количества осадков [1–4; 16]. Для уточнения региональных особенностей многолетних изменений характеристик толщины снежного покрова и метеорологического режима приводятся результаты анализа их разностных интегральных кривых на примере данных наблюдений реперных метеорологических станций, расположенных в срединной части западного, центрального и восточного секторов Сибири (метеорологические станции Толька, Ербогачён и Оймякон). Дополнительно рассмотрены кривые индексов арктической и североатлантической осцилляций. Для построения кривых рассчитывались суммы отклонений модульных коэффициентов от единицы по формуле $\sum (K - 1)$, где $K = \frac{X_i}{X_{cp}}$ (характеристика в i -й год наблюдений; X_{cp} – среднеарифметическое значение ряда наблюдений), с последующим суммированием значений $\sum (K_i - 1)$ за каждый год ряда наблюдений. Для корректного сопоставления колебаний характеристик разных регионов исключалось влияние их временной изменчивости путем добавления коэффициента вариации (C_v) в знаменателе. Полученное расчетное значение откладывалось по вертикальной оси. В результате были выявлены особенности переломных точек, разделяющих квазиоднородные совокупности значений характеристик (рис. 4 и 5).

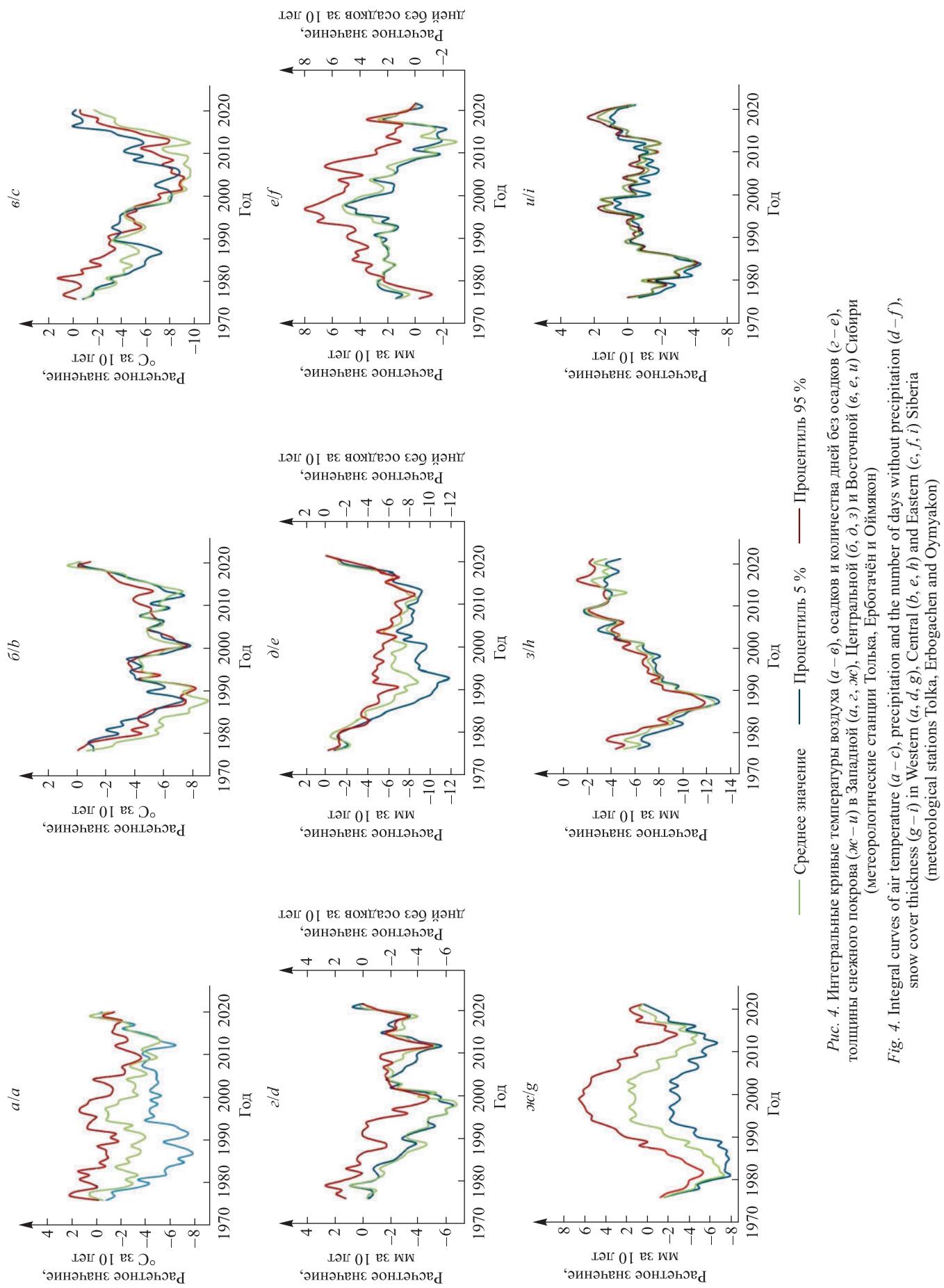


Рис. 4. Интегральные кривые температуры воздуха ($a - e$), осадков и количества дней без осадков ($e - e$), толщины снежного покрова ($e - i$) в Западной (a, e, j), Центральной (b, d, i) и Восточной (c, e, u) Сибири (метеорологические станции Толька, Ербогачен и Оймякон)

Fig. 4. Integral curves of air temperature ($a - c$), precipitation and the number of days without precipitation ($d - f$), snow cover thickness ($g - i$) in Western (a, d, g), Central (b, e, h) and Eastern (c, f, i) Siberia (meteorological stations Tolkha, Erbogachen and Oymyakon)

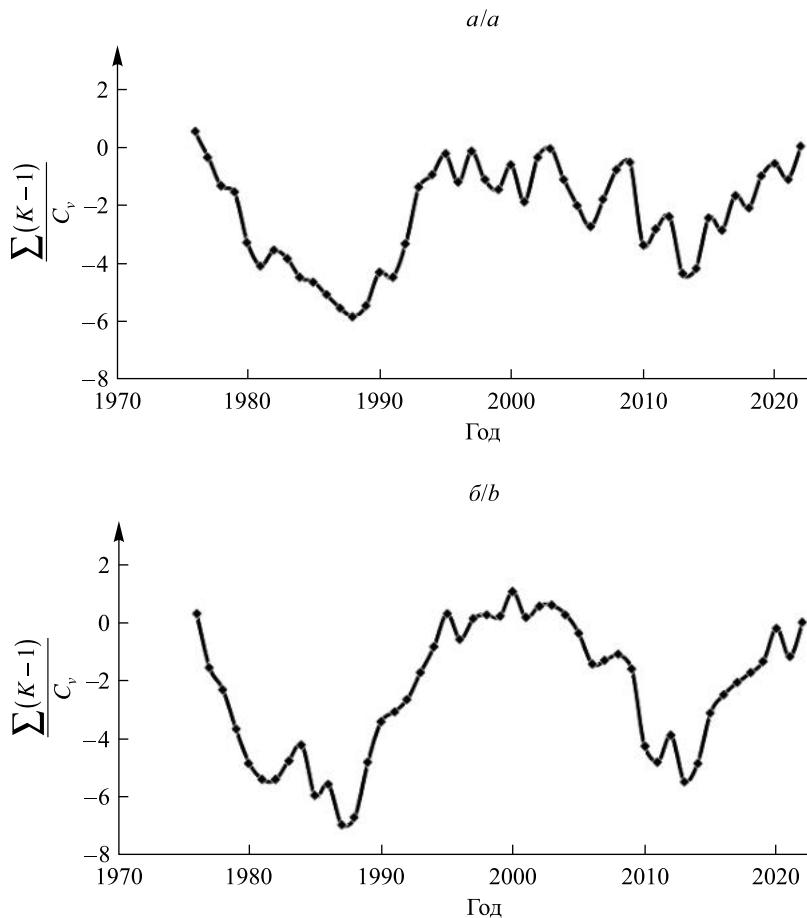


Рис. 5. Интегральные кривые индексов арктической (а) и североатлантической (б) осцилляций

Fig. 5. Integral curves of the Arctic (a) and North Atlantic (b) oscillation indices

Репрезентативность рядов наблюдений в данном случае определяется наличием положительной и отрицательной аномалий близкой продолжительности по времени. Особенностью интегральных кривых является зависимость точности оценок от среднего значения и коэффициента вариации конкретного ряда и, соответственно, отсутствие возможности сравнения рядов разной продолжительности, однако сравнительный анализ рядов равной длины вполне приемлем.

Многолетний ход характеристик имеет понижения в 1985–1995 и 2005–2015 гг. синхронно для средних значений и экстремумов. Выявленная изменчивость повторяет вид разностных интегральных кривых многолетнего хода индексов арктической и североатлантической осцилляций (использованы суточные данные (<https://sl.noaa.gov/data/climateindices/>) Центра прогнозирования климата Национальной метеорологической службы США (*Climate Prediction Center, National Weather Service*)): согласно общим закономерностям положительные фазы осцилляций связаны с теплыми и влажными условиями зимнего периода в северной части Евразии, а отрицательные фазы обусловлены холодными и относительно сухими условиями климата [16–18].

Сравнительный анализ показал повсеместное превышение данных реанализа ERA5-Land над данными наблюдений в значительном диапазоне ошибок – от 8 до 27 % для средних значений, от 7 до 53 % для минимальных экстремумов и от 7 до 33 % для максимальных экстремумов. Корреляция межгодовой динамики средних значений и экстремумов толщины снежного покрова по данным реанализа и данным наблюдений высока: соответствующие коэффициенты составляют не менее 0,58 при коэффициентах корреляции стандартных отклонений менее 0,53 (табл. 3). При этом коэффициенты линейных трендов средних значений и экстремумов для данных реанализа существенно (в 2–5 раз) превышают аналогичные коэффициенты для данных наблюдений, имея разницу в знаке (см. табл. 3). По-видимому, при модельных расчетах прогноза учитывается продолжающееся потепление, хотя для севера Сибири предполагается также увеличение количества осадков, что на фоне отрицательных зимних температур делает возможным увеличение снегозапасов. Подобное несоответствие результатов наблюдений и расчетов выявлено А. Д. Крючковым и Н. А. Калининым: ошибки значений реанализа находятся в диапазоне 12–29 % для

западной и 40–65 % для восточной частей Пермского края [19]. Исследования Д. В. Туркова, В. С. Сократова и Т. Б. Титковой показали завышение водного эквивалента снега в феврале на территории Западной Сибири данными реанализа на 10–15 % на севере и в центре и более чем на 30 % на юге региона. В качестве возможной причины несоответствия выдвигается предположение о значительных ошибках при определении в ходе расчетов интегрального влагосодержания атмосферы [20].

Таблица 3

**Корреляционная связь многолетней динамики данных наблюдений
и реанализа ERA5-Land для толщины снежного покрова**

Table 3

**Correlation between the long-term variability of observational
and ERA5-Land reanalysis data for snow cover thickness**

Метеорологическая станция	Коэффициенты корреляции		
	Среднее значение	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %
<i>Западная Сибирь</i>			
Игарка (67,47° с. ш., 86,57° в. д.)	0,74	0,75	0,81
Толька (63,98° с. ш., 82,08° в. д.)	0,70	0,65	0,55
Бакчар (57,00° с. ш., 82,07° в. д.)	0,71	0,25	0,74
<i>Центральная Сибирь</i>			
Оленёк (68,50° с. ш., 112,43° в. д.)	0,81	0,81	0,72
Ербогачён (61,27° с. ш., 108,02° в. д.)	0,52	0,20	0,58
Киренск (57,77° с. ш., 108,07° в. д.)	0,76	0,14	0,24
<i>Восточная Сибирь</i>			
Чокурдах (70,62° с. ш., 147,88° в. д.)	0,82	0,75	0,74
Оймякон (63,25° с. ш., 143,15° в. д.)	0,77	0,69	0,74
Талон (59,77° с. ш., 148,63° в. д.)	0,73	0,65	0,73

Заключение

В целом новизна полученных результатов связана с детализацией пространственно-временных изменений и особенностей реакции на изменчивость метеорологического режима не только средних, но и экстремальных значений толщины снега в условиях Сибири. Основные положения сделанных выводов приведены ниже.

1. Для периода потепления, включая последние десятилетия, оценена количественная значимость пространственно-временных изменений толщины снежного покрова на фоне изменений температуры воздуха и количества осадков для средних значений и экстремумов (процентили 5 и 95 %, количество дней без осадков вместо процентиля 5 %). Выявлено преобладающее на территории значимое многолетнее увеличение средних и экстремальных значений: более 1,5 см за 10 лет для толщины снега, от 0 до 2,5 °C за 10 лет для температуры воздуха, более 0,04 мм за 10 лет для осадков и 0,2–1,0 дня за 10 лет для количества дней без осадков. Увеличение толщины снега на фоне потепления обусловлено повышением зимних температур в области отрицательных значений при увеличении количества осадков. Значимые коэффициенты линейного тренда в большей степени характерны для температуры воздуха с преобладанием на севере Сибири (до 2,5 °C за 10 лет); минимальные значения отмечены в основном

на юге Западной Сибири (не более 1,0 °С за 10 лет). Для осадков интенсивный рост отмечен на юге региона (до 1,5 и до 0,008 мм за 10 лет для средних значений и максимальных экстремумов соответственно, а также до 0,8 дня за 10 лет для количества дней без осадков).

Общий прирост сезонных минимальных и максимальных экстремумов за период исследований ограничивается первыми двумя десятками процентов от средних многолетних величин: 12,8 и 13,6 % для температуры воздуха, 9,8 и 16,2 % для толщины снежного покрова, 10,4 и 12,6 % для количества дней без осадков и их максимального экстремума. Таким образом, на основе анализа изменчивости характеристик в исследуемый период можно предположить отсутствие вероятности возникновения катастрофических явлений и резких изменений в многолетних тенденциях.

2. Согласно коэффициентам множественной регрессии (0,34–0,68) многолетний ход температуры воздуха и осадков в целом определяет изменения максимальных экстремумов толщины снежного покрова; исходя из значений бета-коэффициентов (10,91–64,71), превалирующий вклад вносят осадки.

3. Для реперных метеорологических станций выявлены существенные неточности как средних, так и экстремальных значений в данных реанализа ERA5-Land относительно данных наблюдений, особенно за толщиной снежного покрова (коэффициенты линейного тренда толщины снежного покрова отличаются в 2–5 раз), что, в частности, ограничивает возможности использования восстановленных данных для определения многолетних тенденций.

4. В дополнение к анализу трендов с использованием разностных интегральных кривых выявлены особенности многолетних тенденций изменения характеристик. Во всех случаях отмечены понижения кривых в 1985–1995 и 2005–2015 гг., которые соответствуют понижениям разностных интегральных кривых индексов атлантической и североатлантической осцилляций. Согласно особенностям циркуляционных атмосферных процессов смена положительных и отрицательных фаз осцилляций определяет для Евразии смену теплых и влажных условий климата на прохладные и сухие условия.

Библиографические ссылки

1. Pörtner H-O, Roberts DC, Tignor MMB, Poloczanska E, Mintenbeck K, Alegría A, et al., editors. *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2023. XII, 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.
2. Соломон С, Чин Д, Мэннинг М, редакторы. *Изменение климата, 2007 г.: физическая научная основа. Вклад рабочей группы I в четвертый доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата об оценках. Резюме для политиков, техническое резюме и часто задаваемые вопросы*. Кембридж: Издательство Кембриджского университета; 2007. VIII, 163 с.
3. Semenov VA, Latif M, Dommenget D, Keenlyside NS, Strehz A, Martin T, et al. The impact of North Atlantic – Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature. *Journal of Climate*. 2010;23(21):5668–5677. DOI: 10.1175/2010JCLI3347.1.
4. Попова ВВ, Морозова ПА, Титкова ТБ, Семенов ВА, Черенкова ЕА, Ширяева АВ и др. Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений. *Лед и снег*. 2015;55(4):54–62. DOI: 10.15356/2076-6734-2015-4-73-86.
5. Акентьева ЕМ, Анисимов ОА, Бардин МЮ, Журавлев СА, Катцов ВМ, Киселев АА и др. *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме*. Киселев АА, Махоткина ЕЛ, Павлова ТВ, редакторы. Санкт-Петербург: Наукомеханик технологии; 2022. 124 с.
6. Кислов АВ, Китаев ЛМ, Евстигнеев ВМ. Изменение снежного покрова при прогнозируемом потеплении климата в XXI в. (на примере Восточно-Европейской равнины). *Вестник Московского университета. Серия 5, География*. 2009;5:35–42. EDN: KZAPN.
7. Brown RD, Derksen C. Is Eurasian October snow cover extent increasing? *Environmental Research Letters*. 2013;8(2):024006. DOI: 10.1088/1748-9326/8/2/024006.
8. Ghatak D, Deser C, Frei A, Gong G, Phillips A, Robinson DA, et al. Simulated Siberian snow cover response to observed Arctic sea ice loss, 1979–2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2012;117(D23):D23108. DOI: 10.1029/2012JD018047.
9. Khan V, Holko L, Rubinstein K, Breiling M. Snow cover characteristics over the main Russian river basins as represented by reanalyses and measured data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2008;47(6):1819–1833. DOI: 10.1175/2007JAMC1626.1.
10. Folland CK, Miller C, Bader D, Crowe M, Jones P, Plummer N, et al. Workshop on indices and indicators for climate extremes, Asheville, NC, USA, 3–6 June 1997. Breakout group C: temperature indices for climate extremes. *Climatic Change*. 1999;42(1):31–43. DOI: 10.1023/A:1005447712757.
11. Олейников АД, Володичева НА. Современные тенденции изменения снеголавинного режима Центрального Кавказа (на примере Приэльбрусья). *Лед и снег*. 2019;59(2):191–200. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-2-400.
12. Китаев ЛМ, Данилович ИС, Акентьева ЕМ. Особенности региональной неоднородности средних и экстремальных метеорологических характеристик северо-запада Восточно-Европейской равнины. В: Янцер ОВ, Юровских АМ, Братанов НС, редакторы. *Изменения климата и погодные аномалии: механизмы и эффективность фенологических гомеостатических реакций. Материалы Всероссийской научно-практической конференции; 7–10 сентября 2022 г.; Екатеринбург, Россия*. Екатеринбург: Уральский государственный педагогический университет; 2022. с. 53–63.
13. Бардин МЮ, Платова ТВ. Изменения порогов экстремальных значений температур и осадков на территории России в период глобального потепления. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2013;25:71–93. EDN: VHTFMF.

14. Brun E, Vionnet V, Boone A, Decharme B, Peings Ya, Valette R, et al. Simulation of northern Eurasian local snow depth, mass, and density using a detailed snowpack model and meteorological reanalyses. *Journal of Hydrometeorology*. 2013;14(1):203–219. DOI: 10.1175/JHM-D-12-012.1.
15. Climate Data Store [Internet]. [S. l.]: Copernicus Climate Change Service; 2019. ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present; 2019 June 23 [cited 2021 December 30]. Available from: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview>. DOI: 10.24381/cds.68d2bb30.
16. Попова ВВ. Современные тренды осадков и атмосферной циркуляции в речных бассейнах европейской части России. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023;87(1):60–76. DOI: 10.31857/S2587556623010144.
17. Чижова ЮН. Влияние арктических воздушных масс на климатические условия периода снегонакопления в центре ЕТР. *Арктика и Антарктика*. 2021;1:16–25. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.1.35112.
18. Hurrell JW. Decadal trends in the North Atlantic oscillation: regional temperature and precipitation. *Science*. 1995;269(5224): 676–679. DOI: 10.1126/science.269.5224.676.
19. Крючков АД, Калинин НА. Сравнение характеристик снежного покрова по данным метеорологических станций и реанализа ERA5-Land на территории Пермского края. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2021;2:95–110. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-95-110.
20. Турков ДВ, Сократов ВС, Титкова ТБ. Определение снегозапасов Западной Сибири по расчетам на модели локального тепловлагообмена SPONSOR с использованием данных реанализа. *Лед и снег*. 2017;57(3):343–354. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-3-343-354.

Получена 07.11.2024 / исправлена 03.03.2025 / принята 06.03.2025.
Received 07.11.2024 / revised 03.03.2025 / accepted 06.03.2025.

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОВ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

А. А. ШЕВЕЛЁВА¹⁾, Ю. А. ГЛЕДКО²⁾

¹⁾Белгидромет, пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь

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

Аннотация. Исследованы закономерности пространственного распределения гидрометеоров на территории Беларуси в период с 1958 по 1988 г. и с 1989 по 2019 г. Проанализирована статистическая структура изменений количества дней с гидрометеорами в стране в пространственном отношении. Установлено, что среднее число дней с гололедом, приходящимся на одну метеостанцию за период с 1958 по 1988 г. (12,8 дн.), незначительно отличается от величины данного показателя за период с 1989 по 2019 г. (10,7 дн.), тогда как среднее число дней с изморозью, приходящимся на одну метеостанцию за период с 1958 по 1988 г. (18,1 дн.), существенно превышает значение аналогичного показателя за период с 1989 по 2019 г. (10,0 дн.). В ходе анализа различий в количестве осадков выявлено, что потепление климата последних лет привело к изменению условий увлажнения и увеличению среднегодового количества осадков на большинстве метеостанций за рассматриваемые периоды. Сделан вывод о том, что существенное влияние на характер пространственного распределения гидрометеоров оказывает рельеф.

Ключевые слова: гидрометеоры; гололед; изморозь; изменение климата; повторяемость гидрометеоров; рельеф.

GEOGRAPHICAL PATTERNS OF HYDROMETEOR'S DISTRIBUTION ON THE TERRITORY OF BELARUS IN THE CONTEXT OF MODERN CLIMATE CHANGE

А. А. SHEVELEVA^a, Ю. А. HLEDKO^b

^aBelhydromet, 110 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220114, Belarus

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

Corresponding author: Yu. A. Hledko (gledko74@mail.ru)

Abstract. The patterns of spatial distribution of hydrometeors on the territory of Belarus in the period from 1958 to 1988 and from 1989 to 2019 were studied. The statistical structure of changes in the number of days with hydrometeors in the country in spatial terms is analysed. It was found that the average number of days with glaze coming per

Образец цитирования:

Шевелёва АА, Гледко ЮА. Географические закономерности распределения гидрометеоров на территории Беларуси в условиях современного изменения климата. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;1:60–74.

EDN: LZIWJU

For citation:

Sheveleva AA, Hledko YuA. Geographical patterns of hydrometeor's distribution on the territory of Belarus in the context of modern climate change. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;1:60–74. Russian.
EDN: LZIWJU

Авторы:

Александра Александровна Шевелёва – инженер-синоптик 1-й категории отдела краткосрочных прогнозов погоды, не благоприятных и опасных явлений службы метеорологических прогнозов.

Юлия Александровна Гледко – кандидат географических наук, доцент; заведующий кафедрой общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Alexandra A. Sheveleva, weather forecaster of the 1st category at the department of short-term weather forecasts, adverse and dangerous phenomena, weather forecasting service.
shev6886@gmail.com

Yuliya A. Hledko, PhD (geography), docent; head of the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics.
gledko74@mail.ru

one weather station for the period from 1958 to 1988 (12.8 days) differs slightly from the value of this indicator for the period from 1989 to 2019 (10.7 days), while the average number of days with rime coming per one weather station for the period from 1958 to 1988 (18.1 days) significantly exceeds the value of the same indicator for the period from 1989 to 2019 (10.0 days). The analysis of differences in precipitation revealed that climate warming in recent years has led to a change in moisture conditions and an increase in average annual amount of precipitation at most weather stations during the periods under consideration. It is concluded that the terrain has a significant impact on the spatial distribution of hydrometeors.

Keywords: hydrometeors; glaze; rime; climate change; frequency of hydrometeors; terrain.

Введение

Согласно определению Всемирной метеорологической организации гидрометеоры состоят из жидких или твердых частиц воды, которые могут находиться во взвешенном состоянии в атмосфере, выпадать из облаков, подниматься ветром с поверхности земли или оседать на различных предметах. Существует пять типов гидрометеоров¹:

- взвешенные частицы;
- выпадающие частицы (атмосферные осадки);
- частицы, поднимаемые ветром с поверхности земли;
- оседающие частицы;
- смерчи.

В настоящей работе объектом изучения являются следующие типы гидрометеоров: выпадающие частицы (атмосферные осадки) и оседающие частицы (гололед и изморозь).

Ничего необычного в гидрометеорах нет, но при достижении определенных критериев они становятся опасными метеорологическими явлениями, которые по своей интенсивности, продолжительности и площади распространения могут негативно влиять на окружающую природную среду, приводить к значительному ущербу в различных отраслях экономики и даже создавать угрозу жизни и здоровью людей². Выявление закономерностей пространственно-временного распределения гидрометеоров способствует предупреждению или снижению урона природно-хозяйственным объектам и уменьшению опасности для жизни и здоровья людей.

Гололед и изморозь наносят материальный ущерб многим отраслям экономики. Намерзая на различных поверхностях, они нередко приводят к порче садовых деревьев, разрушению линий электропередач, блокируют работу железнодорожного, автомобильного и воздушного транспорта [1].

Атмосферные осадки постоянно воздействуют на все компоненты окружающей среды. Однако при слишком большом количестве осадков возникают опасности, связанные с подтоплениями. Также интенсивные осадки могут нанести вред сельскому хозяйству, ухудшить плодородие и вызвать эрозию почвы, привести к снижению урожайности [2].

Актуальность данной работы обусловлена отсутствием исследований пространственного распределения гидрометеоров на территории Беларуси в период до и после начала потепления климата за отрезок времени продолжительностью 30–40 лет. Временной отрезок длительностью 30–40 лет рекомендован Всемирной метеорологической организацией в качестве климатической нормы, потому что он близок к циклам солнечной активности. В настоящей статье будут рассмотрены два равных временных промежутка по 31 году до и после начала активного потепления (с 1958 по 1988 г. и с 1989 по 2019 г. соответственно), что позволит выявить, как изменились среднегодовое количество осадков и среднегодовое число дней с гололедом и изморозью в связи с наблюдаемым изменением климата.

Цель работы – провести анализ и установить закономерности пространственного распределения гидрометеоров на территории Беларуси в период до и после начала активного потепления климата.

Исследованию распределения гидрометеорологических явлений уделяли внимание как отечественные, так и зарубежные ученые. В разные годы были изучены и описаны опасные гидрометеорологические явления в различных регионах бывшего Советского Союза. Так, К. Л. Абдушелишвили с соавторами рассмотрел опасные гидрометеорологические явления на Кавказе [3], А. Д. Дробышев с коллегами – опасные явления погоды на территории Сибири и Урала [4], а С. Г. Чанышева с соавторами описала опасные гидрометеорологические явления на территории Средней Азии [5].

¹Гидрометеоры // Всемирная метеорологическая организация : сайт. URL: <https://cloudatlas.wmo.int/ru/general-classification-of-meteors-hydrometeors.html> (дата обращения: 23.02.2024).

²Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила составления краткосрочных прогнозов погоды общего назначения : ТКП 17.10-06-2008 (02120) : утв. М-вом природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь 31.10.2008 : ввод. в действие с 01.01.2009. Минск : Минприроды, 2008. IV, 30 с.

В Беларуси изучением влияния различных факторов на формирование метеорологических явлений в разные периоды занимались А. А. Смолич [6], А. Х. Шкляр [7; 8], М. А. Гольберг³ [2], В. Ф. Логинов [9–11] и др.

В 1950–80-х гг. были обобщены многолетние сведения об основных метеорологических явлениях, составлены справочники по климату республики и областей. Кроме того, в стране был проведен цикл исследований по изучению отдельных элементов климата, а также климатических условий больших городов, результаты которых отражены в фундаментальном картографическом издании «Нацыянальны атлас Беларусі»⁴.

Наряду с этим в Беларуси выпускались метеорологические ежемесячники, содержащие данные об атмосферных осадках и различных метеорологических явлениях. Практически ежегодно издавались статистические сборники по опасным гидрометеорологическим явлениям, такие как технические обзоры и обзоры стихийных гидрометеорологических явлений.

На современном этапе исследования в данной области проводили белорусские ученые В. Ф. Логинов, А. А. Волчек и И. Н. Шпока, которые занимались разработкой пространственно-временного распределения опасных гидрометеорологических явлений на территории Беларуси [9–13].

Особенности изменения климата в Беларуси за последние десятилетия достаточно широко изложены в научных публикациях специалистов Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (Белгидромет) В. И. Мельника, М. Г. Герменчук и Е. В. Комаровской [14–16].

Научными сотрудниками факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета Ю. А. Гледко, М. Н. Брилевским, Е. Н. Сумак, Е. С. Бережковой, М. В. Медведько с коллегами опубликованы научные работы по анализу числа случаев опасных гидрометеорологических явлений на территории Беларуси, а также их пространственно-временного распределения, изучены синоптические условия и причины образования таких явлений, выделены регионы с наибольшей повторяемостью случаев опасных гидрометеорологических явлений [17–21].

Таким образом, проблемам распределения опасных гидрометеорологических явлений и изменения климата посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. Однако, несмотря на определенные научные достижения в этой области, вопрос пространственного распределения гидрометеоров в период до и после начала активного потепления климата за рекомендованный Всемирной метеорологической организацией отрезок времени продолжительностью минимум 30–40 лет освещен недостаточно, что требует продолжения исследований и пополнения базы данных по пространственному распределению гидрометеоров.

Материалы и методы исследования

Основными исходными материалами для анализа месячного и годового количества осадков и числа дней с гололедом и изморозью на территории Беларуси послужили данные многолетних наблюдений Белгидромета и представленная в издаваемых им метеорологических ежемесячниках статистическая информация за 1958–2019 гг. по 37 метеостанциям.

Период с 1958 по 2019 г. был выбран неслучайно, так как он делится на два равных временных отрезка по 31 году (с 1958 по 1988 г. и с 1989 по 2019 г.). Именно с 1989 г. в Беларуси начался очередной период потепления, за который среднегодовая температура воздуха превысила климатическую норму на 1,3 °C. Этот период потепления не имеет себе равных по продолжительности и интенсивности за все время метеорологических наблюдений в Беларуси.

Пространственная изменчивость количества осадков и числа дней с гололедом и изморозью исследовалась с помощью карт, построенных за различные периоды осреднения. Временные ряды количества осадков и числа дней с гололедом и изморозью определялись стандартными статистическими методами.

Анализ временной изменчивости среднегодового количества осадков и среднегодового числа дней с гололедом и изморозью позволил выявить их динамику в период до и после начала потепления климата.

Результаты и их обсуждение

Гололед. На основе материалов, предоставленных отделом государственного фонда данных службы метеорологического и климатического мониторинга, фонда данных Белгидромета, составлена табл. 1, в которой приведено среднее многолетнее число дней с гололедом и изморозью по 37 метеостанциям за периоды с 1958 по 1988 г. и с 1989 по 2019 г. Данные получены путем непосредственного подсчета.

³Стихийные гидрометеорологические явления на территории Беларуси : справочник / Белорус. науч.-исслед. центр «Экология», Респ. гидрометеорол. центр ; под общ. ред. М. А. Гольберга. Минск : Белорус. науч.-исслед. центр «Экология», 2002. 131 с.

⁴Нацыянальны атлас Беларусі / Кам. па зям. рэсурсах, геадэзіі і картаграфіі пры Савеце Міністраў Рэсп. Беларусь ; гал. рэдкал.: М. У. Мясніковіч (старш.) [і інш.]. Мінск : Белкартаграфія, 2002. 292 с.

Таблица 1

Среднее число дней с гололедом и изморозью на территории Беларуси, приходящееся на одну метеостанцию за различные периоды осреднения

Table 1

Average number of days with glaze and rime on the territory of Belarus per one weather station for different averaging periods

Метеостанция	Среднее число дней с гололедом		Среднее число дней с изморозью	
	С 1958 по 1988 г.	С 1989 по 2019 г.	С 1958 по 1988 г.	С 1989 по 2019 г.
Витебск	16	14	23	14
Верхнедвинск	6	8	16	12
Шарковщина	10	10	14	7
Лынтупы	17	16	21	11
Полоцк	10	12	18	18
Докшицы	21	15	27	16
Орша	10	11	20	11
Гродно	10	11	7	8
Лида	11	11	19	11
Новогрудок	29	24	28	20
Волковыск	15	15	16	16
Минск	20	16	18	7
Вилейка	12	4	18	6
Воложин	8	5	20	9
Борисов	15	9	15	5
Березино	16	9	18	5
Марьина Горка	18	14	27	12
Слуцк	11	12	19	13
Могилёв	20	15	22	14
Горки	16	12	31	17
Славгород	12	10	26	10
Костюковичи	14	10	18	13
Бобруйск	13	8	20	8
Брест	9	7	14	8
Пружаны	16	15	16	13
Ивацевичи	6	7	10	7
Барановичи	10	9	18	8
Ганцевичи	8	7	23	6
Высокое	15	13	15	15
Пинск	6	4	15	4
Гомель	14	7	13	6
Октябрь	11	10	13	6
Жлобин	10	8	18	7
Житковичи	9	8	15	7
Мозырь	12	12	17	7
Василевичи	11	11	12	9
Брагин	8	8	10	7
<i>Среднее значение</i>	<i>12,8</i>	<i>10,7</i>	<i>18,1</i>	<i>10,0</i>

Примечание. Полужирным начертанием выделены минимальное и максимальное значения показателей за рассматриваемые периоды.

Из табл. 1 видно, что среднее число дней с гололедом, приходящееся на одну метеостанцию за период с 1958 по 1988 г. (12,8 дн.), незначительно отличается от величины аналогичного показателя за период с 1989 по 2019 г. (10,7 дн.). Анализ различий в числе дней с гололедом выявил, что для большинства метеостанций на территории страны в период после начала потепления климата произошло снижение данного показателя. Наиболее значительное уменьшение числа дней с гололедом было отмечено на метеостанциях Вилейка, Березино, Гомель, Докшицы и Борисов. На метеостанции Вилейка оно достигало 8 дн., на метеостанциях Березино и Гомель – 7 дн., на метеостанциях Докшицы и Борисов – 6 дн. Также можно отметить метеостанции Новогрудок, Могилёв, Бобруйск, Минск, Марьина Горка, Костюковичи и Горки, где среднее число дней с гололедом уменьшилось на 4–5 дн. Однако выделяются несколько метеостанций, на которых зафиксировано небольшое увеличение повторяемости гололеда (на 1–2 дн.). К ним относятся метеостанции Верхнедвинск, Полоцк, Орша, Гродно, Слуцк и Ивацевичи. На остальных метеостанциях повторяемость гололеда незначительно уменьшилась или осталась неизменной.

Среднее число дней с гололедом за период с 1958 по 1988 г. колебалось от 6 до 29 дн. Наименьшее число дней с гололедом (6 дн.) отмечалось в южной части страны на Полесской низменности (метеостанции Пинск и Ивацевичи), а также в северных регионах республики на Полоцкой низменности (метеостанция Верхнедвинск). Наибольшее число дней с гололедом (29 дн.) наблюдалось на Новогрудской возвышенности (метеостанция Новогрудок). Велика была повторяемость гололеда и на Минской возвышенности (метеостанции Докшицы и Минск), Оршано-Могилёвской равнине (метеостанция Могилёв). Там среднее число дней с гололедом достигало 20–21 дн. На остальной территории среднее число дней с гололедом составляло от 8 до 18 дн. (рис. 1).

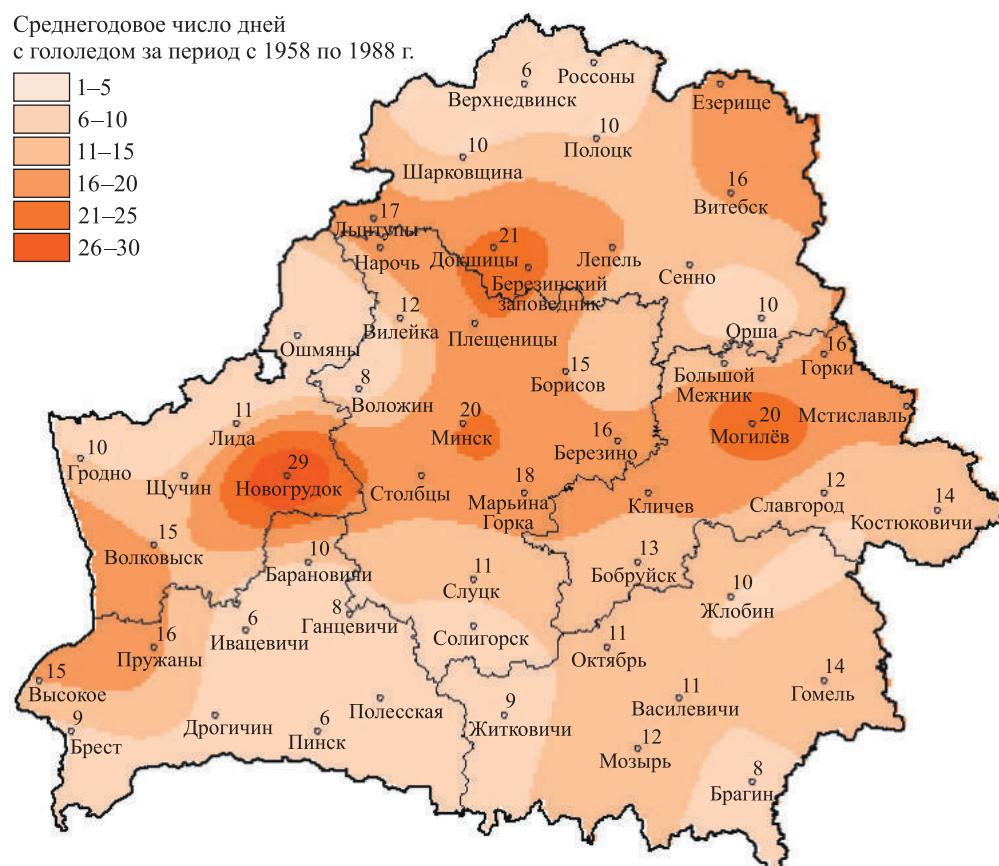


Рис. 1. Пространственное распределение среднегодового числа дней с гололедом на территории Беларусь за период с 1958 по 1988 г.

Fig. 1. Spatial distribution of the average annual number of days with glaze on the territory of Belarus for the period from 1958 to 1988

Среднее число дней с гололедом за период с 1989 по 2019 г. находилось в пределах от 4 до 24 дн. Минимальное число дней с гололедом (4 дн.), как и в период до начала потепления климата, отмечалось в южной части страны на Полесской низменности (метеостанция Пинск). Невелика была повторяемость гололеда и в Минской области на границе Ошмянской возвышенности и Столбцовской равнины (метеостанция

Воложин), а также на Нарочано-Вилейской равнине (метеостанция Вилейка). Там среднее число дней с гололедом составляло 5 дн. Максимальное число дней с гололедом (24 дн.) по-прежнему отмечалось на Новогрудской возвышенности (метеостанция Новогрудок). Кроме того, повторяемость гололеда была велика в центральной части страны на Минской возвышенности (метеостанция Минск) и на крайнем северо-западе республики в пределах Свенцянских гряд (метеостанция Лынтупы), где среднее число дней с гололедом достигало 16 дн. На остальной территории среднее число дней с гололедом составляло от 7 до 15 дн. и возрастало от южных к северным регионам республики (рис. 2).

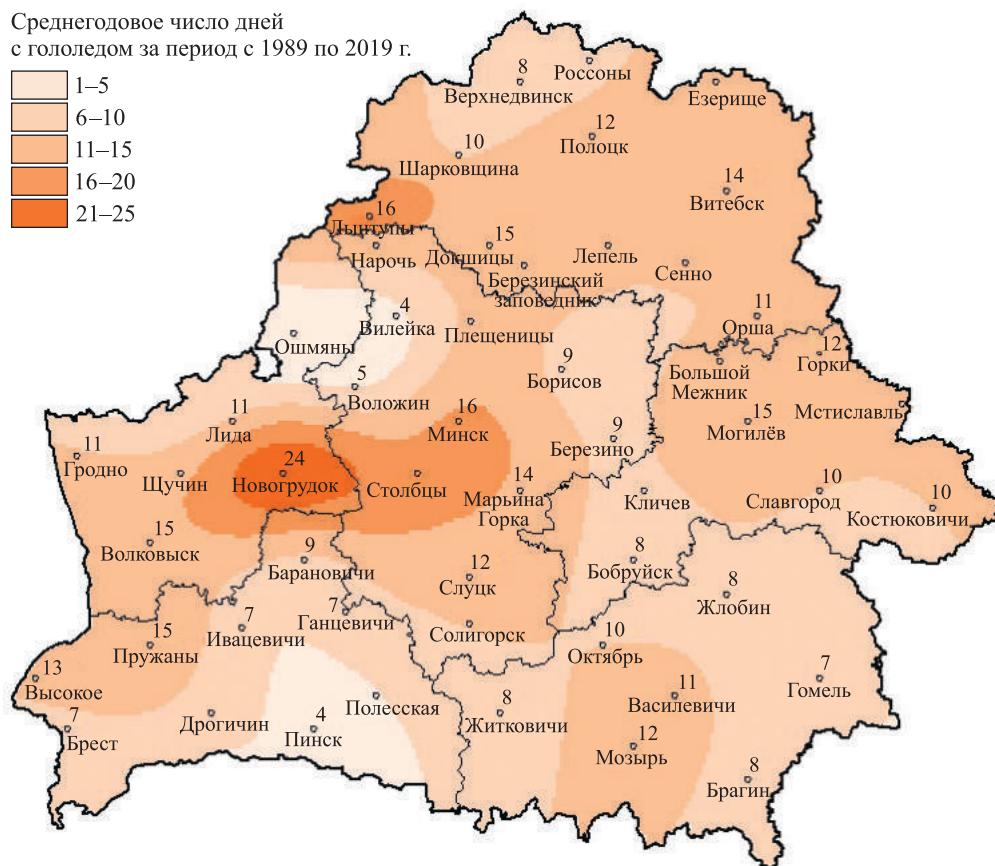


Рис. 2. Пространственное распределение среднегодового числа дней с гололедом на территории Беларусь за период с 1989 по 2019 г.

Fig. 2. Spatial distribution of the average annual number of days with glaze on the territory of Belarus for the period from 1989 to 2019

Существенное влияние на характер пространственного распределения числа дней с гололедом оказывает рельеф. Чаще всего за периоды с 1958 по 1988 г. и с 1989 по 2019 г. гололед отмечался на возвышенных участках рельефа, а именно на Новогрудской и Минской возвышенностях. Наименьшее число дней с гололедом, как правило, наблюдалось на пониженных участках рельефа, в частности на Полесской и Полоцкой низменностях. В целом среднее число дней с гололедом за рассматриваемые периоды возрастило от низин к возвышенностям. Также прослеживалась тенденция к уменьшению среднего числа дней с гололедом с севера на юг страны. В центральных регионах наблюдалось широтное распределение гололеда, тогда как долготные особенности в его пространственном распределении не выявлены.

Зависимость между изменением среднего числа дней с гололедом и температурой воздуха не просматривается. Основную роль в образовании и распределении гололеда играют синоптические условия, благоприятствующие возникновению данного явления.

Изморозь. Как следует из табл. 1, среднее число дней с изморозью, приходящееся на одну метеостанцию за период с 1958 по 1988 г. (18,1 дн.), значительно превосходит величину аналогичного показателя за период с 1989 по 2019 г. (10,0 дн.), что в первую очередь связано с ростом среднегодовой температуры воздуха как в теплый, так и в холодный период года начиная с 1989 г. На основе материалов, предоставленных отделом государственного фонда данных службы метеорологического и климатического мониторинга, фонда данных Белгидромета, были составлены график средней температуры воздуха за

холодный период года (октябрь – март) с 1958 по 2019 г. (рис. 3) и таблица средней температуры воздуха за холодный период года по 37 метеостанциям с 1958 по 1988 г. и с 1989 по 2019 г. (табл. 2). Данные получены путем непосредственного подсчета.

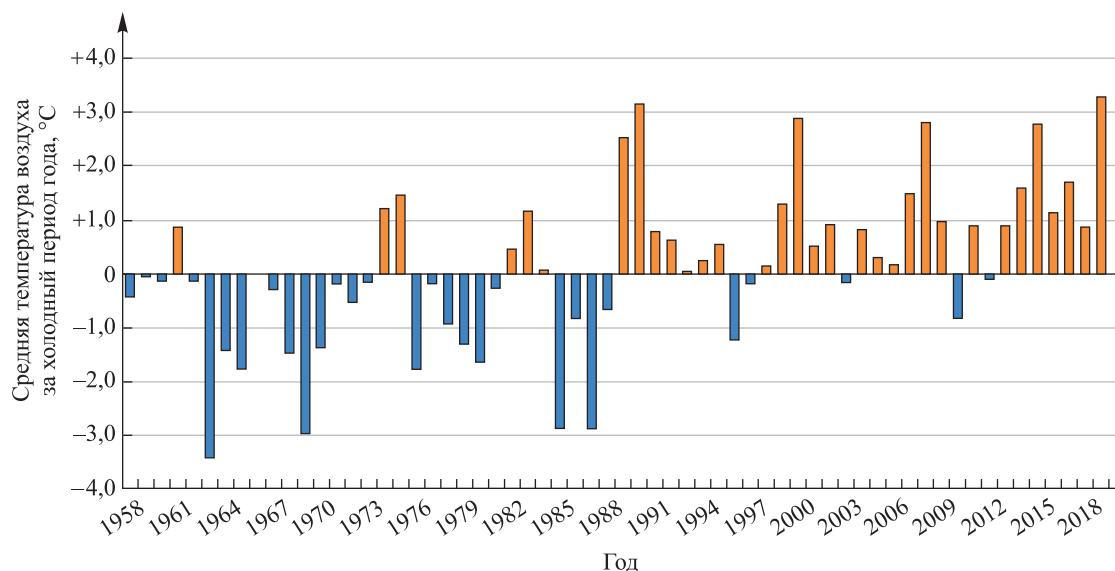


Рис. 3. Средняя температура воздуха за холодный период года с 1958 по 2019 г.

Fig. 3. Average air temperature during the cold period from 1958 to 2019

Таблица 2

Средняя температура воздуха за холодный период года на территории Беларуси, приходящаяся на одну метеостанцию за различные периоды осреднения

Table 2
 Average air temperature during the cold period on the territory of Belarus
 per one weather station for different averaging periods

Метеостанция	Средняя температура воздуха за холодный период года, °C		Разница значений показателя за рассматриваемые периоды, °C
	С 1958 по 1988 г.	С 1989 по 2019 г.	
Витебск	-3,0	-1,0	+2,0
Верхнедвинск	-2,5	-0,7	+1,8
Шарковщина	-2,4	-0,5	+1,9
Лынтупы	-2,2	-0,6	+1,6
Полоцк	-2,6	-0,7	+1,9
Докшицы	-2,6	-0,9	+1,7
Орша	-3,0	-1,2	+1,8
Гродно	-0,7	+0,7	+1,4
Лида	-1,3	+0,5	+1,8
Новогрудок	-1,9	-0,3	+1,6
Волковыск	-0,7	+0,8	+1,5
Минск	-2,0	-0,2	+1,8
Вилейка	-1,9	-0,4	+1,5
Воложин	-2,0	-0,3	+1,7
Борисов	-2,2	-0,5	+1,7
Березино	-2,1	-0,4	+1,7

Окончание табл. 2
Ending of the table 2

Метеостанция	Средняя температура воздуха за холодный период года, °C		Разница значений показателя за рассматриваемые периоды, °C
	С 1958 по 1988 г.	С 1989 по 2019 г.	
Марьина Горка	-2,1	-0,2	+1,9
Слуцк	-1,7	0,0	+1,7
Могилёв	-2,7	-1,1	+1,6
Горки	-3,3	-1,6	+1,7
Славгород	-2,6	-0,8	+1,8
Костюковичи	-3,0	-1,1	+1,9
Бобруйск	-2,0	-0,4	+1,6
Брест	+0,2	+1,8	+1,6
Пружаны	-0,6	+0,8	+1,4
Ивацевичи	-0,8	+0,8	+1,6
Барановичи	-1,4	+0,3	+1,7
Ганцевичи	-1,1	+0,5	+1,6
Высокое	-0,2	+1,3	+1,5
Пинск	-0,7	+1,1	+1,8
Гомель	-1,8	0,0	+1,8
Октябрь	-1,6	+0,1	+1,7
Жлобин	-1,9	0,0	+1,9
Житковичи	-1,0	+0,6	+1,6
Мозырь	-1,4	+0,2	+1,6
Василевичи	-1,5	+0,2	+1,7
Брагин	-1,6	+0,1	+1,7
<i>Среднее значение</i>	-1,8	-0,1	+1,7

Примечание. Полужирным начертанием выделены минимальное и максимальное значения показателя, а также наименьшая и наибольшая разница значений показателя за рассматриваемые периоды.

Анализ рис. 3 показал, что начиная с 1989 г. средняя температура воздуха за холодный период года в основном была положительной и лишь в отдельные годы опускалась ниже 0 °C.

Из табл. 2 видно, что средняя температура воздуха за холодный период года с 1958 по 1988 г. преимущественно являлась отрицательной (минимум, равный -3,3 °C, отмечен на метеостанции Горки) и только в Бресте она достигала +0,2 °C. Среднее значение за рассматриваемый период составляло -1,8 °C. Однако с 1989 по 2019 г. наблюдался рост средней температуры воздуха за холодный период года от +1,4 до +2,0 °C. Так, в Брестской области уже повсеместно, а в Гродненской и Гомельской областях почти на всех метеостанциях, за исключением метеостанции Новогрудок (-0,3 °C) и метеостанций Гомель и Жлобин (0 °C), фиксировались положительные значения показателя. Минимум по-прежнему отмечался на метеостанции Горки, но уже был равен -1,6 °C. Среднее значение в период после начала потепления климата достигало -0,1 °C. Таким образом, рост средней температуры воздуха за холодный период года с 1989 по 2019 г. составил +1,7 °C.

Анализ различий в числе дней с изморозью выявил, что для большинства метеостанций на территории страны в период после начала потепления климата произошло существенное снижение данного показателя. Наиболее значительное уменьшение числа дней с изморозью (на 17 дн.) наблюдалось на метеостанции Ганцевичи. Также можно отметить метеостанции Славгород и Марьина Горка, где среднее число дней с изморозью уменьшилось на 15–16 дн. На остальных метеостанциях снижение показателя составляло от 3 до 14 дн. Однако на трех метеостанциях число дней с изморозью не изменилось. К ним относятся метеостанции Полоцк, Волковыск и Высокое. Увеличение числа дней с изморозью в период после начала потепления климата отмечалось только на метеостанции Гродно и составляло 1 день.

Характер распределения и повторяемость изморози во многом определяются местными условиями территории, такими как высота над уровнем моря, форма рельефа, защищенность от преобладающего влагонесущего потока, экспозиция склонов возвышенных участков рельефа. Экспозиция склонов возвышенностей и гряд влияет на температуру воздуха, скорость ветра, накопление снежного покрова и жидких атмосферных осадков. Так, например, метеостанция Полоцк, на которой число дней с изморозью осталось неизменным, находится на севере Беларуси, где расположена обширная Полоцкая низина, покрытая большим количеством озер и характеризующаяся повышенной лесистостью территории. Реки и озера оказывают влияние на интенсивность отложений изморози, а леса способствуют уменьшению скорости ветра и формированию большей мощности снежного покрова, что создает благоприятные условия для образования изморози.

В целом наибольшее уменьшение среднего числа дней с изморозью отмечалось на метеостанциях Минской и Могилёвской областей, где его величина составляла от 6 до 15 дн. и от 5 до 16 дн. соответственно. Наименьшие изменения числа дней с изморозью наблюдались в Гродненской области, где снижение данного показателя не превышало 8 дн.

Среднее число дней с изморозью за период с 1958 по 1988 г. находилось в пределах от 7 до 31 дн. Минимальное число дней с изморозью (7 дн.) отмечалось на Гродненской возвышенности (метеостанция Гродно). Также повторяемость изморози была невелика в южных регионах республики на Полесской и Приднепровской низменностях (метеостанции Ивацевичи и Брагин соответственно). Там среднее число дней с изморозью составляло 10 дн. Максимальное число дней с изморозью (31 день) наблюдалось в северо-восточной части страны на Горецко-Мстиславской возвышенности (метеостанция Горки). Велика была повторяемость изморози и на Новогрудской возвышенности (метеостанция Новогрудок), в северной части Минской возвышенности (метеостанция Докшицы), на Пуховичской и Оршано-Могилёвской равнинах (метеостанции Марьина Горка и Славгород соответственно). Там среднее число дней с изморозью достигало 26–28 дн. В целом среднее число дней с изморозью возрастало от южных и западных регионов к северным и северо-восточным регионам республики (рис. 4).

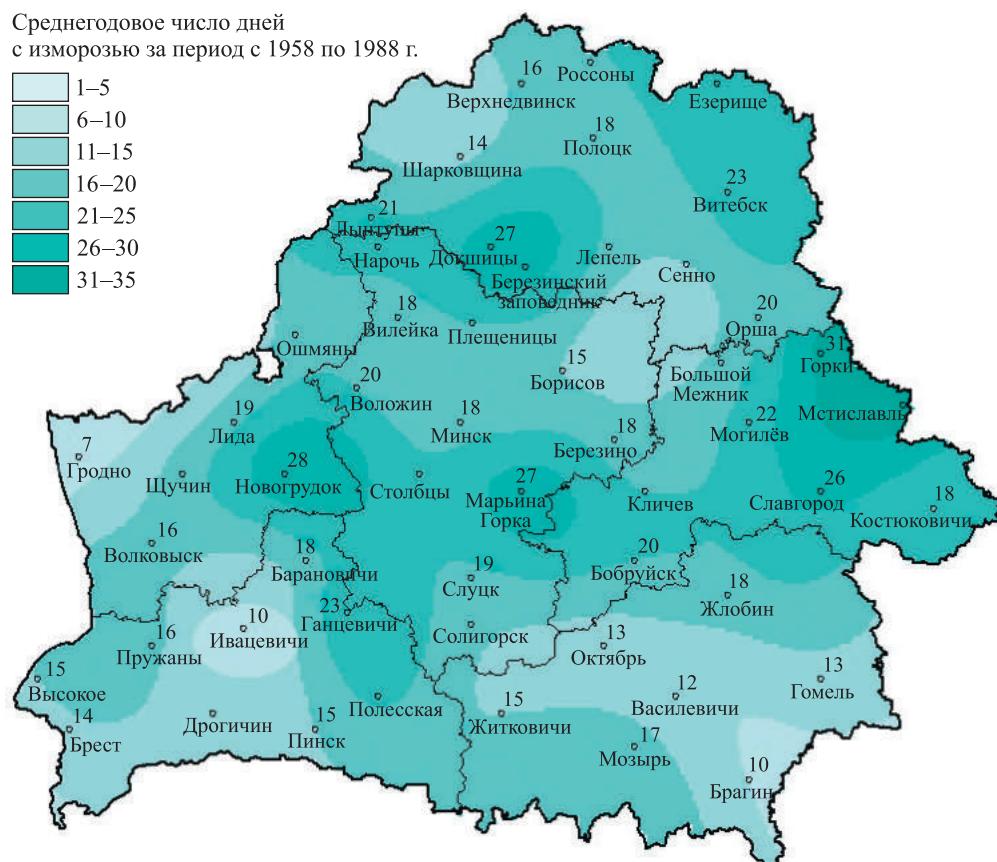


Рис. 4. Пространственное распределение среднегодового числа дней с изморозью на территории Беларусь за период с 1958 по 1988 г.

Fig. 4. Spatial distribution of the average annual number of days with rime on the territory of Belarus for the period from 1958 to 1988

Среднее число дней с изморозью за период с 1989 по 2019 г. колебалось от 4 до 20 дн. Наименьшее число дней с изморозью (4 дн.) также отмечалось в южной части страны на Полесской низменности (метеостанция Пинск). Невелика была повторяемость изморози и на Борисовской и Центральноберезинской равнинах (метеостанции Борисов и Березино соответственно). Там среднее число дней с изморозью составляло 5 дн. Наибольшее число дней с изморозью (20 дн.) наблюдалось на Новогрудской возвышенности (метеостанция Новогрудок). По-прежнему велика была повторяемость изморози в северо-восточных регионах республики на Горецко-Мстиславской возвышенности (метеостанция Горки). Там среднее число дней с изморозью составляло 17 дн. В северных регионах страны на Полоцкой низменности (метеостанция Полоцк) среднее число дней с изморозью достигало 18 дн., а в северной части Минской возвышенности (метеостанция Докшицы) и в западных районах Гродненской области на Волковысской возвышенности (метеостанция Волковыск) составляло 16 дн. На остальной территории отмечалось относительно равномерное распределение среднего числа дней с изморозью в пределах от 6 до 15 дн. (рис. 5).

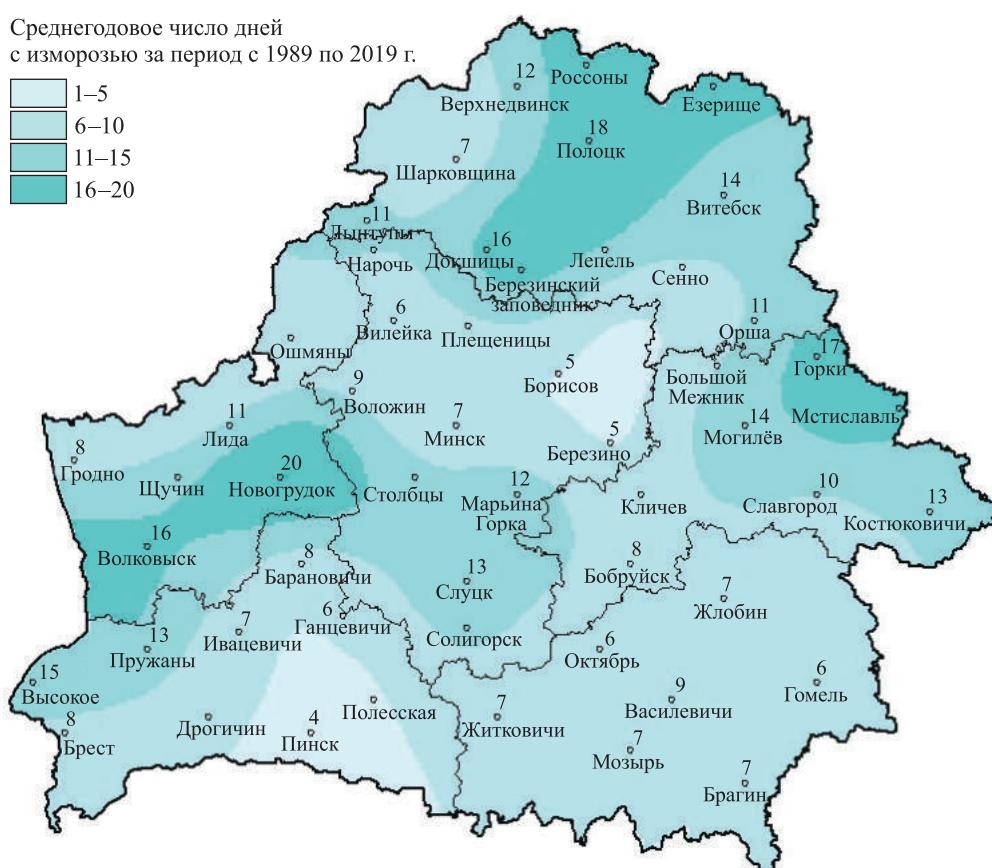


Рис. 5. Пространственное распределение среднегодового числа дней с изморозью на территории Беларусь за период с 1989 по 2019 г.

Fig. 5. Spatial distribution of the average annual number of days with rime on the territory of Belarus for the period from 1989 to 2019

Так же как и гололед, изморозь чаще отмечалась на возвышенных участках рельефа, а именно на Новогрудской и Горецко-Мстиславской возвышенности, реже – на пониженных участках рельефа, в частности на Полесской и Приднепровской низменностях. В целом среднее число дней с изморозью увеличивалось от южных и западных регионов к северным и северо-восточным регионам, не считая некоторых возвышенных участков рельефа в западной части страны. Особенно это видно на примере периода до начала потепления климата (с 1958 по 1988 г.). Также для изморози более характерно широтное распределение, чем долготное распределение.

Есть прямая зависимость между изменением среднего числа дней с изморозью и температурой воздуха: уменьшение числа дней с изморозью согласуется с ростом температуры воздуха за холодный период года в 1989–2019 гг. Кроме того, на число дней с изморозью оказывают влияние атмосферные процессы, благоприятные для ее образования.

Осадки. На основе материалов, предоставленных отделом государственного фонда данных службы метеорологического и климатического мониторинга, фонда данных Белгидромета, составлена табл. 3, в которой приведено среднегодовое количество осадков по 37 станциям за периоды с 1958 по 1988 г. и с 1989 по 2019 г. Данные получены путем непосредственного подсчета.

Таблица 3

Среднегодовое количество осадков на территории Беларуси,
 приходящееся на одну метеостанцию за различные периоды осреднения

Table 3

Average annual amount of precipitation on the territory of Belarus
 per one weather station for different averaging periods

Метеостанция	Среднегодовое количество осадков, мм	
	С 1958 по 1988 г.	С 1989 по 2019 г.
Витебск	646	750
Верхнедвинск	609	666
Шарковщина	603	642
Лынтупы	729	735
Полоцк	663	725
Докшицы	632	670
Орша	615	649
Гродно	595	548
Лида	646	669
Новогрудок	754	757
Волковыск	607	631
Минск	673	694
Вилейка	640	657
Воложин	660	677
Борисов	665	686
Березино	657	640
Марьина Горка	603	610
Слуцк	602	625
Могилёв	611	631
Горки	617	628
Славгород	619	641
Костюковичи	577	644
Бобруйск	626	635
Брест	619	596
Пружаны	621	586
Ивацевичи	633	636
Барановичи	617	643
Ганцевичи	647	661
Высокое	599	603
Пинск	583	612

Окончание табл. 3
Ending of the table 3

Метеостанция	Среднегодовое количество осадков, мм	
	С 1958 по 1988 г.	С 1989 по 2019 г.
Гомель	586	630
Октябрь	623	654
Жлобин	606	641
Житковичи	664	735
Мозырь	605	675
Василевичи	617	661
Брагин	519	552
<i>Среднее значение</i>	627	651

Примечание. Полужирным начертанием выделены минимальное и максимальное значения показателя за рассматриваемые периоды.

Из табл. 3 видно, что среднегодовое количество осадков, приходящееся на одну метеостанцию за период с 1958 по 1988 г. (627 мм), меньше величины данного показателя за период с 1989 по 2019 г. (651 мм). Анализ различий в количестве осадков выявил, что потепление климата последних лет привело к изменению условий увлажнения и увеличению среднегодового количества осадков на большинстве метеостанций за рассматриваемые периоды. В среднем оно возросло на 20–30 мм. Однако выделяются ряд метеостанций, где увеличение среднегодового количества осадков составляло до 71 мм. Значительное увеличение среднегодового количества осадков в период после начала потепления климата произошло только на метеостанции Витебск. Здесь рост данного показателя достигал 104 мм. Однако на нескольких метеостанциях отмечалось несущественное уменьшение среднегодового количества осадков. К ним относятся метеостанции Березино, Брест и Пружаны, где среднегодовое количество осадков уменьшилось на 17; 23 и 35 мм соответственно, а также метеостанция Гродно, где значение показателя снизилось на 47 мм. В настоящее время именно метеостанция Гродно характеризуется минимальным среднегодовым количеством осадков в стране.

С использованием данных табл. 3 и программного комплекса *ArcView* были построены карты пространственного распределения среднегодового количества осадков за периоды с 1958 по 1988 г. и с 1989 по 2019 г.

Так, среднегодовое количество осадков за период с 1958 по 1988 г. находилось в пределах от 519 до 754 мм. Минимальное количество осадков отмечалось в юго-восточных регионах Беларуси на Приднепровской низменности (метеостанции Брагин и Гомель) и Костюковичской равнине (метеостанция Костюковичи), в южной части страны на Полесской низменности (метеостанция Пинск), а также на крайнем западе республики в пределах Прибугской равнины (метеостанция Высокое) и Гродненской возвышенности (метеостанция Гродно). В этих районах среднегодовое количество осадков составляло от 519 до 599 мм. Максимальное количество осадков отмечалось на Свенцянских грядах (метеостанция Лынтупы) и Новогрудской возвышенности (метеостанция Новогрудок) и достигало 729 и 754 мм соответственно. Также большее количество осадков выпадало в северных и центральных регионах республики и на юге страны в районе метеостанции Житковичи. На остальной территории отмечалось равномерное распределение среднегодового количества осадков (рис. 6).

Среднегодовое количество осадков за период с 1989 по 2019 г. колебалось от 548 до 757 мм. Минимальное количество осадков по-прежнему отмечалось в юго-восточных регионах страны на Приднепровской низменности (метеостанция Брагин) и на крайнем западе республики в пределах Прибугской равнины (метеостанции Брест и Пружаны) и Гродненской возвышенности (метеостанция Гродно). В этих районах среднегодовое количество осадков также не достигало отметки 600 мм и составляло от 548 до 596 мм. Максимальное количество осадков, как и в период до начала потепления климата, отмечалось на Новогрудской возвышенности (метеостанция Новогрудок) и Свенцянских грядах (метеостанция Лынтупы). Помимо этого, выделялись Витебский и Полоцкий районы на севере страны и Житковичский район на юге республики. В указанных регионах среднегодовое количество осадков составляло от 725 до 757 мм. В целом за рассматриваемый период больше всего осадков по-прежнему выпадало в центральных и северных регионах страны, а также на юге республики в районе метеостанции Житковичи, расположенной на Полесской низменности (рис. 7).

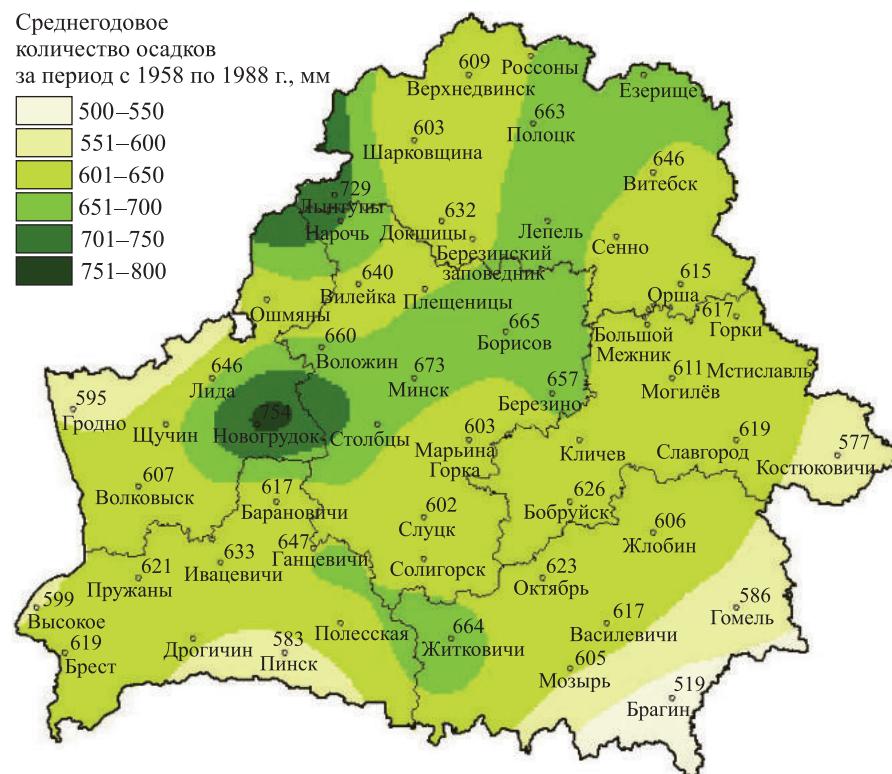


Рис. 6. Пространственное распределение среднегодового количества осадков на территории Беларусь за период с 1958 по 1988 г.

Fig. 6. Spatial distribution of average annual amount of precipitation on the territory of Belarus for the period from 1958 to 1988

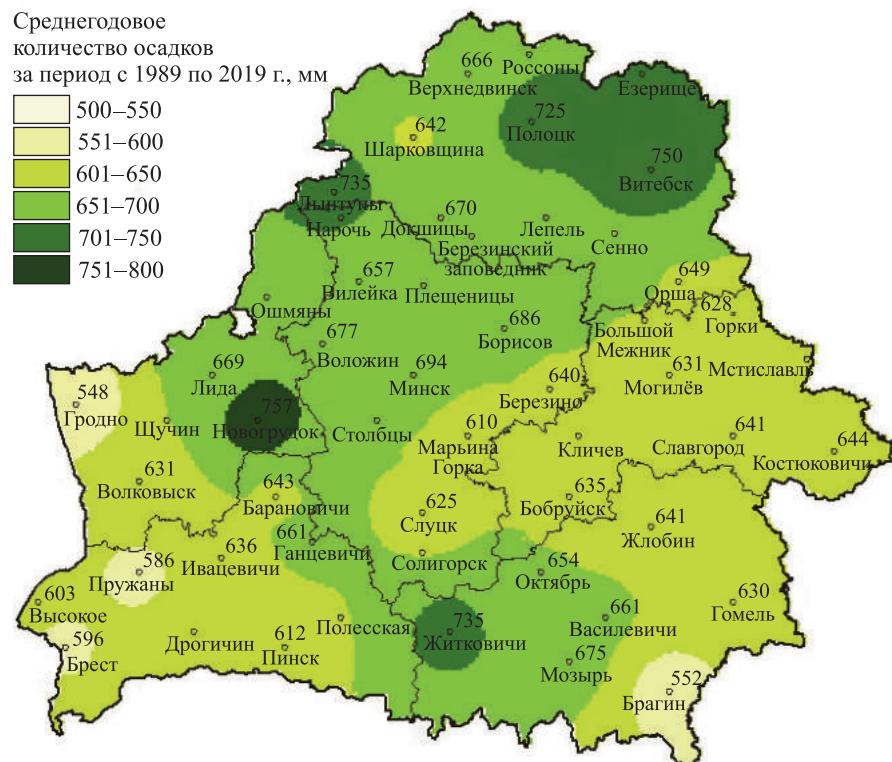


Рис. 7. Пространственное распределение среднегодового количества осадков на территории Беларусь за период с 1989 по 2019 г.

Fig. 7. Spatial distribution of average annual amount of precipitation on the territory of Belarus for the period from 1989 to 2019

Одними из основных факторов, определяющими количество осадков, являются географическое положение и относительная удаленность от Атлантического океана. Так как Беларусь находится в зоне действия западного переноса воздушных масс, то в основном влагонесущие потоки поступают в страну с северо-запада. Благодаря циклонической деятельности количество осадков на территории республики постепенно уменьшается с северо-запада (метеостанции Новогрудок и Лынтупы) на юго-восток (метеостанция Брагин). Кроме того, воздушные массы с Балтийского моря, проходя над Балтийской низменностью, не встречают значимых орографических барьеров на территории Литвы и Латвии [17].

Не менее важным фактором, влияющим на распределение осадков, выступает орография, в связи с чем максимум осадков в Беларуси фиксируется в пределах Новогрудской возвышенности. Немногим уступают ей Свенцянские гряды и Минская возвышенность. Однако количество осадков в пределах возвышенностей определяется по данным расположенных на них метеостанций, которые в ряде случаев имеют различную абсолютную высоту и часто размещаются в долинах рек и понижениях. По этой причине количество осадков на возвышенности может быть несколько заниженным. Подтверждением высказанного является тот факт, что максимум осадков отмечен на метеостанции Новогрудок, имеющей самую большую абсолютную высоту (283 м), а минимум осадков – на метеостанции Брагин с наименьшей абсолютной высотой (114 м).

Кроме того, на распределение осадков оказывает влияние наличие орографических барьеров на пути влагонесущих циклонов. Так, Балтийская гряда и Гродненская возвышенность создают орографическую тень и способствуют снижению количества осадков на метеостанциях Гродно, Высокое и Волковыск, Браславская гряда и Свенцянские гряды – на метеостанциях Шарковщина и Верхнедвинск, Новогрудская и Минская возвышенности – на метеостанции Марьина Горка, а Ошмянская возвышенность обуславливает уменьшение количества осадков на метеостанции Вилейка [17].

Однако главным фактором, определяющим распределение осадков на территории Беларуси, является рельеф местности. Прослеживаемая связь количества выпадающих осадков с рельефом местности нарушается лишь на юге республики в значительно залесенной левобережной части долины р. Припяти в районе метеостанции Житковичи, где наблюдается их возрастание [17].

Таким образом, в пространственном отношении максимальное количество осадков в период до начала потепления климата выпадало на возвышенных участках рельефа – Свенцянских грядах и Новогрудской возвышенности. В период после начала потепления климата максимум осадков также отмечался на Свенцянских грядах и Новогрудской возвышенности, но к ним еще добавились Витебская возвышенность и Полесская низменность в районе метеостанции Житковичи. Минимальное количество осадков как в период до начала потепления климата, так и в период после начала потепления климата, как правило, фиксировалось на юго-востоке страны в пределах Приднепровской низменности и на западе республики в пределах Прибугской равнины и Гродненской возвышенности. В распределении количества осадков больше просматриваются долготные особенности.

Заключение

Анализ различий в числе дней с гололедом и изморозью выявил, что для большинства метеостанций произошло уменьшение повторяемости данных явлений за рассматриваемые периоды. Анализ различий в количестве атмосферных осадков показал, что потепление климата последних лет привело к изменению условий увлажнения и увеличению количества осадков на большинстве метеостанций за рассматриваемые периоды.

Чаще всего за 1958–2019 гг. гололед, изморозь и осадки отмечались на возвышенных участках рельефа. Наибольшая повторяемость гололеда наблюдалась на Новогрудской и Минской возвышенностях, наибольшая повторяемость изморози – на Новогрудской и Горецко-Мстиславской возвышенностях. Максимальное среднегодовое количество осадков как в период до начала потепления климата, так и в период после начала потепления климата выпадало на Новогрудской возвышенности и Свенцянских грядах.

Наименьшее число дней с гололедом и изморозью, как правило, отмечалось на пониженных участках рельефа – Полесской, Полоцкой и Приднепровской низменностях. Минимальное количество осадков как в период до начала потепления климата, так и в период после начала потепления климата также отмечалось на пониженных участках рельефа – Приднепровской низменности и Прибугской равнине.

Таким образом, основным фактором, влияющим на характер пространственного распределения гололеда, изморози и атмосферных осадков, является рельеф местности. Рельеф оказывает большое влияние на микроклимат, который во многом определяет возникновение, интенсивность и распределение гололедно-изморозевых отложений и атмосферных осадков. На вершинах или наветренных склонах холмов условия для образования гололеда, изморози и выпадения осадков оказываются лучшими, чем на равнинах либо подветренных склонах. Экспозиция склонов возвышенностей и гряд влияет на температуру воздуха, скорость ветра, накопление снежного покрова и жидких атмосферных осадков. Перечисленные факторы, в свою очередь, определяют гололедно-изморозевый режим местности.

Библиографические ссылки

1. Заморский АД. *Атмосферные явления*. Ленинград: Гидрометеоиздат; 1959. 94 с.
2. Гольберг МА, Волобуева ГВ, Фалей АА. *Опасные явления погоды и урожай*. Минск: Ураджай; 1988. 120 с.
3. Абдушелишвили КЛ, Гагуа ВП, Керимов АА, Кордзахия РС, Папинашвили ЛК, Рухадзе НВ и др. *Опасные гидрометеорологические явления на Кавказе*. 2-е издание. Сванидзе ГГ, Цуцкиридзе ЯА, редакторы. Ленинград: Гидрометеоиздат; 1983. 264 с.
4. Дробышев АД, Кошинский СД, Корулина ЛГ, Лучицкая ИО. *Опасные явления погоды на территории Сибири и Урала. Часть 1, Алтайский край, Кемеровская, Новосибирская и Томская области*. Кошинский СД, редактор. Ленинград: Гидрометеоиздат; 1979. 383 с.
5. Чанышева СГ, Айзенштат БА, Абдумаликов ТИ и др. *Опасные гидрометеорологические явления в Средней Азии*. Джураев АД, Чанышева СГ, Субботина ОИ, редакторы. Ленинград: Гидрометеоиздат; 1977. 336 с.
6. Смоліч АА. *Географія Беларусі*. 4-е виданне. Мінск: Беларусь; 1993. 374 с.
7. Шкляр АХ. *Клімат Беларусі і сельське господарство*. Мінск: Іздательство Міністерства вищшого, среднього специальнога і професіонального образования БССР; 1962. 422 с.
8. Шкляр АХ. *Кліматичні ресурси Беларусі і використання їх в сільському господарстві*. Мінск: Вищша школа; 1973. 430 с.
9. Логинов ВФ, редактор. *Клімат Беларусі*. Мінск: Інститут геологічних наук Академії наук Беларусі; 1996. 234 с.
10. Логинов ВФ, Волчек АА, Шпока ІН. *Опасні метеорологічні явища на території Беларусі*. Мінск: Беларуська навука; 2010. 129 с.
11. Логинов ВФ, Волчек АА, Шпока ІН. Сравнение пространственно-временных особенностей изменений опасных метеорологических явлений в характерное и не характерное для них время года. В: Карабанов АК, Бамбалов НН, Березовский НИ, Бровка ГП, Гаврильчик АП, Волчек АА и др., редакторы. *Природопользование. Выпуск 19*. Минск: А. Н. Вараксин; 2011. с. 5–21.
12. Волчек АА, Шпока ІН. Закономерности формирования опасных метеорологических явлений на территории Белоруссии. Ученые записки Российской государственной гидрометеорологической университета. 2011;17:64–88. EDN: LVZDHJ.
13. Шпока ІН. *Пространственно-временное распределение опасных метеорологических явлений на территории Беларуси* [диссертация]. Брест: [б. и.]; 2012. 210 с.
14. Герменчук МГ, Мельник ВИ, Комаровская ЕВ. Изменения основных климатических параметров и повторяемость опасных гидрометеорологических явлений в Республике Беларусь. В: Стрельченко СГ, редактор. *Гидрометеорологическая безопасность Союзного государства в условиях изменяющегося климата. Материалы постоянно действующего семинара при Парламентском собрании Союза Беларуси и России по вопросам строительства Союзного государства (заседание восемнадцатое; 25–26 февраля 2010 г.; Минск, Беларусь)*. Минск: Центр системного анализа и стратегических исследований Национальной академии наук Беларуси; 2010. с. 135–146.
15. Мельник ВИ, Комаровская ЕВ. Изменения климата и меры по адаптации отраслей к этим изменениям в Республике Беларусь. В: Стрельченко СГ, редактор. *Гидрометеорологическая безопасность Союзного государства в условиях изменяющегося климата. Материалы постоянно действующего семинара при Парламентском собрании Союза Беларуси и России по вопросам строительства Союзного государства (заседание восемнадцатое; 25–26 февраля 2010 г.; Минск, Беларусь)*. Минск: Центр системного анализа и стратегических исследований Национальной академии наук Беларуси; 2010. с. 169–176.
16. Мельник ВИ, Комаровская ЕВ. Особенности изменения климата на территории Республики Беларусь за последние десятилетия. В: Савастенко АА, Яковенко АВ, составители. *Научно-методическое обеспечение деятельности по охране окружающей среды: проблемы и перспективы*. Аношко ВС, Ключенович ВИ, Бурак ВМ, Герменчук МГ, Кирвель ИИ, Липский ВК и др., редакторы. Минск: БелНИЦ «Экология»; 2011. с. 77–84.
17. Брилевский МН. Динамика количества осадков на территории Беларуси и режима их выпадения в связи с изменением климата. В: Конькова ВМ, редактор. *Экологическая безопасность 1991–2021. Сборник материалов заочной научно-практической конференции, посвященной юбилейной дате образования РУП «БелНИЦ «Экология»*. Минск: БелНИЦ «Экология»; 2021. с. 97–101.
18. Гледко ЮА, Бережкова ЕС. Анализ метеорологической обстановки в условиях обледенения и гололеда. Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2020;2:14–25. DOI: 10.33581/2521-6740-2020-2-14-25.
19. Гледко ЮА, Соколовская ЯА. Особенности прогнозирования грозовых явлений на территории Беларуси. В: Лопух ПС, Иванов ДЛ, Логинова ЕВ, Новик АА, редакторы. *Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата. Материалы Международной научной конференции; 5–8 мая 2015 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Издательский центр БГУ; 2015. с. 244–246.
20. Медведько МВ. Тенденции изменения интенсивности опасных гидрометеорологических явлений на территории Беларуси. В: Сафонов ВГ, Янковский ОН, Захаров АГ, Кухаренко АА, Василевич МН, Вериго АВ и др., редакторы. *Материалы 78-й научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета; 10–21 мая 2021 г.; Минск, Беларусь. Часть 1 [CD-ROM]*. Минск: БГУ; 2021. с. 433–436.
21. Сумак 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.

Получена 05.11.2024 / исправлена 14.02.2025 / принята 06.03.2025.
Received 05.11.2024 / revised 14.02.2025 / accepted 06.03.2025.

УДК 504.064.2:330.15

ОЦЕНКА ДЕПОНИРОВАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ЗЕЛЕНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ УРБОЛАНДШАФТОВ г. МОГИЛЁВА И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ОБЪЕМА

И. И. СЧАСТНАЯ¹⁾, В. В. НИКИФОРЕНКО²⁾

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

²⁾БелНИИП градостроительства, пр. Машерова, 29, 220002, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Одной из важнейших функций системы озеленения городов является способность зеленых насаждений к депонированию углекислого газа (CO_2). Для оценки этого показателя выполнен анализ природной и градостроительной структуры г. Могилёва, составлена карта урболандшафтов, на которой выделено 13 видов урболандшафтов, объединенных в 5 групп. В весенне-летний период 2021–2023 гг. проведены полевые исследования, изучено экологическое состояние зеленых насаждений выделенных комплексов города, собрана необходимая информация об их породном и возрастном составе, бонитете. На основании полученных данных с использованием разнообразных методов (картографического, картометрического, историко-географического, дистанционного) и ГИС-технологий выполнена оценка углерододепонирующей способности зеленых насаждений урболандшафтов и рассчитана ее ценность в денежном эквиваленте в соответствии с ТКП 17.02-10-2013 (02120), адаптированным для городских насаждений. Поэлементная стоимостная оценка отражает стоимость услуги по поглощению углекислого газа в качестве ресурса, заложенного для растений природой. Установлено, что общий объем накопления диоксида углерода зелеными насаждениями г. Могилёва составляет 15 827,2 т в год (в стоимостном выражении 1 382 551,9 евро в год, или в среднем 116,7 евро на 1 га). Распределение этого показателя колеблется от 8688,4 т в год (730 014,0 евро в год) в группе юго-восточных урболандшафтов (максимум) до 426,6 и 1113,1 т в год (36 262,3 и 94 613,0 евро в год) в группах южных и северо-западных урболандшафтов соответственно (минимумы). Для повышения объема депонирования CO_2 зелеными насаждениями в комплексах с небольшим его количеством предложен новый подход к озеленению городских территорий (на примере микрорайона Казимировка в границах группы северо-западных урболандшафтов), основанный на учете углерододепонирующей способности древостоев различного породного и возрастного состава и позволяющий создать оптимальную структуру озелененных территорий. Данный подход поможет повысить уровень накопления CO_2 (в 2 раза) в развивающихся районах города, что в перспективе положительно скажется на состоянии городской среды.

Ключевые слова: городская среда; урболандшафт; озелененные территории; зеленые насаждения; депонирование углекислого газа; стоимостная оценка.

Образец цитирования:

Счастная ИИ, Никифоренко ВВ. Оценка депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урболандшафтов г. Могилёва и пути повышения его объема. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;1:75–88.

EDN: LKPBDY

For citation:

Shchasnaya II, Nikiforenko VV. Assessment of carbon dioxide sequestration by green spaces of urban landscapes of Mogilev and ways to increase its volume. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;1:75–88. Russian.
EDN: LKPBDY

Авторы:

Ирина Иосифовна Счастная – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры географической экологии факультета географии и геоинформатики.

Виктория Викторовна Никифоренко – инженер-проектировщик 1-й категории.

Authors:

Iryna I. Shchasnaya, PhD (geography), docent; associate professor at the department of geographical ecology, faculty of geography and geoinformatics.

irina.schastnaya@gmail.com

https://orcid.org/0000-0001-6228-8861

Victoria V. Nikiforenko, project engineer of the 1st category.

nikiforenko.victoria@yandex.ru



ASSESSMENT OF CARBON DIOXIDE SEQUESTRATION BY GREEN SPACES OF URBAN LANDSCAPES OF MOGILEV AND WAYS TO INCREASE ITS VOLUME

I. I. SHCHASNAYA^a, V. V. NIKIFORENKO^b

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

^bBelNIIP gradostroitelstva, 29 Masherava Avenue, Minsk 220002, Belarus

Corresponding author: V. V. Nikiforenko (nikiforenko.victoria@yandex.ru)

Abstract. One of the most important functions of urban greening systems is the ability of green spaces to sequester carbon dioxide (CO₂). To assess this capability, we analysed the natural and urban structure of Mogilev, producing a map of urban landscapes that identifies 13 types of urban landscapes united into 5 groups. Field studies conducted during the spring and summer of 2021–2023 examined the ecological state of the urban green spaces in the selected complexes, gathering necessary information regarding their species composition, age structure, and quality. Based on the collected data and using various methods (cartographic, cartometric, historical-geographic, remote) and GIS technologies, the carbon sequestration potential of the green spaces of urban landscapes was evaluated and its monetary value was calculated in accordance with the TCP 17.02-10-2013 (02120) adapted for urban plantings. The element-based cost assessment reflects the economic value of the carbon dioxide absorption services that nature provides to the plants. We found that the total carbon dioxide accumulation by the green spaces in Mogilev amounts to 15 827.2 t per year (in value terms 1 382 551.9 euro per year, or an average of 116.7 euro per 1 ha). The distribution of this indicator ranges from 8688.4 t per year (730 014.0 euro per year) in the south-eastern urban landscape group (maximum) to 426.6 and 1113.1 t per year (36 262.3 and 94 613.0 euro per year) in the southern and north-western urban landscape groups, respectively (minimums). To increase the volume of CO₂ deposition by green spaces in complexes with low carbon accumulation, we propose a new approach to urban greening (using the example of the Kazimirovka microdistrict within the boundaries of the north-western urban landscape group). This method considers the carbon sequestration potential of plantings with different species and age compositions, allowing for the creation of an optimal structure for green areas. The proposed approach will help to increase the CO₂ accumulation level (by 2 times) in developing districts of the city, which will positively affect the urban environment in the long term.

Keywords: urban environment; urban landscape; green areas; green spaces; carbon dioxide deposition; cost assessment.

Введение

Современные города постоянно сталкиваются с растущими проблемами в области экологии, здоровья населения и общественного благосостояния. Огромную роль в создании качественной городской среды для жизни людей играют зеленые насаждения как уникальные системы, обладающие способностью депонировать углекислый газ (CO₂). В результате этого создание и сохранение озелененных территорий в городе становится важной задачей. Озеленение не только придает городской среде эстетическую привлекательность, но и играет ключевую роль в смягчении негативных последствий урбанизации, таких как загрязнение воздуха, увеличение температуры и потеря биоразнообразия.

Историческое развитие озеленения в городах отражает эволюцию человеческого отношения к окружающей среде и представляет собой фундаментальную часть истории градостроительства. Озеленение городских территорий, начавшееся с древних цивилизаций, развивалось на протяжении последующих веков. В XX в. вследствие роста численности городского населения и увеличения урбанизации вопрос озеленения стал актуальным для сохранения здоровья и качества жизни горожан. Данное обстоятельство привело к разработке современных концепций устойчивого городского озеленения, включая создание вертикальных садов, зеленых крыш, а также учет экологических аспектов при планировании городской застройки.

Большинство современных крупных городов мира имеют длинную историю, на протяжении которой их развитие происходило под влиянием различных внешних и внутренних факторов, что сформировало уже сложившиеся к настоящему времени структуру и облик городов. Исторические центры с плотной застройкой, жилые кварталы и промышленные зоны характеризуются локальным развитием озеленения, которое в связи с создавшимися условиями на данный момент сложно исправить. Отсутствие земельного ресурса и внешних инвестиций, подземные инженерные сети, сложившаяся застройка (зачастую имеющая статус историко-культурной ценности), внушительное количество твердых покрытий – все это и многое другое затрудняет оптимизацию системы озеленения в некоторых районах города.

В настоящее время развитие городов часто происходит в периферийном направлении путем создания новых микрорайонов на окраинах и формирования в этих местах локальных центров. Постепенное освоение свободной территории в микрорайонах открывает много перспектив для организации в них системы озеленения, которая поможет создать комфортную среду обитания для местных жителей.

Важным аспектом, определяющим эффективность системы озеленения в городе, является способность зеленых насаждений к поглощению и накоплению углекислого газа. В условиях городской среды, где уровень автомобилизации и промышленной деятельности значительно выше, чем в сельской местности, проблема углеродного загрязнения воздуха становится особенно актуальной. Интерес к исследованию способности деревьев накапливать углекислый газ начал возрастать с середины XX в., когда научное сообщество пришло к пониманию роли деревьев в круговороте углерода и климатических изменениях. Этому способствовали активные исследования процесса фотосинтеза. Зеленые насаждения, в частности деревья, кустарники и травы, являются естественными фильтрами, поглощающими углекислый газ и выделяющими кислород в процессе фотосинтеза [1]. Положительное воздействие зеленых насаждений на снижение уровня CO_2 в городской среде подчеркивает важность интеграции такого подхода в систему озеленения городских территорий.

Цель данного исследования заключается в том, чтобы выявить урбокарбонаты, зеленые насаждения которых депонируют недостаточное количество углекислого газа, и предложить путь повышения его уровня на стадии создания микрорайона. В связи с этим необходимо выполнить следующие задачи: изучить структуру урбокарбонатов города, провести оценку объема депонирования CO_2 зелеными насаждениями общего пользования по группам урбокарбонатов, создать оценочные карты, выявить перспективные микрорайоны с недостаточным уровнем депонирования углекислого газа и предложить пути его повышения на этих территориях.

Обзор литературы

В настоящее время существуют различные методики проведения расчетов объема депонирования углекислого газа. Так, в 2003 г. была принята методика МГЭИК, которая предусматривает расчет по пяти наиболее крупным накопителям углерода: надземной фитомассе, подземной фитомассе, сухостойной и влажной древесине, подстилке и органическому веществу. Суть данной методики заключается в том, что любое существенное уменьшение объема накопления углерода преобразуется в эквивалент выброса CO_2 . Для расчетов используются данные лесного фонда, таблицы хода роста, а также различные конверсионные коэффициенты¹.

Некоторые страны, поддержавшие положения Рамочной конвенции ООН об изменении климата, разработали собственные модели проведения расчетов объема накопления углекислого газа. Так, в Канаде создана модель *CBM-CFS3* [2], учитывающая таксационные данные лесов, собранные на пробных площадях. В США непосредственно для лесов этой страны разработана модель *FORCARB2* [3], которая позволяет выполнять расчеты и прогнозы с 5-летними интервалами и учитывает площади всех категорий лесов, где основным накопителем CO_2 выступают деревья.

Принятые конвенции, существующие модели и методики расчетов в основном затрагивают возможность эффективного накопления углерода лесными массивами. Однако современные подходы, направленные на устойчивое развитие как природных, так и антропогенных комплексов, предполагают их взаимовыгодное сосуществование в качестве единой системы. Следовательно, когда речь идет о городе как о системе, учитывается и доля природной составляющей в нем. Именно поэтому законодательством и нормативно-правовыми актами регулируется площадь природных территорий в городах, а конкретнее площадь зеленых насаждений². Создание новых или модернизация уже существующих методик в перспективе поможет вести учет накопленного углекислого газа в населенных пунктах, где город при этом будет являться отдельной ячейкой, способной в каком-то смысле компенсировать влияние своих выбросов.

Оценку депонирования CO_2 можно проводить с экономической [4–6] и экологической [7] точек зрения. Экономический подход позволяет выразить углерододепонирующую способность зеленых насаждений в денежном эквиваленте, тем самым обозначив ее как материальную ценность. Экологический подход направлен на выявление закономерностей, условий и качественного влияния процесса депонирования CO_2 на окружающую среду.

¹Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства : программа МГЭИК по нац. кадастрам парниковых газов / ред.: Дж. Пенман [и др.]. Женева : Всемир. метеорол. орг., 2003. [649] с.

²Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности : ЭкоНиП 17.01.06-001-2017 : утв. М-вом природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь 18.07.2017 : ввод. в действие с 01.10.2017. Минск : Минприроды, 2023. 186 с.

Понятие «депонирование углекислого газа» тесно связано с термином «экосистемные услуги», получившим развитие в последние десятилетия. В таком контексте депонирование CO_2 считается «бесплатной» выгодой (или услугой), которую получает общество от экосистемы. Взаимосвязям и определениям данных понятий посвящены публикации большого количества зарубежных авторов³ [8–15].

В Беларуси в последнее десятилетие были выполнены научные работы, результатами которых стали оценка уровня депонирования углекислого газа и стоимостная оценка экосистемных услуг зеленых насаждений [16–19]. В большинстве из них объектом исследования является либо территория всей страны, либо отдельные лесные массивы, для которых рассчитывается количество накопленного углекислого газа. Есть авторы, обозначившие в качестве объекта исследования город, а в качестве предмета исследования депонирование CO_2 его зелеными насаждениями. В ряде рассмотренных работ территориальной единицей, выбранной для исследования зеленых насаждений и их оценки, является урбандшафт [20–22].

Материалы и методы исследования

Источниками данных для проведения исследования послужили информация научно-проектного республиканского унитарного предприятия «БелНИИП градостроительства», таксационные данные государственного лесохозяйственного учреждения «Могилёвский лесхоз», коммунального производственного унитарного предприятия «Могилёвзеленстрой», отчеты Витебской лесоустроительной экспедиции, проводившейся для участков городского леса в 2018 г., а также материалы собственных полевых исследований города в весенне-летний период 2021–2023 гг. Также использовались космические снимки «Landsat-8» и данные некоммерческого веб-картографического проекта «OpenStreetMap».

Оценка депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урбандшафтов основана в первую очередь на анализе качественных и количественных характеристик зеленых насаждений города, а также на учете природных, исторических, функционально-планировочных особенностей городской среды. В исследовании широко используются картографический, картометрический, историко-географический и дистанционный методы. Применение ГИС-технологий является инновационным инструментом в рамках проведения оценки депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урбандшафтов. ГИС-технологии позволяют осуществить пространственную привязку качественных и количественных данных, создать территориальную основу для последующего анализа полученных результатов, а также их визуализации.

Исследование можно разделить на три структурно-логических этапа.

Этап 1: анализ города как пространственно неоднородного природно-антропогенного комплекса. На выбор г. Могилёва в качестве объекта исследования для изучения депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урбандшафтов оказали влияние несколько факторов: физико-географическое расположение, исторические особенности развития города и высокий потенциал для оптимизации и совершенствования системы озелененных территорий, так как развитие г. Могилёва в архитектурно-планировочном аспекте продолжается.

Операционной пространственной единицей исследования, которая логично отражает территориальную дифференциацию в распределении зеленых насаждений, а также их стоимостных оценок, выбран урбандшафт. В рамках городского комплекса четко выделяются однородные функциональные зоны и особенности их застройки, влияющие на наличие, состояние и благоустройство зеленых насаждений.

Выделение урбандшафтов осуществляется по принципу соответствия природных и антропогенных компонентов, так как урбандшафт – это сформировавшийся в результате градостроительного преобразования территории городской ландшафт, характеризующийся однородной природной основой и определенным типом градостроительного использования⁴.

Исходя из градостроительной и природной структуры, характерных для г. Могилёва, выделено 13 видов урбандшафтов, объединенных в 5 групп.

Этап 2: анализ зеленых насаждений. В современном мире, где урбанизация продолжает неуклонно возрастать, зеленые насаждения играют важную роль в формировании городской среды.

Каждый город отличается специфической системой распределения зеленых насаждений, которая формировалась параллельно с его историческим и градостроительным развитием. Эта система представляет собой организованное распределение зеленых насаждений внутри города, направленное на создание баланса между городской и природной средой.

Данный этап включает в себя сбор, обработку и анализ исходных данных о зеленых насаждениях общего пользования, их породном составе, возрасте и распространении в рамках города и границах групп урбандшафтов.

³Социально-экономические и правовые основы сохранения биоразнообразия : учеб. пособие / Д. Н. Кавтарадзе [и др.]. М. : Изд-во Науч. и учеб.-метод. центра, 2002. 420 с. (Сохранение биоразнообразия).

⁴Фалолеева М. А. Пространственная структура городских ландшафтов и оценка их экологического потенциала: на примере г. Минска : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.23. Минск, 2004. 19 с.

Суммарная площадь озелененных территорий общего пользования в г. Могилёве составляет около 1750 га. Проведено полевое исследование зеленых насаждений парков, скверов, бульваров, городских лесов, озелененных участков общественных центров и озелененных участков жилой застройки⁵. Всего обследовано 250 площадок, на которых располагается 16 парков, 85 скверов, 15 бульваров, 22 участка городского леса (около 50 кварталов), 20 озелененных участков общественных центров и 54 озелененных участка жилой застройки. Основные площади зеленых насаждений сконцентрированы на периферии города, они представляют собой городской лес. Остальные озелененные территории рассредоточены по всему городу с наибольшей плотностью в центральной части. Исследование породного и возрастного состава древостоев проведено с помощью глазомерной таксации.

Полученные фактические данные занесены в реляционную и картографическую базы данных, после чего созданы тематические векторные слои, включающие атрибутивную информацию о типе озелененной территории (парк, сквер, бульвар и т. д.), ее наименовании (при наличии), преобладающей древесной породе, возрасте деревьев, местоположении и площади насаждений. Структурирование данной информации облегчило анализ депонирования углекислого газа зелеными насаждениями, так как обеспечило возможность визуализации существующего пространственного распространения объектов в рамках всего города и границах выделенных урбокомплексов, что послужило основой для проведения оценки объема депонирования CO_2 .

Этап 3: анализ депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урбокомплексов. Данный этап включает количественную и качественную оценку накопления CO_2 зелеными насаждениями каждого комплекса.

Методика оценки аккумуляции диоксида углерода зелеными насаждениями основана на анализе информации о породном составе насаждений, их площади, возрасте, бонитете и запасе⁶. При расчетах использованы сведения о находящихся на балансе лесхоза древостоях (городские леса), дополненные данными полевых исследований зеленых насаждений парков, скверов и бульваров. В результате проведенной глазомерной таксации определены группы возрастов по типу древостоев (хвойные, твердо-листственные, мягколиственные) и уточнены их площади по оцифрованным данным дистанционного зондирования Земли, что позволило выполнить расчеты объема депонирования углекислого газа для всей системы озелененных территорий общего пользования (A_{ij} , т в год) по формуле

$$A_{ij} = \sum_{ij} V_{ij} \cdot K_{o.k} \cdot K_{n} \cdot I \cdot K_{\phi} \cdot S_{ij},$$

где V_{ij} – объемный показатель среднего изменения запаса стволовой древесины, т. е. средний ежегодный прирост (определяется как отношение древесного запаса i -й лесообразующей породы j -й возрастной группы (в разрезе I и II групп леса) к фактическому возрасту насаждения по лесоустроительным данным, а в их отсутствие по таблицам хода роста модальных насаждений (по главной породе) для конкретного типа и бонитета), $\text{m}^3/\text{га в год}$; $K_{o.k}$ – объемно-конверсионные коэффициенты для перевода объемного запаса (изменения запаса) стволовой древесины ($\text{m}^3/\text{га}$) в массу отдельных фракций фитомассы (т/га); K_n – переводной коэффициент для перевода объема компонента лесного ресурса в количество поглощенного углерода (принимается равным 0,5); I – коэффициент перевода пулов углерода в количество диоксида углерода (принимается на уровне 3,67); K_{ϕ} – коэффициент, учитывающий запас углерода в органическом веществе почвы и мортмассе (принимается на уровне 2,04); S_{ij} – площадь оцениваемого участка насаждений i -й породы j -го типа леса, га.

Стоимостная оценка экосистемных услуг проводится в соответствии с углерододепонирующей способностью озелененных экологических систем⁷.

Стоимостная оценка ежегодного поглощения диоксида углерода для озелененной экологической системы ($O_{удл}$, евро) определена по формуле

$$O_{удл} = \Pi_{\text{CO}_2} \cdot A_{ij},$$

где Π_{CO_2} – средняя мировая цена квоты на выброс 1 т CO_2 , евро (по данным Системы торговли квотами на выбросы Европейского союза (*European Union Emissions Trading System, EU ETS*) за 2023 г.).

⁵О растительном мире [Электронный ресурс] : Закон Респ. Беларусь, 14 июня 2003 г., № 205-З : с изм. и доп. : текст по состоянию на 1 дек. 2023 г. // Эталон. Законодательство Респ. Беларусь / Нац. центр законодательства и правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2023.

⁶Охрана окружающей среды и природопользование. Порядок проведения стоимостной оценки экосистемных услуг и определения стоимостной ценности биологического разнообразия : ТКП 17.02-10-2013 (02120) : утв. М-вом природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь 15.03.2013 : ввод. в действие с 01.06.2013. Минск : Минприроды, 2013. III, 23 с.

⁷Там же.

Расчет оценки ежегодной углерододепонирующей способности лесов в натуральном выражении (А, т) выполнен по формуле

$$A = \sum V_{ij} \cdot K_{o, k} \cdot K_p \cdot I \cdot K_\phi \cdot S_{ij}.$$

На основе проведенных расчетов составлены карты, которые отражают пространственное распределение городских комплексов с различным объемом депонирования углекислого газа их зелеными насаждениями. Эти карты позволили выявить урболовандшафты с недостаточным уровнем CO₂, найти в их составе перспективный интенсивно развивающийся микрорайон (Казимировка) и предложить вариант оптимизации системы его озеленения, опираясь на углерододепонирующую способность зеленых насаждений.

Результаты и их обсуждение

Город Могилёв, основанный в 1267 г., имеет богатое историческое, культурное и природное наследие, что сказалось на формировании отдельных групп урболовандшафтов. Всего в городе выделено 13 видов урболовандшафтов, объединенных в 5 групп (рис. 1).

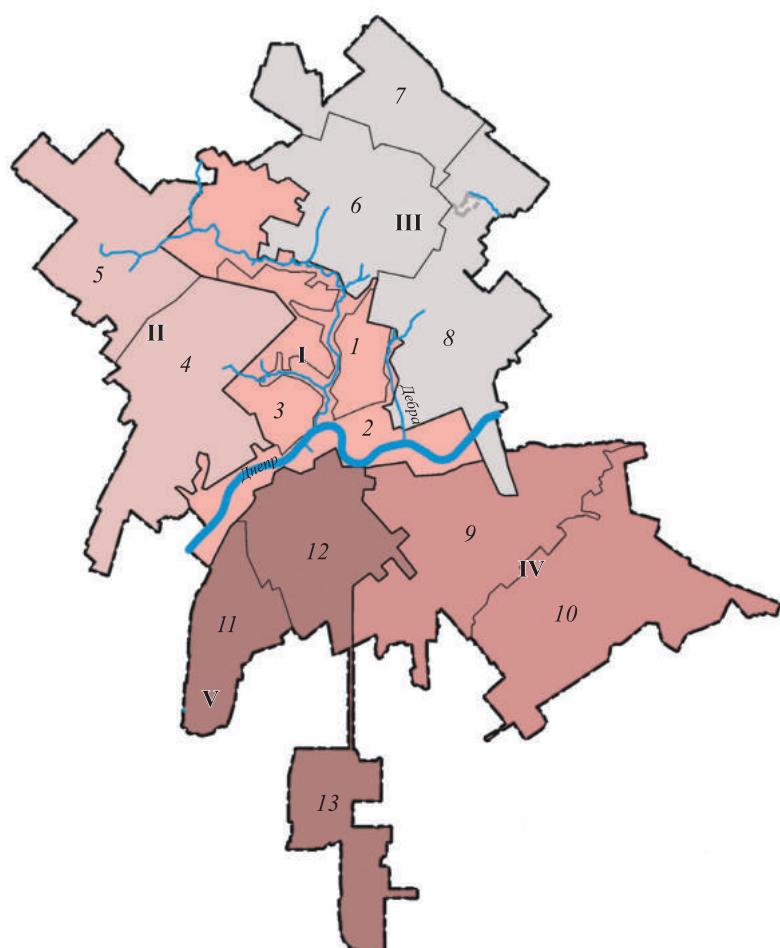


Рис. 1. Группы (I–V) и виды (1–13) урболовандшафтов г. Могилёва:

I – центральные урболовандшафты на мореной равнине, надпойменной террасе и пойме

(1 – урболовандшафты исторического и общественного центра с административной застройкой разной направленности,

2 – урболовандшафты ландшафтно-рекреационных территорий с парками, водоемами, лесопарками, скверами и стихийной растительностью, 3 – урболовандшафты жилой средне- и высоког этажной, усадебной и административной застройки);

II – северо-западные урболовандшафты на мореной равнине и пойме

(4 – урболовандшафты жилой усадебной, промышленной и коммунально-складской застройки с санитарно-защитными насаждениями, 5 – урболовандшафты жилой многоквартирной, усадебной и административной застройки);

III – северо-восточные урболовандшафты на мореной равнине

(6 – урболовандшафты жилой мало- и среднеэтажной, усадебной и административной застройки,

7 – урболовандшафты жилой малоэтажной, промышленной и коммунально-складской застройки с санитарно-защитными насаждениями, парками и лесопарками,

8 – урболовандшафты жилой средне- и высокогородской и промышленной застройки с санитарно-защитными насаждениями);

IV – юго-восточные урболовандшафты на мореной равнине

(9 – урболовандшафты жилой среднеэстажной, усадебной, промышленной и коммунально-складской застройки, 10 – урболовандшафты ландшафтно-рекреационных территорий с лесопарком, водоемами и стихийной растительностью);

V – южные урболовандшафты на мореной равнине

(11 – урболовандшафты жилой усадебной застройки с садами и огородами,

12 – урболовандшафты жилой средне- и высокогородской и административной застройки с парком и водоемом,

13 – урболовандшафты промышленной и коммунально-складской застройки с санитарно-защитными насаждениями)

Fig. 1. Groups (I–V) and types (1–13) of urban landscapes of Mogilev:

I – central urban landscapes on the moraine plain, floodplain terrace and floodplain

(1 – urban landscapes of the historical and public centre with administrative buildings of various profiles,

2 – urban landscapes of the landscape and recreational areas with parks, water bodies, forest parks, squares and spontaneous vegetation, 3 – urban landscapes of the residential mid- and high-rise, estate and administrative buildings);

II – north-western urban landscapes on the moraine plain and floodplain

(4 – urban landscapes of the residential estate, industrial and municipal-warehouse buildings with sanitary protection plantings,

5 – urban landscapes of the residential multiapartment, estate and administrative buildings);

III – north-eastern urban landscapes on the moraine plain

(6 – urban landscapes of the residential low- and mid-rise, estate and administrative buildings,

7 – urban landscapes of the residential low-rise, industrial and municipal-warehouse buildings with sanitary protection plantings, parks and forest parks, 8 – urban landscapes of the residential mid- and high-rise and industrial buildings with sanitary protection plantings);

IV – south-eastern urban landscapes on the moraine plain

(9 – urban landscapes of the residential mid-rise, estate, industrial and municipal-warehouse buildings,

10 – urban landscapes of the landscape and recreational areas with forest park, water bodies and spontaneous vegetation);

V – southern urban landscapes on the moraine plain

(11 – urban landscapes of the residential estate buildings with gardens and vegetable gardens,

12 – urban landscapes of the residential mid- and high-rise and administrative buildings with park and water body,

13 – urban landscapes of the industrial and municipal-warehouse buildings with sanitary protection plantings)

Группа центральных урболовандшафтов, занимающая 16,6 % площади города, включает в себя историческое ядро города с административным центром (вид 1), ландшафтно-рекреационные территории (вид 2), а также участки жилой многоквартирной и усадебной застройки (вид 3). Историческое ядро города составляют площади с сохранившейся застройкой XVI–XIX вв., бывшим замковым валом. Рельеф комплекса представляет собой пологоволнистую равнину, изрезанную ложбинами стока, оврагами и канавами, которая подверглась существенному преобразованию в результате деятельности человека на протяжении долгого времени.

В группу северо-западных урболовандшафтов, занимающую 19,6 % площади города, входят 2 вида (виды 4 и 5). На юге группы преобладает промышленная и коммунально-складская застройка (вид 4). Северная часть комплекса состоит в основном из новой жилой многоквартирной застройки (вид 5), которую Генеральный план г. Могилёва предполагает существенно развивать в будущем. В некоторых местах сохранились очертания естественного рельефа.

Группа северо-восточных урболовандшафтов преобладает в городе, занимая 24,7 % его площади. В данную группу входят 3 вида (виды 6, 7 и 8). На территории комплекса в основном представлена жилая малоэтажная и промышленная застройка. В пределах доминирующего вида (вид 8) располагается ряд крупных промышленных предприятий, образующих один из производственных кластеров города. Рельеф местности более пологий, с сохранившимися естественными чертами.

Группу юго-восточных урболовандшафтов, занимающую 22,9 % площади города, составляют 2 вида (виды 9 и 10). В этом комплексе преобладают ландшафтно-рекреационные территории с большим набором зеленых насаждений (вид 10). В пределах вида 9 находится еще один производственный кластер города, который включает такие предприятия, как ОАО «Могилёвский мясокомбинат», СЗАО «Могилёвский вагоностроительный завод», ЧПУП «Завод горного машиностроения», ОАО «Бабушкина крынка» – управляющая компания холдинга «Могилёвская молочная компания „Бабушкина крынка“».

Группа южных урболовандшафтов занимает наименьшую площадь города – 16,2 % – и состоит из 3 видов (виды 11, 12 и 13). Доля жилой усадебной застройки в группе составляет около 27,2 %. Вид 13 представляет собой территорию с полностью преобладающей промышленной застройкой, находящейся в удалении от основного пространства города.

Общий уровень озелененности г. Могилёва составляет 36,4 %. В городе представлены разнообразные древостои.

В лесопарках и городских лесах абсолютными доминантами являются хвойные породы деревьев. Так, в Печерском лесопарке преобладают спелые и перестойные сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и ель европейская (*Picea abies* (L.) H. Karst.), но встречаются и единичные скопления старовозрастных дубов (*Quercus* L.). В лесном массиве на юго-востоке города породный состав более хаотичный, однако преобладание средневозрастных и спелых хвойных древостоев сохраняется. Из лиственой

растительности можно встретить ольху серую (*Alnus incana* (L.) Moench), осину обыкновенную (*Populus tremula* L.), тополь черный (*Populus nigra* L.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.). Возраст хвойного древостоя колеблется в пределах 60–100 лет, в некоторых кварталах наблюдается практически полное преобладание сосны обыкновенной (*P. sylvestris*), возраст которой составляет от 100 до 110 лет. В городском лесу представлены лиственные древостоя, имеющие возраст в среднем 30–40 лет, но встречаются и отдельные посадки березы повислой (*Betula pendula* Roth), ольхи серой (*A. incana*), дуба (*Quercus* L.), липы (*Tilia* L.) и вяза (*Ulmus* L.), возраст которых может достигать 60–70 лет. В границах лесопарков преобладают высокопродуктивные древостоя (Ia – I классы бонитета), на долю которых приходится 93,8 % лесопокрытых земель в границах города, что свидетельствует о достаточно благоприятных условиях местопроизрастания насаждений. Типологическая структура насаждений не отличается высоким разнообразием. Повсеместно доминирует кисличный тип леса (86,3 % от площади лесных земель).

Наиболее распространенными породами деревьев, которые можно встретить в парках города, являются липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.), липа крупнолистная (*T. platyphyllos* Scop.), береза повислая (*B. pendula*), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), клен ясенелистный (*A. negundo* L.), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.). Насаждения в основном средневозрастные и молодые, старые экземпляры встречаются единично. В скверах и на бульварах доминируют преимущественно клен остролистный (*A. platanoides*), клен ясенелистный (*A. negundo*), каштан конский (*Aesculus* L.), береза повислая (*B. pendula*), иногда отмечается преобладание тополя черного (*P. nigra*) и ивы козьей (*Salix caprea* L.).

Наибольшие сосредоточение и густота зеленых насаждений выявлены в группе юго-восточных урбокомплексов, где они представлены на 25,3 % площади. Важную роль в структуре озеленения играют обширные участки городских лесов, Любужский лесопарк, сквер на ул. Фатина и сквер на ул. Димитрова (рис. 2).

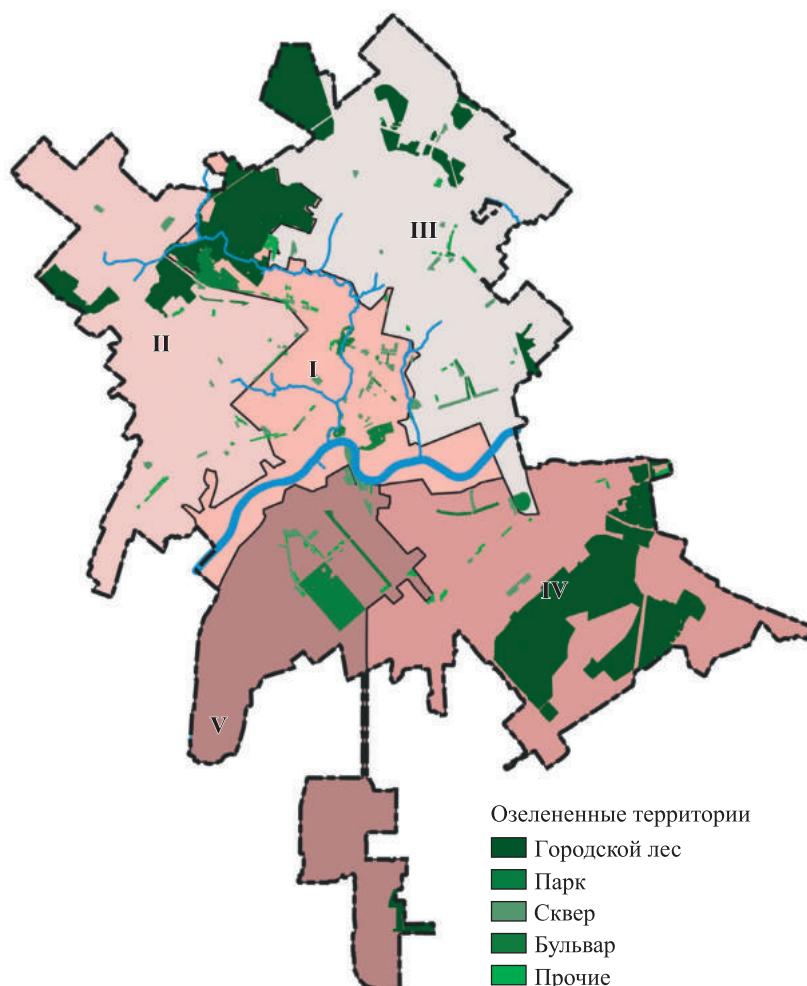


Рис. 2. Распространение зеленых насаждений по группам урбокомплексов г. Могилёва.
Группы урбокомплексов (I–V) см. на рис. 1

Fig. 2. Distribution of green spaces in urban landscape groups of Mogilev.
Urban landscapes groups (I–V) see on fig. 1

Группа центральных урболовандштадтов озеленена на 23,5 %. Особый вклад в систему зеленых насаждений комплекса вносит растительность пойм рек Дубровенка и Днепр. Также на данной территории присутствует застройка с сохранившимися историческими скверами (Муравьевский сквер и др.). Кроме того, в этой части города расположены Печерский лесопарк, много скверов (Пелагеевский и Комсомольский скверы, сквер 740-летия г. Могилёва, сквер 40-летия Победы, сквер Туристов и др.), несколько крупных парков.

Доля зеленых насаждений в группе северо-восточных урболовандштадтов составляет 21 % от общей площади группы. Наибольший вес в процентном составе зеленых насаждений общего пользования имеют городские леса, расположенные на северной периферии комплекса. Распространение промышленной и жилой многоквартирной застройки привело к образованию множества мелких скверов и бульваров.

Группы южных и северо-западных урболовандштадтов озеленены незначительно (на 7 и 6 % соответственно). Характерной особенностью распространения насаждений является чередование густых и разреженных участков. Среди наиболее крупных озелененных территорий можно отметить Казимировский лесопарк в группе северо-западных урболовандштадтов и парк имени 60-летия Великого Октября в группе южных урболовандштадтов. Преобладание старой промышленной застройки, усадебных участков и создание новых микрорайонов не позволили системе озелененных территорий полноценно развиваться в этих частях города.

Вся система зеленых насаждений г. Могилёва депонирует 15 827,2 т в год (в стоимостном выражении 1 382 551,9 евро в год, или в среднем 116,7 евро на 1 га). В результате визуализации полученных значений объема депонирования углекислого газа можно проследить его различие по группам урболовандштадтов города (рис. 3).

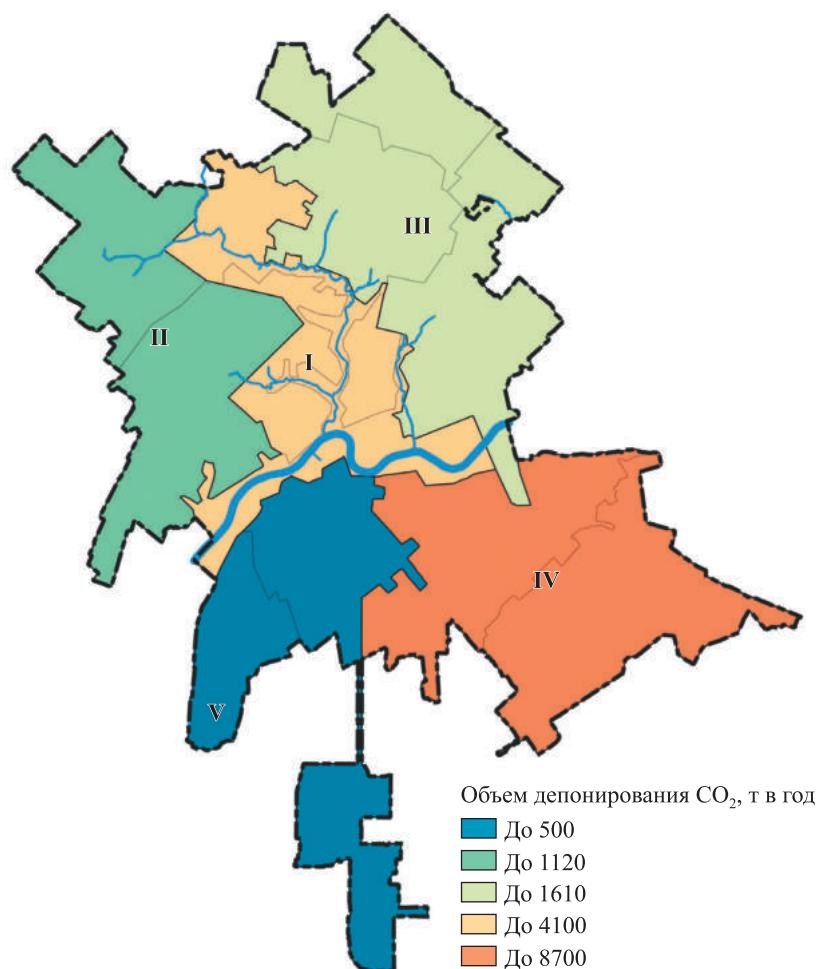


Рис. 3. Депонирование углекислого газа зелеными насаждениями групп урболовандштадтов г. Могилёва.

Группы урболовандштадтов (I–V) см. на рис. 1

Fig. 3. Carbon dioxide deposition by green spaces of the urban landscape groups of Mogilev.
Urban landscapes groups (I–V) see on fig. 1

Весомый вклад в общий объем накопленного углекислого газа вносят группы юго-восточных и центральных урболандшафтов, зеленые насаждения которых депонируют 8688,4 и 4089,4 т СО₂ в год, что составляет около 730 014,0 и 347 599,0 евро в год. Данные комплексы включают в себя большинство участков городского леса, где преобладают средневозрастные и спелые хвойные породы древостоев – сосна обыкновенная (*P. sylvestris*) и ель европейская (*P. abies*). Эти массивы накапливают до 3000 т СО₂. В пересчете на единицу площади (1 га) зеленые насаждения группы юго-восточных урболандшафтов депонируют около 3,2 т на 1 га (272,0 евро на 1 га), зеленые насаждения группы центральных урболандшафтов – 2,1 т на 1 га (178,5 евро на 1 га). Озелененные территории общего пользования в этих группах в среднем накапливают не более 100 т СО₂ в год (до 8500,0 евро в год).

Зеленые насаждения групп северо-западных и северо-восточных урболандшафтов поглощают 1113,1 и 1609,5 т СО₂ в год (94 613,0 и 138 807,5 евро в год) соответственно. На данной территории также основным поглотителем углекислого газа выступают участки городского леса, однако средний объем накопления СО₂ составляет не более 1000 т с участка в год. Объем депонирования углекислого газа на единицу площади городских комплексов для группы северо-западных урболандшафтов равен 0,5 т на 1 га (42,5 евро на 1 га), для группы северо-восточных урболандшафтов – 0,6 т на 1 га (51,0 евро на 1 га).

Наименьшее количество углекислого газа – 426,6 т в год (36 262,3 евро в год) – накапливают зеленые насаждения группы южных урболандшафтов. В этой группе отсутствуют городские леса, преобладает жилая усадебная и промышленная застройка, а породный состав насаждений ограничивается мало-продуктивными древостоями. Объем депонирования СО₂ на единицу площади составляет 0,2 т на 1 га (17,0 евро на 1 га).

Очевидно, что система городского озеленения нуждается в оптимизации в соответствии с существующими подходами, однако для более эффективного результата следует перейти к стадии детального анализа отдельных микрорайонов города. В первую очередь должны быть рассмотрены микрорайоны, где выявлены группы урболандшафтов с наименьшими объемами накопления СО₂, активным градостроительным развитием и перспективами для создания и улучшения существующих зеленых насаждений. Такой территорией является микрорайон Казимировка. Он располагается в западной части города и входит в группу северо-западных урболандшафтов, где озелененность территории составляет 6 %, а объем депонирования углекислого газа не превышает 1113,1 т в год (94 613,0 евро в год). Отличительными особенностями микрорайона являются отсутствие крупных промышленных объектов, загрязняющих атмосферу, и наличие свободных от застройки территорий. В микрорайоне преобладает жилая усадебная застройка площадью около 170 га. Происходит постепенное увеличение жилой много квартирной застройки. Последний Генеральный план г. Могилёва предполагает размещение еще около 180 га многоквартирной застройки. Развитие территории микрорайона, предусмотренное градостроительными документами, позволяет предложить вариант оптимизации системы озеленения, основанный на углерододепонирующей способности древостоев.

Система озеленения микрорайона Казимировка представлена в основном озелененными территориями жилой многоквартирной, жилой усадебной, общественно-деловой и производственной застройки. Общая площадь зеленых насаждений в микрорайоне составляет приблизительно 165 га с учетом квартала леса № 234, находящегося на юге (рис. 4).

Площадь озелененных территорий общего пользования (сквер на пересечении улиц Ровчакова и Краснозвездной) составляет не более 13 га, что не соответствует нормативу озелененности жилых микрорайонов (25 %)⁸. Общий объем депонирования углекислого газа зелеными насаждениями, по укрупненной оценке, составляет около 820 т в год (69 700,0 евро в год). Наибольшая плотность зеленых насаждений отмечена в центральной части микрорайона, так как она застраивалась с 1990-х гг. К настоящему времени древесные насаждения трансформировались в группы небольших древостоев. На территории микрорайона преобладают клен остролистный (*A. platanoides*), клен ясенелистный (*A. negundo*), осина обыкновенная (*P. tremula*), тополь черный (*P. nigra*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.) и плодовые деревья.

Участок древесно-кустарниковой растительности на севере микрорайона по правую сторону от Минского шоссе (в направлении г. Минска) представляет ценность в качестве источника древесной растительности для перспективного озеленения микрорайона. На этой территории преобладают береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.), береза повислая (*B. pendula*), осина обыкновенная (*P. tremula*) и ольха серая (*A. incana*). Для проектируемой жилой многоквартирной застройки (согласно Генеральному плану г. Могилёва) в соответствии с нормативом площадь озелененных территорий общего пользования должна

⁸Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности : ЭкоНиП 17.01.06-001-2017 : утв. М-вом природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь 18.07.2017 : ввод. в действие с 01.10.2017. Минск : Минприроды, 2023. 186 с.

составлять около 45 га. Для выполнения данного норматива предлагается создать озелененную территорию с высокой рекреационной нагрузкой площадью приблизительно 12 га вдоль ул. Грюнвальдской до ул. Льва Сапеги, а также озелененную территорию с низкой рекреационной нагрузкой площадью 33 га на базе участка с древесно-кустарниковой растительностью возле д. Новое Пацково (в перспективе войдет в состав городской черты).

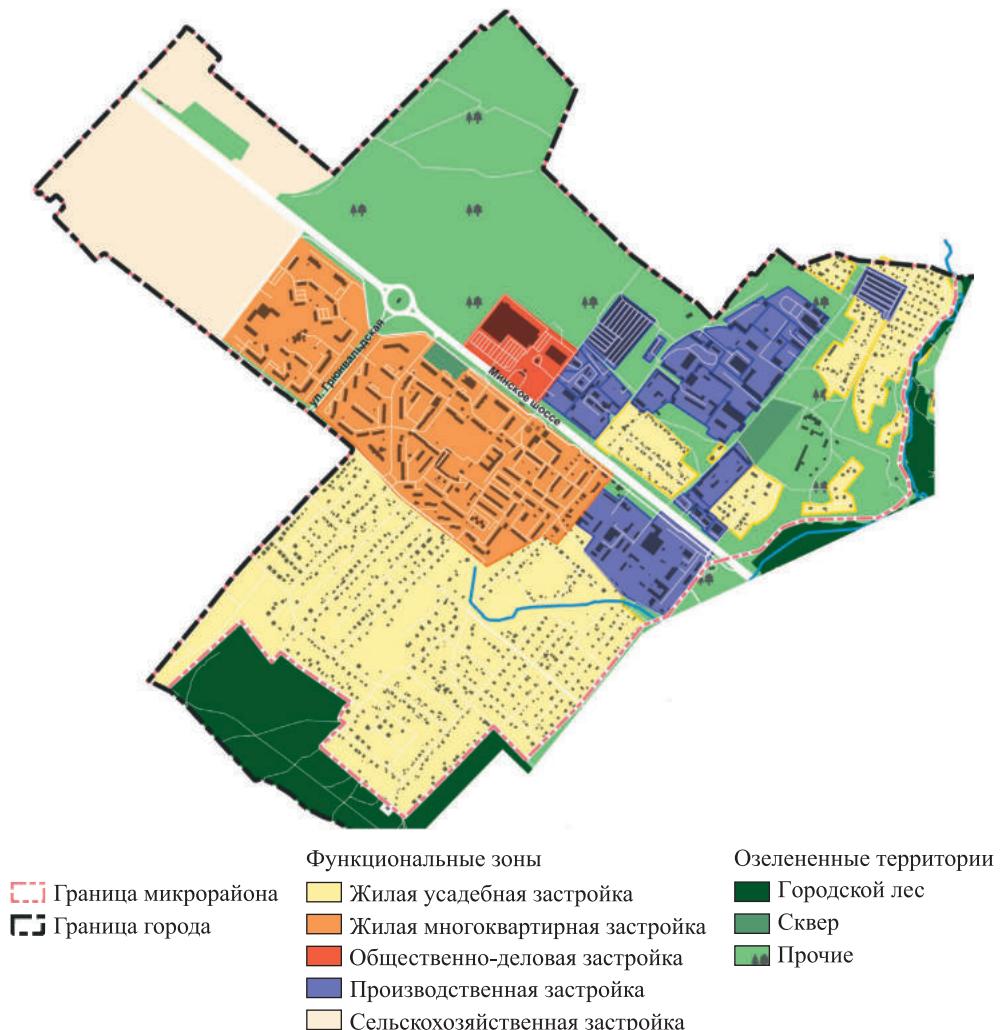


Рис. 4. Схема функционального зонирования микрорайона Казимировка

Fig. 4. Functional zoning scheme of the Kazimirovka microdistrict

Создание благоустроенных объектов озеленения на основе существующего массива древесно-кустарниковой растительности в северной части микрорайона является правильным стратегическим решением с экономической точки зрения, так как оно более выгодно, чем создание зеленых насаждений с нуля. Однако если развитие микрорайона продолжится, то с появлением новой жилой многоквартирной застройки площадью около 180 га для обеспечения нормы озеленения понадобится создать еще 50 га озелененных территорий. В этом случае применение подхода, основанного на учете объема накопления углекислого газа зелеными насаждениями, может быть более результативным. На основании данного предположения можно смоделировать абсолютное количество депонированного углекислого газа выбранными породами деревьев на период 10–55 лет (для лиственных пород) и до 100 лет (для хвойных пород).

Для реализации предложенного подхода выбрано пять пород деревьев: две хвойные – сосна и ель, две мягколиственные – береза и тополь, одна твердолиственная – клен. При развитии идеальной модели будет создано 50 га зеленых насаждений, которые могут располагаться как в границах одной рекреационной зоны, так и на всей территории жилого района. При равном соотношении посаженных площадей выбранных пород (каждой породе будет выделено 10 га (20 %) от необходимых 50 га озелененных территорий) получим объем депонирования CO_2 , приведенный в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Депонирование углекислого газа выбранными хвойными породами

Table 1

Carbon dioxide deposition by selected coniferous species

Порода	Объем депонирования CO ₂ , т в год				Средний объем депонирования CO ₂ , т в год	Общий объем депонирования CO ₂ за 100 лет, т
	Молодняки (до 40 лет)	Средневозрастные древостои (от 41 года до 60 лет)	Приспевающие древостои (от 61 года до 80 лет)	Спелые древостои (от 81 года до 100 лет)		
Сосна	162,4	118,2	122,4	119,0	130,5	13 328,7
Ель	228,4	160,9	155,7	161,5	176,6	13 338,6

Таблица 2

Депонирование углекислого газа выбранными лиственными породами

Table 2

Carbon dioxide deposition by selected deciduous species

Порода	Объем депонирования CO ₂ , т в год				Средний объем депонирования CO ₂ , т в год	Общий объем депонирования CO ₂ за 55 лет, т
	Молодняки (от 11 до 20 лет)*	Средневозрастные древостои (от 21 года до 30 лет)	Приспевающие древостои (от 31 года до 40 лет)	Спелые древостои (от 41 года до 55 лет)		
Береза	106,4	96,1	88,4	88,3	94,8	3853,6
Тополь	217,1	212,3	157,6	178,7	191,4	7784,7
Клен	95,9	94,6	87,6	89,1	91,8	5679,9

*До 20 лет для клена.

Общий объем депонирования CO₂ хвойными породами за 100 лет составит 26 667,3 т (в стоимостном выражении 2 266 729,0 евро), а средний объем накопления CO₂ – 266,7 т в год (22 669,5 евро в год). Для лиственных пород общий объем депонирования CO₂ за 55 лет будет равен 17 318,2 т (в стоимостном выражении 1 472 047,0 евро), средний – 314,9 т в год (26 758,0 евро в год).

Для достижения более эффективного результата при создании системы озелененных территорий наилучшим вариантом будет высадка уже подросших деревьев, поскольку они требуют меньше ухода непосредственно после посадки.

Комбинирование хвойных и лиственных пород при депонировании углекислого газа создает более гибкую кривую общего объема накопления CO₂. В то время как лиственные древостои только в приспевающем и спелом возрасте выходят на примерно одинаковый уровень поглощения CO₂, хвойные древостои компенсируют этот уровень за счет больших объемов поглощения CO₂ в течение всей жизни.

Соотношение площадей под посадку или пересадку предложенных пород может варьироваться в зависимости от изменения площади застройки, норм озеленения, внутриквартального расположения зданий и других факторов.

Исходя из результатов расчетов, мы получаем усредненный объем накопления углекислого газа выбранными для озеленения растениями, который показывает, что в долгосрочной перспективе эти насаждения могут накапливать в себе огромное количество диоксида углерода (около 30 тыс. т), что положительно скажется на окружающей среде и комфортности жизни человека.

Заключение

Представлены результаты оценки депонирования углекислого газа зелеными насаждениями общего пользования урбокомплексов г. Могилёва, а также предложен подход, учитывающий углерододепонирующую способность древостоев при озеленении городских территорий, который позволяет в перспективе повысить объем поглощения CO₂ в городе.

Анализ депонирования углекислого газа зелеными насаждениями общего пользования г. Могилёва показал, что зеленые насаждения групп юго-восточных и центральных урбокомплексов накапливают 8688,4 и 4089,4 т CO₂ в год, зеленые насаждения групп северо-западных и северо-восточных

урболандшафтов – 1113,1 и 1609,5 т СО₂ в год соответственно, зеленые насаждения группы южных урболандшафтов депонируют наименьшее количество углекислого газа – 426,6 т в год. Таким образом, комплексами с наименее благоприятной углерододепонирующей способностью зеленых насаждений являются южные (0,2 т на 1 га) и северо-западные (0,5 т на 1 га) урболандшафты, комплексами с наиболее благоприятной углерододепонирующей способностью зеленых насаждений – центральные (2,1 т на 1 га) и юго-восточные (3,2 т на 1 га) урболандшафты.

Стоимостная оценка накапливаемого углекислого газа варьируется от 36 262,3 евро в год в группе южных урболандшафтов до 730 014,0 евро в год в группе юго-восточных урболандшафтов. Стоимостное выражение депонированного диоксида углерода в пересчете на единицу площади в группах урболандшафтов находится в пределах от 17,0 до 272,0 евро на 1 га.

На основании проведенной оценки установлено, что способность древесных растений поглощать СО₂ зависит от породы, возраста, ежегодного среднего прироста фитомассы и площади произрастания. Анализ депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урболандшафтов также позволил выявить различия в количестве накапленного углекислого газа разными породами деревьев.

Определено, что наиболее эффективными по углерододепонирующей способности древесными породами являются ель и сосна, разновидности тополя и липы. Установлена взаимосвязь факторов, влияющих на объем поглощения углекислого газа деревьями: порода → возраст → максимальный средний прирост (включает запас и бонитет) → объем поглощения СО₂. Отмечена общая тенденция поглощения СО₂ различными возрастными группами лиственных насаждений, которая заключается в наращивании объемов депонирования углекислого газа до достижения деревьями среднего возраста, а затем плавном снижении уровня поглощения СО₂ по мере старения деревьев.

Предложен новый подход к организации системы озелененных территорий в развивающемся микрорайоне Казимировка, расположенному в пределах группы северо-западных урболандшафтов с небольшим уровнем озеленения (6 %) и депонирования углекислого газа (1113,1 т в год, или 94 613,0 евро в год). Для реализации этого подхода и создания системы устойчивого озеленения в микрорайоне отобрано пять пород деревьев: две хвойные – сосна и ель, две мягколиственные – береза и тополь, одна твердолиственная – клен. Далее смоделировано абсолютное количество депонированного углекислого газа выбранными породами деревьев на период 10–55 лет (для лиственных пород) и до 100 лет (для хвойных пород).

При реализации предложенной идеальной модели будет создано 50 га зеленых насаждений. В случае равного соотношения посаженных площадей выбранных пород (каждой породе будет выделено 10 га (20 %) от необходимых 50 га озелененных территорий) возможно получение следующего объема депонирования СО₂: 26 667,3 т (2 266 729,0 евро) за 100 лет при среднем значении 266,7 т в год (22 669,5 евро в год) для хвойных пород и 17 318,2 т (1 472 047,0 евро) за 55 лет при среднем значении 314,9 т в год (26 758,0 евро в год) для лиственных пород.

Комбинирование посадки хвойных и лиственных пород деревьев при создании системы озеленения позволит поддерживать общий уровень депонирования углекислого газа. В то время как лиственные древостои только в приспевающем и спелом возрасте выходят на примерно одинаковый уровень поглощения СО₂, хвойные древостои компенсируют его за счет больших объемов поглощения СО₂ в течение всей жизни.

Распространение предложенного подхода и увеличение площади средне- и высокопродуктивных пород зеленых насаждений общего пользования положительно скажутся на объеме депонирования углекислого газа в г. Могилёве, который может быть повышен в 2 раза.

Проведение оценки депонирования углекислого газа и разработка нового подхода к организации системы озеленения в городах представляют собой эффективную стратегию, основанную на интеграции различных аспектов территориального планирования и управления зелеными насаждениями.

Библиографические ссылки

1. Холл Д, Рао К. *Фотосинтез*. Литвин ФФ, редактор; Ганаго АО, переводчик. Москва: Мир; 1983. 134 с.
2. Boudewyn P, Song X, Magnussen S, Gillis MD. *Model-based, volume-to-biomass conversion for forested and vegetated land in Canada*. Victoria: Canadian Forest Service; 2007. VI, 115 p. Report No.: BC-X-411.
3. Heath LS, Nichols NC, Smith JE, Mills JR. *FORCARB2: an updated version of U.S. Forest carbon budget model*. Newtown Square: U. S. Forest Service; 2010. 52 p. Report No.: NRS-67.
4. Варапаева ОА, Смаль ЯГ, Мисюченко ВМ. Методика стоимостной оценки экосистемных услуг и биоразнообразия на примере лесных фитоценозов Брестской области. *Труды БГТУ. Серия 5, Экономика и управление*. 2019;1:59–64. EDN: GNMNXL.
5. Логинов АА, Лыков ИН, Васильева МА. Укрупненная оценка стоимости экосистемных услуг леса. *Проблемы региональной экологии*. 2018;3:120–124. EDN: XYXSLR.

6. Nowak DJ, Dwyer JF. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In: Kuser JE, editor. *Urban and community forestry in the Northeast*. 2nd edition. Dordrecht: Springer; 2007. p. 25–46.
7. Багинский ВФ, Лапицкая ОВ. Запас депонированного углерода как организационный элемент экологизированного лесопользования. *Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2018;2:37–43. EDN: RWGLQF.
8. Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 1997;387(6630):253–260. DOI: 10.1038/387253a0.
9. Costanza R, Daly HE. Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology*. 1992;6(1):37–46. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x.
10. de Groot RS. Environmental functions as a unifying concept for ecology and economics. *Environmentalist*. 1987;7:105–109. DOI: 10.1007/BF02240292.
11. de Groot RS, Wilson MA, Boumans RMJ. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*. 2002;41(3):393–408. DOI: 10.1016/S0921-8009(02)00089-7.
12. Lovell ST, Taylor JR. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States. *Landscape Ecology*. 2013;28(8):1447–1463. DOI: 10.1007/s10980-013-9912-y.
13. Wang Y, Chang Q, Li X. Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspaces by planting design: a case study in parks of Beijing. *Urban Forestry and Urban Greening*. 2021;64:127291. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127291.
14. Тихонова ТВ. Экосистемные услуги: роль в региональной экономике и подходы к оценке. *Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук*. 2016;3:134–143. EDN: WYMXRL.
15. Медведева ОЕ, Соловьева СВ, Медведев ПВ. Методика стоимостной оценки ущерба, причиняемого природным комплексам городов (парков), на основе оценки выполняемых ими экосистемных услуг на примере Москвы. *Вопросы оценки*. 2016;3:12–22. EDN: WTPQJN.
16. Неверов АВ, Варапаева ОА. Стоимостная оценка экосистемных услуг и биологического разнообразия. *Труды БГТУ. Серия 5, Экономика и управление*. 2013;7:95–100. EDN: SQTMQD.
17. Неверов АВ, Бахед ХА. Экосистемные услуги лесов Беларуси: физическое и стоимостное измерение. *Белорусский экономический журнал*. 2022;2:107–121. DOI: 10.46782/1818-4510-2022-2-107-121.
18. Счастная ИИ, Воробьев ДС. Оценка экосистемных услуг городских лесов г. Гродно (Беларусь). В: Лукина НВ, Гончаров АВ, Тихонова ЕВ, Браславская ТЮ, Тебенькова ДН, Алейников АА и др., редакторы. *Научные основы устойчивого управления лесами. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН; 25–29 апреля 2022 г.; Москва, Россия*. Москва: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук; 2022. с. 115–118.
19. Счастная ИИ, Рондак УА. Оценка экологического состояния и экосистемных услуг озелененных территорий общего пользования г. Жодино. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;2:24–34. EDN: FHIGHX.
20. Марцинкевич ГИ, Трофимчук ДА. Экосистемные услуги зеленых насаждений урбокомплексов города Молодечно. В: Федотов ВИ, Куролап СА, редакторы. *Современная экология: образование, наука, практика. Материалы Международной научно-практической конференции; 4–6 октября 2017 г.; Воронеж, Россия. Том 2*. Воронеж: Научная книга; 2017. с. 65–69.
21. Счастная ИИ, Никифоренко ВВ. История формирования и структура урбокомплексов г. Могилёва (Беларусь). В: Даудова СГ, Артамонова ОЕ, составители. *Наука молодых: вызовы и перспективы. Сборник материалов Всероссийской с международным участием научно-практической конференции в рамках мероприятий «Дни науки – 2021»; 12–16 апреля 2021 г.; Великий Новгород, Россия*. Великий Новгород: Новгородский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации; 2021. с. 395–400.
22. Счастная ИИ, Никифоренко ВВ. Зеленые насаждения урбокомплексов Могилёва и оценка их экосистемных услуг. *География*. 2023;4:29–36.

Получена 11.07.2024 / исправлена 06.03.2025 / принята 10.03.2025.
Received 11.07.2024 / revised 06.03.2025 / accepted 10.03.2025.

УДК 635.1/8

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ КУЛЬТУР ПО ВЫСОТНЫМ ЗОНАМ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АЗЕРБАЙДЖАНА НА ПРИМЕРЕ ГЯНДЖА-ДАШКЕСАНСКОГО И ГАЗАХ-ТОВУЗСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАЙОНОВ

A. A. АББАСОВА¹⁾

¹⁾*Институт географии им. академика Гасана Алиева,
пр. Г. Джавида, 115, AZ1143, г. Баку, Азербайджан*

Аннотация. Северо-западная часть Азербайджана признана важным центром возделывания технических культур, таких как подсолнечник, хлопок и сахарная свекла. В этом регионе за последнее десятилетие площади, выделяемые для выращивания технических культур, увеличились более чем в два раза, а производство этих культур возросло в шесть раз. На примере Гянджа-Дашкесанского и Газах-Товузского экономических районов рассматриваются структура технических культур и их распределение по высотным поясам в северо-западной части Азербайджана. Исследование проводилось с использованием региональных статистических данных и результатов анализа, выполненного в ходе обследования этой части страны. Благодаря применению такого комбинированного подхода удалось определить особенности выращивания технических культур на разных высотах и оценить урожайность этих культур. Подчеркивается, что хороших природных условий недостаточно для возделывания технических культур и необходимо использовать агротехнические приемы и инновационные подходы к выращиванию растений с учетом особенностей культуры.

Ключевые слова: экономический район; специализация сельского хозяйства; высотные пояса; структура производства технических культур; Азербайджан.

GEOGRAPHICAL FEATURES OF THE STRUCTURE AND PRODUCTION OF TECHNICAL CROPS BY ALTITUDE ZONES IN THE NORTH-WESTERN PART OF AZERBAIJAN ON THE EXAMPLE OF THE GANJA-DASHKASAN AND GAZAKH-TOVUZ ECONOMIC REGIONS

A. A. АББАСОВА^a

^a*Institute of Geography named after Academician Hasan Aliyev,
115 H. Javid Avenue, Baku AZ1143, Azerbaijan*

Abstract. The north-western part of Azerbaijan is recognised as an important center for the cultivation of technical crops such as sunflower, cotton and sugar beet. In this region, over the past decade, the area allocated for the cultivation of technical crops has more than doubled, and the production of these crops has increased six fold. Using the example of the

Образец цитирования:

Аббасова АА. Географические особенности структуры и производства технических культур по высотным зонам в северо-западной части Азербайджана на примере Гянджа-Дашкесанского и Газах-Товузского экономических районов. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;1:89–98 (на англ.).

EDN: OGDPXI

For citation:

Abbasova AA. Geographical features of the structure and production of technical crops by altitude zones in the north-western part of Azerbaijan on the example of the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;1:89–98.
EDN: OGDPXI

Автор:

Аида Акифовна Аббасова – сотрудник отдела международных отношений и связей с общественностью.

Author:

Aida A. Abbasova, employee at the department of international and public relations.
aida_abbasova_2015@mail.ru



Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions, the structure of technical crops and their distribution by altitude zones in the north-western part of Azerbaijan are considered. The study was conducted using regional statistical data and the results of the analysis carried out during the survey of this part of the country. By applying this combined approach, it was possible to determine the characteristics of growing technical crops at different altitudes and estimate the yield of these crops. It is emphasised that good natural conditions are not enough for the cultivation of technical crops and it is necessary to use agrotechnical methods and innovative approaches to growing plants taking into account the characteristics of the crop.

Keywords: economic region; agricultural specialisation; altitude zones; structure of technical crop production; Azerbaijan.

Introduction

The production of technical crops plays a crucial role in the sustainability of the country's economy. The development of technical horticulture is essential for the growth of other related sectors as a source of raw materials for food and light industry and also has a positive impact on the employment of the population. Currently, one of the most important issues is to ensure the growing development of this horticultural sector and to increase the export potential. In this respect, the efficient territorial organisation of technical crops, their quality to meet market requirements, export opportunities and research into problems in this field are of economic and geographical importance.

Recently, continuous reforms in the agricultural sector and the implementation of state programmes had a positive impact on the development of horticulture in the regions and have increased interest in the production of technical crops. A number of measures have been taken to stimulate the cultivation of such plants. According to the Decree «On stimulation of sugar beet production in the Republic of Azerbaijan» dated 4 April 2017, subsidies in the amount of 4 manats per 1 t of sugar beet delivered were paid to sugar beet growers, legal entities engaged in sugar beet processing and natural persons engaged in entrepreneurial activities without establishing a legal entity.

At present, subsidies are paid to farmers to encourage the cultivation of technical crops. In the case of sunflower, the subsidy is 240 manats per 1 ha planted and 86 manats for replanting. The subsidy for farmers is 170 manats per 1 t of cotton delivered to the delivery points, 18 manats per 1 t of wet tobacco and 12 manats for sugar beet.

Some of the technical crops have developed rapidly in the north-western part of Azerbaijan in recent years and have become some of the region's specialist crops. In fact, this area ranks first in the country in sugar beet and sunflower production. At present, the high market demand for products from these crops and the increasing cost of imported products require continuous development in this area. The survey conducted in the north-western part of Azerbaijan showed that there are difficulties in developing these horticultural areas in the administrative districts. These problems will be studied and the necessary support will be provided to overcome them.

In addition, in 2023 Azerbaijan exported 69.4 thsd t of cotton fibre, 11.2 thsd t of cotton fabrics, 31.8 thsd t of sugar, 5.5 thsd t of vegetable oils and 3.0 thsd t of tobacco. Total earnings from the export of these products amounted to 193.5 mln US dollars. At the same time, the country imported 258.7 thsd t of raw sugar, 121.2 thsd t of vegetable oils, 7.2 thsd t of tobacco and 367.2 mln units of cigarettes, for which it spent 413.6 mln US dollars [1].

Productive areas of the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions, agroclimatic conditions and traditional working habits of the population in agriculture have paved the way for territorial organisation and development of technical horticulture.

In the north-western part of Azerbaijan there are potential opportunities for the growth of technical crops and, that in the future, they may have a significant impact on the local demand of the region and reduce the population's dependence on imports. At present, there is a high demand for oils obtained from technical crops. The recent increase in prices on the domestic market and the weakening of the population's purchasing power require us to implement reforms aimed at increasing the production of technical crops. In this research, we have studied the current state of technical crops in the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions and their organisation by altitude zones depending on the landscape.

Research methodology

Modern agriculture, natural-geographical and economic factors influencing its development and economic potential have been studied on the basis of sources related to the north-western part of Azerbaijan. In addition, the agricultural location by altitude zones and the current situation were studied on the basis of statistical data related to this field. In the article the works of Azerbaijan scientists and researchers [2–8] on agriculture, the

data of the State Statistics Committee of the Republic of Azerbaijan¹ [1; 9; 10] and the author's research were used as a source of information. Azerbaijani scientists are constantly studying agriculture, territorial organisation, development potential and current situation of the country. They also conduct research on technical crops and other areas of plant production.

Researches on technical crops have been conducted in many countries of the world [11–17].

This article analyses the current status of technical crops and their location by altitude zone in the north-western part of Azerbaijan. Statistical data and a survey carried out in this area were used to determine the development characteristics of technical crops.

Results and discussion

The studied economic regions of Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz with 5.0 and 4.6 % of the share of technical crops respectively rank fourth and fifth after the economic regions of Mil-Mughan (34.6 %), Karabakh (23.6 %) and Shirvan-Salyan (21.9 %).

In the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions, the share of technical crops is 7.4 and 4.3 % of the total agricultural crop area respectively. Technical crops are mainly grown in the Samukh (24.0 %) and Goranboy (70.0 %) administrative districts of the Ganja-Dashkasan economic region, and in the Tovuz (23.5 %), Shamkir (27.8 %) and Aghstafa (47.0 %) administrative districts of the Gazakh-Tovuz economic region [9].

Technical crops are mainly spring sown crops and cereals. Technical crops such as sunflower, sugar beet, cotton and tobacco are grown in small quantities in the north-western part of Azerbaijan (fig. 1). It should be noted that in the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions, sunflower accounts for 58.9 % of the total area under technical crops, cotton – 14.2 %, sugar beet – 16.2 % and tobacco – 0.6 % [4].

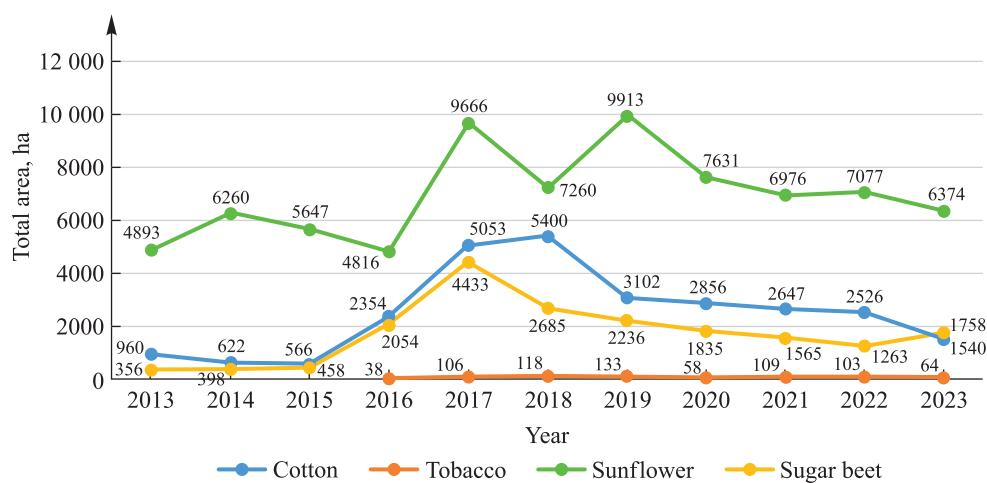


Fig. 1. The dynamics of technical crop cultivation over 10 years in the north-western part of Azerbaijan, ha.

Source: [9]

The line graph compares the changes in the four main areas in terms of the total area under technical crops in the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions over 10 years. It can be seen that the indicators for the total area of technical crops are unstable between 2013 and 2023. All crops increase over 10 years. From 2013 to 2017 there was a sharp increase in sunflower crops. This level seems to be maintained in 2019, then the indicators for sunflower decrease slightly. Since 2013, 960 ha of cotton was slowly decreasing, then jumped roughly, reached 5400 ha. After 2018, the indicators for cotton decreased slightly and currently cotton plants occupy 1540 ha. The indicators for sugar beet increased rapidly from 2013 to 2017, then decreased dramatically. The indicators for tobacco increased gradually over 10 years.

Tobacco cultivation started in 2016 and increased from 38 to 64 ha. Sunflower, cotton, and sugar beet are the most variable crops.

The pie charts (fig. 2) show the main changes in technical crops and production over 10 years. In 2013, a very large majority of plantations was cultivated sunflower, accounting for almost four-fifths. Cotton accounted for less than a fifth. Sugar beet accounted for about one in twenty. But in 2023, these indicators changed. Although sunflowers still account for a significant proportion of the area, just over three-fifths, sugar beet is about one-fifth and cotton is almost one-fifth.

¹Strategic roadmap for the production and processing of agricultural products in the Republic of Azerbaijan [Electronic resource] : approv. by Decree of the President of the Repub. of Azerbaijan of 6 Dec. 2016 No. 1138 // Faolex / Food and Agriculture Organisation of the United Nations. Baku, 2016 (in Azerb.).

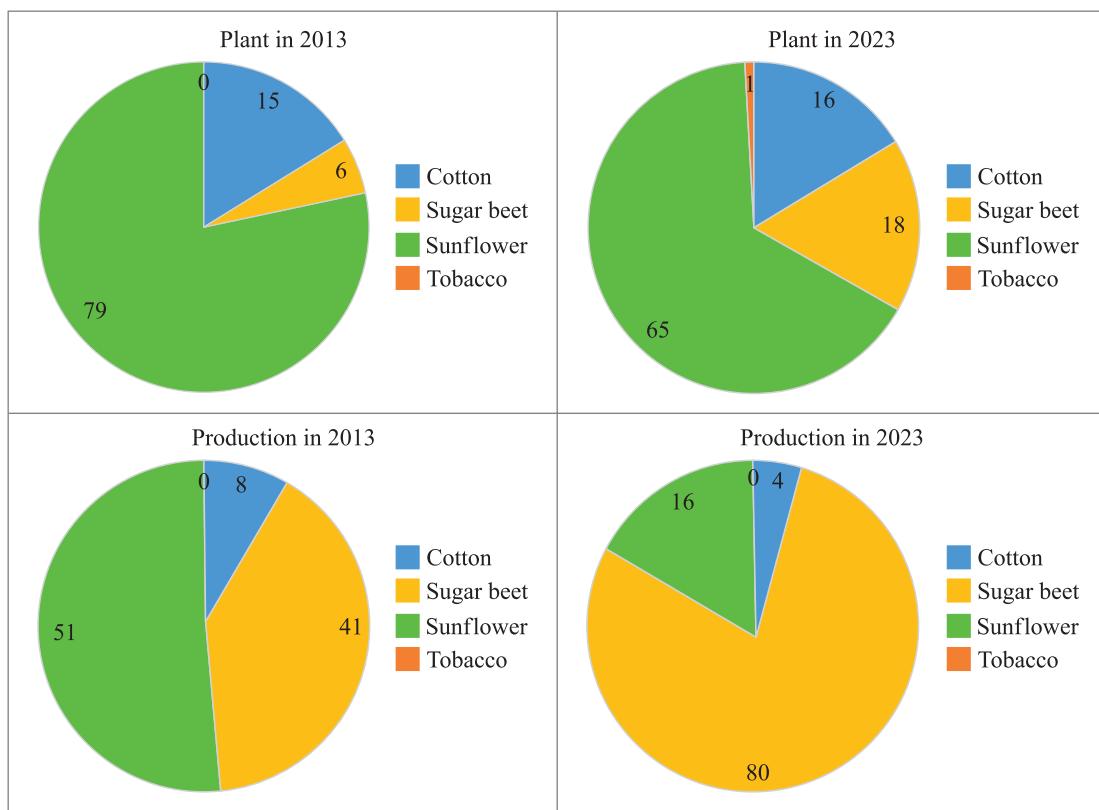


Fig. 2. Proportions of technical facilities and production in 2013 and 2023 in the north-western part of Azerbaijan, %
 (according to [9], modified)

Note that, the production indicators in these years are different than those for technical crops. As can be seen, in 2013, sunflower indicators production is more than half, sugar beet indicators production is more than two-fifths and cotton indicators production is just under a tenth. But currently a very large majority part of the pie charts is sugar beet, it is four-fifths. This is due to the increased productivity of sugar beet in recent years (see fig. 2).

Cereal sunflower has recently become one of the most specialised technical crops in the north-western part of Azerbaijan. In the world agricultural system, the area under sunflower cultivation is about 14–15 mln ha. This plant is grown mainly in Argentina, Bulgaria, Georgia, Hungary, India, Kazakhstan, Moldova, Russia, Ukraine and the USA [6].

In Azerbaijan, sunflower is grown mainly in the north-western part of the country. Thus, about two-thirds of the country's sunflower area and production is located in this area.

Sunflower is one of the specialised technical crops in the economic regions. A significant proportion of sunflower (65 %) is produced in the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions (fig. 3) [10].

The results of the study are presented below according to the share of areas occupied by technical crops.

The north-western part of Azerbaijan has favourable conditions for growing sunflower, which is an oil plant. Widespread chestnut and grey forest soils are considered fertile for sunflower cultivation.

Sunflower is a light demanding crop. Sunflower requires a temperature of 2600–2850 °C during the ripening period (100–150 days). Although it can tolerate temperatures of 8–34 °C, the optimum temperature is considered to be 20–25 °C. When sowing, the temperature should be 8–10 °C. For this reason, it is planted in April – May and harvested in September – October. Sunflower is grown after autumn wheat and maize in alternating intercrops, and after barley and spring wheat in weed-free fields.

In Ganja-Dashkasan economic region, 30.9 % of the sunflower area is located up to 200 m. This area has the highest productivity rate of about 38.1 centner/ha. Sunflower is mainly grown here under irrigated conditions. Sunflowers are not grown in this altitude zone in the Tovuz-Gazakh economic region (fig. 4 and 5, table 1).

Sunflower is grown in all districts except Dashkasan. In particular, it is grown in the districts of Shamkir (972 ha), Samukh (1319 ha), Aghstafa (1263 ha) and Goranboy (2349 ha), among which Goranboy stands out. Goranboy district accounts 53.8 % of sunflower production in the Ganja-Dashkasan economic region, and 23.7 % of the area and 24.3 % of production in the republic.

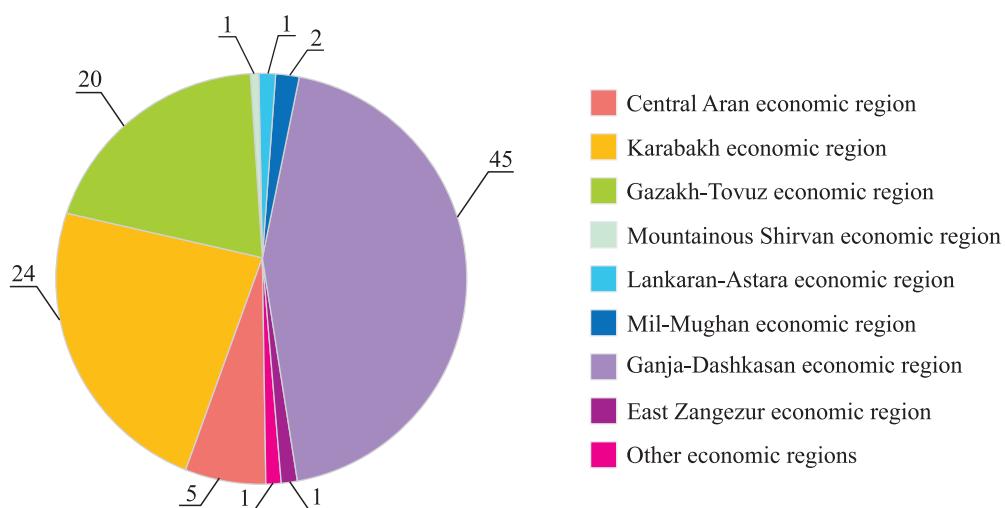


Fig. 3. Distribution of sunflower production in the Republic of Azerbaijan in 2023 by economic regions, % (according to [9], modified)

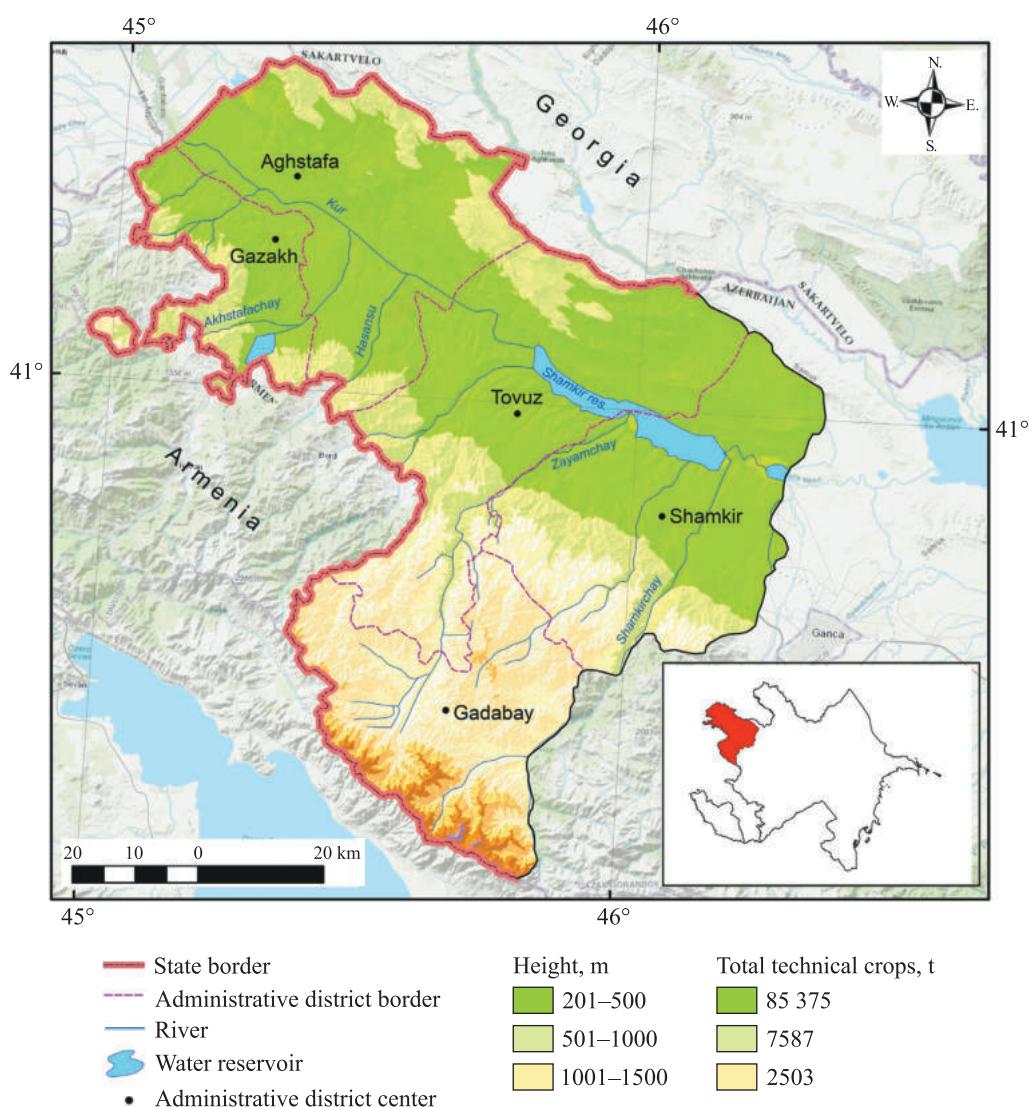


Fig. 4. Location of technical plants in the Gazakh-Tovuz economic region

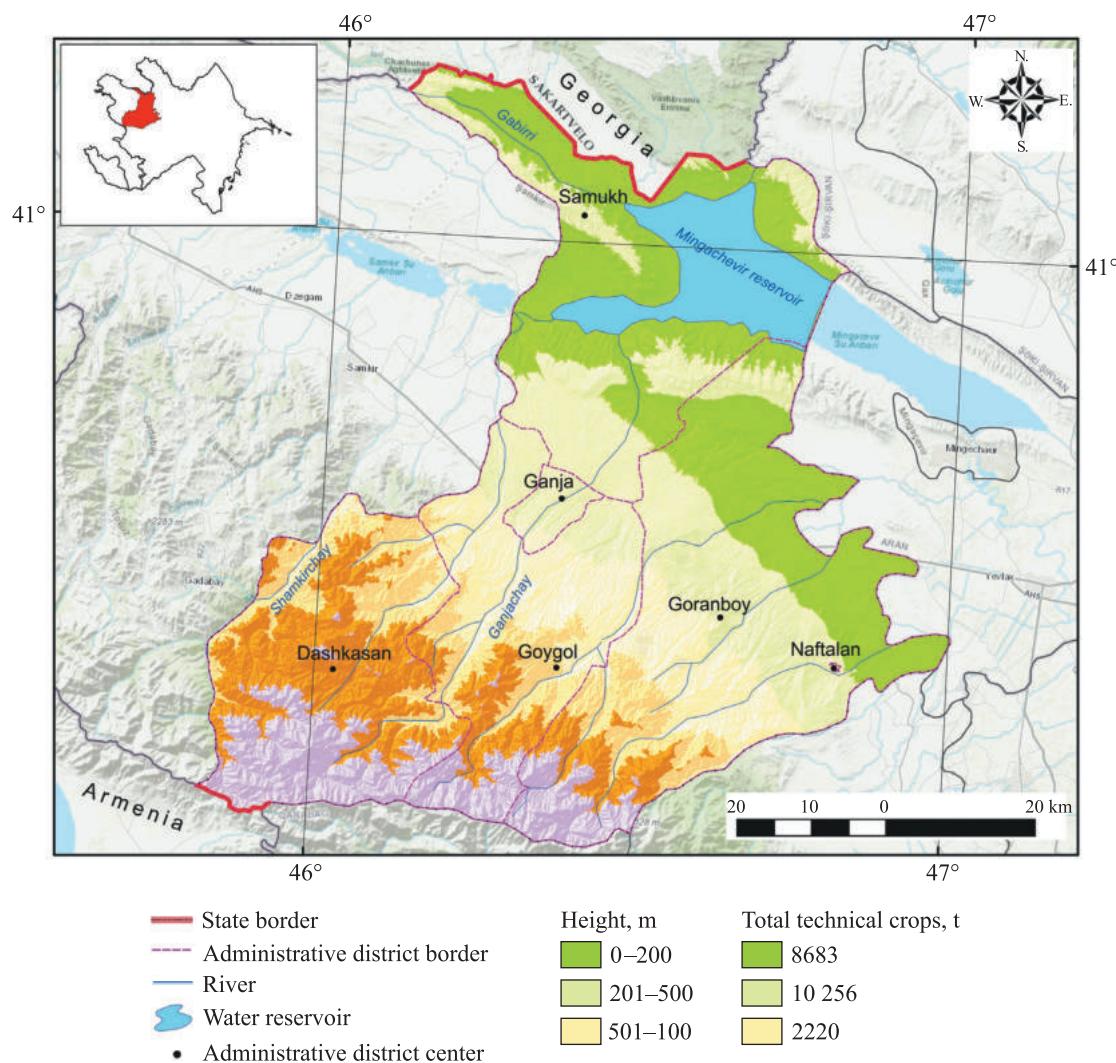


Fig. 5. Location of technical plants in the Ganja-Dashkasan economic region

Table 1

Total location and production of sunflower in the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions by altitude zones in 2023

Altitude zones, m	Cultivated area		Production		Productivity, centner/ha
	Area, ha	Share, %	Volume, t	Share, %	
<i>Ganja-Dashkasan economic region</i>					
1–200	1231.2	30.9	4694.7	36.8	38.1
201–500	2362.7	59.3	7054.8	55.3	29.9
501–1000	390.5	9.8	1007.8	7.9	25.8
<i>Total</i>	<i>3984.4</i>	<i>100</i>	<i>12 757.3</i>	<i>100</i>	<i>31.3</i>
<i>Gazakh-Tovuz economic region</i>					
201–500	2255.6	94.4	5301.8	93.5	23.5
501–1000	105.1	4.4	289.2	5.1	27.5
1001–1500	28.7	1.2	79.4	1.4	27.7
<i>Total</i>	<i>2389.4</i>	<i>100</i>	<i>5670.4</i>	<i>100</i>	<i>26.2</i>

Note. Calculated on the basis of data from the statistical offices of the administrative districts of the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions.

It should be noted that sunflowers need more water than other crops. Spring crops need at least four waterings. This can be reduced to three times if the weather is cool. However, the first and last waterings are very important. Productivity is low when water is scarce. If sunflower fields are irrigated as much as needed, their yield per hectare can increase by 100 %.

If farmers have good irrigation plants during the ripening period in sunflower growing areas, both the yield per hectare and the amount of oil in the pods increase significantly. At the end of some research, it was found that while the average yield in drought conditions is 1500–1600 kg/ha, 2750–3000 kg/ha can be obtained if the sunflower field is properly irrigated and 3500–4000 kg/ha if it is irrigated four times.

If we look at the location of the sunflowers, we can see that they are planted at an absolute altitude of 201–500 m. This zone has the lowest sunflower productivity in the north-western part of Azerbaijan (23.5 centner/ha). However, these rates vary from one district to another. After studying the differences between the administrative districts, it can be seen that the low productivity is linked to some problems in the administrative districts such as the failure to meet the demand for irrigation water, the lack of experience and expertise in horticulture and the poor organisation of maintenance.

At altitudes between 501–1000 m above sea level, 9.8 % of sunflowers are planted in the Ganja-Dashkasan economic region, and 4.4 % of sunflower are planted in the Gazakh-Tovuz economic region, accounting for 7.9 and 5.1 % of the total production. This zone has the lowest sunflower productivity (25.8 centner/ha in the Ganja-Dashkasan economic region) in the north-western part of Azerbaijan.

The last highland where sunflowers are grown is located at an absolute altitude of 1001–1500 m above sea level. This zone occupies only 1.2 % of the area of the Gazakh-Tovuz economic region. The share of this zone in sunflower production is 1.4 % of the total production of the Gazakh-Tovuz economic region. Productivity is 27.7 centner/ha.

One of the products exported by Azerbaijan is vegetable oils, more than half of which is sunflower (safflower) oil. As the country is competitive in the export of oils, it can reduce its dependence on imports by developing the horticultural sector².

Cotton is one of the most widely used crops for industrial and animal feed. The main cotton producing countries in the world are China, India, the USA, Brazil, Australia, Turkey, Pakistan, Uzbekistan and Egypt. These countries account for about 80 % of world production [18]. In fact, cotton accounts for almost half of the fibres used in the global textile industry. With an annual economic impact of 600 bln US dollars worldwide, cotton fibre is a well-known and leading in the textile industry [19]. Cotton fibre is mainly produced from cotton plants. In their wild form they are perennial woody shrubs and trees, but cultivated cotton is primarily an annual plant.

The cotton cocoons and seeds found in Mingachevir can be a good proof that this plant has been cultivated in our country since the 5–6th centuries. It is also known that in a number of cities of Azerbaijan, including Ganja and Shamkir, cotton fabrics were produced and exported³.

Cotton has long been grown in the Samukh and Goranboy administrative districts of the Ganja-Dashkasan economic region. Thus, 19.9 % of the technical crops in the Ganja-Dashkasan economic region are cotton crops. The cotton plant has a high demand for light and heat. Although the solar radiation (2100–2400 h) is sufficient for the growth of cotton in the plain areas of the Ganja-Dashkasan economic region, due to the increasing cloudiness towards the middle highlands, the amount of radiation balance gradually decreases and the environment for the growth of the plant is created. Cotton can reach its potential productivity under dry seasonal conditions. In general, dry seasonal conditions and high temperatures last for a short period of time in the lowland areas of the Ganja-Dashkasan economic region, that prevents cotton from being fully productive [20].

The time from sowing to the onset of maturity is about 125–140 days for medium fibre varieties. For fine varieties, this period is about 145–160 days. The optimum temperature for good cotton growth and yield, including seed germination, is 25–30 °C. If the temperature falls below 25 °C, plant growth slows down. In the first stage of plant development, i. e. in the period before budding, raising the temperature to 30 °C accelerates cotton development, but if the daily temperature drops to 10–12 °C, the life processes in the plant stop. There is also a certain difference in the heat requirements of different varieties. While the seeds of some varieties germinate at a temperature of 7–8 °C, others require a temperature of 10–15 °C for germination [21].

In 2023, 1.5 thsd ha of cotton were grown in the Ganja-Dashkasan economic region, that is about 1.6 % of the total cotton area in the country. These plantations are located in the Goranboy district. Cotton is grown in two altitudinal zones in this region. More than four-fifths of the cotton area is located in the lowlands at an altitude of up to 200 m. Thus, 81.6 % (1.3 thsd ha) of the cotton area and 84.0 % of the production (3.5 thsd t) are concentrated in this zone, where the productivity is 28.2 centner/ha.

²Strategic roadmap for the production and processing of agricultural products in the Republic of Azerbaijan [Electronic resource] : approv. by Decree of the President of the Repub. of Azerbaijan of 6 Dec. 2016 No. 1138 // Faolex / Food and Agriculture Organisation of the United Nations. Baku, 2016 (in Azerb.).

³Cotton // Ministry of Agriculture of the Republic of Azerbaijan : website. URL: <https://www.agro.gov.az/az/bitkicilik/texniki-bitkiler> (date of access: 15.12.2024).

The 201–500 m altitude zone is the second zone, where 18.4 % of the cotton area (0.3 thsd ha) and 16.0 % of the cotton production (0.7 thsd t) are concentrated. Productivity is 23.8 centner/ha.

In connection with cotton growing, there are cotton mills in the town of Delimammadli and a cotton factory in the town of Ganja, which play an important role in the development of light industry in the Ganja-Dashkasan economic region. Despite the fact that there are favourable conditions for the development of cotton growing in the plain areas of the economic region, the lack of water has led to a reduction in the crop in recent years. It should be noted that the effectiveness of all agrotechnical works carried out in cotton cultivation directly depends on the satisfaction of the plant's needs for moisture [3; 22].

One of the technical crops grown in the north-western part of Azerbaijan is sugar beet, which is a plant of the mild climate zone and is used both for sugar production and as a nutrient in cattle breeding. In the north-western part of Azerbaijan, 12.8 % of the technical crops are sugar beet. Despite the fact that there were opportunities to obtain 250–300 centner/ha, no attention was paid to the cultivation of this plant in our republic for a long time [23].

Sugar beet is a raw material for obtaining sugar. Thus, 40 % of the world sugar production comes from sugar beet [7].

World sugar production is about 160 mln t per year with per capita consumption of about 23 kg. Sugar beet yields better in temperate climates, particularly in areas such as France, Germany and the northern USA. After the first sugar beet plants produced sugar in the early 1800s, sugar from beets and cane completed the market [14]. The first and only sugar factory of Azerbaijan was commissioned in 2006 in the Imishli administrative district. The factory's daily sugar beet processing capacity has reached 10 000 t⁴.

Since 2006, sugar beet cultivation has started in the Shamkir administrative district (110 ha) of the Gazakh-Tovuz economic region and in the Goranboy administrative district (47 ha) of the Ganja-Dashkasan economic region (fig. 6). Since 2012, there has been a growing interest in this area and the area under cultivation has been gradually expanded. Currently, more than a third of the country's sugar beet area (about half of its production) is located in the Gazakh-Tovuz economic region.

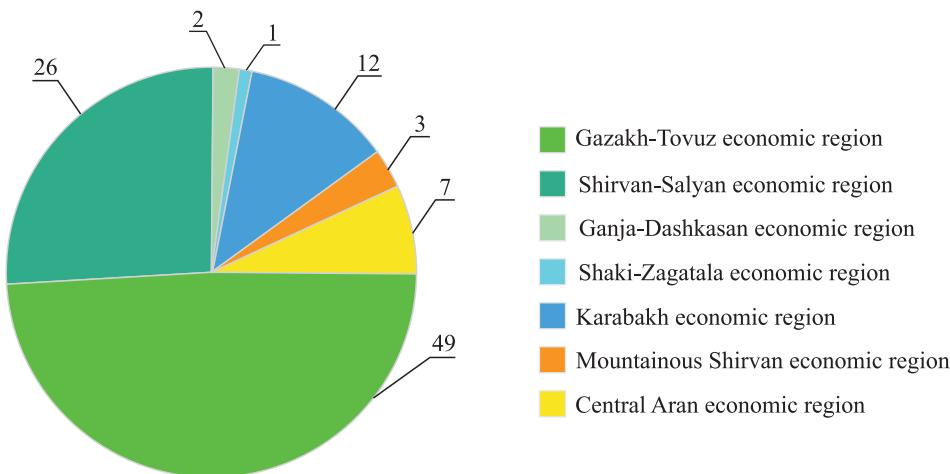


Fig. 6. Distribution of sugar beet production in the Republic of Azerbaijan in 2023 by economic regions, % (according to [9], modified)

The productivity of sugar beet is 621.5 centner/ha in the Samukh administrative district of the Ganja-Dashkasan economic region and 673.8 centner/ha in the Tovuz administrative district of the Gazakh-Tovuz economic region, which is higher than the overall productivity of the republic (446.2 centner/ha).

Sugar beet cultivation in upland areas covers four zones in the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions (table 2).

In the Ganja-Dashkasan economic region, 17.9 % of the sugar beet area and 10.8 % of the production are concentrated in the lowlands with an absolute altitude of up to 200 m.

The highland areas with an absolute altitude of 201–500 m are the main sugar beet growing areas. Thus, 59.9 % of the sugar beet area (60.1 % of production) in the Ganja-Dashkasan economic region and 83.5 % of the sugar beet area (89.2 % of production) in the Gazakh-Tovuz economic region respectively are located in this altitude.

⁴State programme of socio-economic development of the regions of the Republic of Azerbaijan (2004–2008 years) / Minist. of Econ. and Industry of the Repub. of Azerbaijan. Baku : Minist. of Econ. and Industry of the Repub. of Azerbaijan, 2009. 204 p. (in Azerb.).

In the 501–1000 m, 22.2 % of the sugar beet area (29.1 % of production) in the Ganja-Dashkasan economic region and 12.6 % of the sugar beet area (8.1 % of production) in the Gazakh-Tovuz economic region are located.

In the Gazakh-Tovuz economic region, 3.9 % of the area under sugar beet and 2.7 % of production are concentrated between 1001–1500 m altitude.

Table 2

Total location and production of sugar beet in the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions by altitude zones in 2023

Altitude zones, m	Cultivated area		Production	
	Area, ha	Share, %	Volume, t	Share, %
<i>Ganja-Dashkasan economic region</i>				
1–200	17.9	17.9	449.9	10.8
201–500	60.1	59.9	2503.6	60.1
501–1000	22.3	22.2	1212.3	29.1
<i>Total</i>	<i>100.3</i>	<i>100</i>	<i>4165.8</i>	<i>100</i>
<i>Gazakh-Tovuz economic region</i>				
201–500	1383.8	83.5	80 072.8	89.2
501–1000	208.8	12.6	7271.2	8.1
1001–1500	64.6	3.9	2423.7	2.7
<i>Total</i>	<i>1657.2</i>	<i>100</i>	<i>89 767.7</i>	<i>100</i>

Note. Calculated on the basis of data from the statistical offices of the administrative districts of the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions.

There are favourable conditions for the cultivation of this economically efficient crop in the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions. The development of horticulture can make a significant contribution to increasing production and satisfying the demand for sugar on the domestic market and in the domestic economy.

It should be noted that in the enterprise «Region Agropark», located on the territory of the Ganja-Dashkasan economic region, besides other agricultural crops, technical crops are also grown. In 2018–2019, 192 ha of cotton and 323 ha of sugar beet were planted in the enterprise «Region Agropark». Cotton production was 0.2 thsd t and sugar beet production was 6.7 thsd t.

Among the technical crops, tobacco is grown in small quantities in the region, accounting for about 1.8 % of the total tobacco crop in the country.

Tobacco originated in America. It is now grown in many countries around the world, particularly in China, India, Brazil, Indonesia and the USA. For tobacco seeds to swell and germinate, the environment must have the right level of humidity (not less than 80 %). The optimum temperature for seed germination is 25–28 °C. Under such temperature and humidity conditions, it takes 1 day for the seed to swell and 2–3 days for the sprouts to appear on the soil surface. The minimum temperature for colouring is 10–11 °C, the optimum conditions for the ripening phase of the plant are 23–28 °C of the average daily air temperature and the maximum temperature is 35 °C. If the temperature drops to –2...+3 °C, frost will destroy the tobacco plant during the growing season. Tobacco is a relatively drought tolerant crop.

Tobacco plantations account for 0.4 % of technical crops in the north-western part of Azerbaijan. Tobacco is labour intensive and less profitable than other agricultural crops. It should be noted that 54 % of the total population of this area lives in rural areas. Therefore, agriculture is an important part of the population's employment in the economic sectors. In this respect, the development of tobacco growing is of great importance for the north-western part of Azerbaijan [2].

In 2023, a total of 0.8 % of the country's tobacco was produced in the north-western part of Azerbaijan, with a productivity of 29.8 centner/ha in the Gazakh-Tovuz economic region, which is higher than the total productivity of the republic (23.1 centner/ha).

In total, 63 ha of tobacco were grown in the north-western part of Azerbaijan producing 49.9 t of crop. Of this, 55 ha of tobacco were grown in the Tovuz administrative district of the Gazakh-Tovuz economic region producing 26.1 t of this crop and 8 ha of tobacco were grown in the Goranboy administrative district of the Ganja-Dashkasan economic region producing 23.8 t of this crop. Tobacco is mainly grown at altitudes between 201–500 m.

The development of technical crops by altitude zones creates conditions for the effective use of soil-climatic resources and the increase of employment of the population, including the development of processing institutions. It also stimulates the development of entrepreneurship in the north-western part of Azerbaijan.

It should be noted that, as in other areas of horticulture, there are some difficulties in growing technical crops. In particular, lack of irrigation water, inappropriate irrigation, infrequent use of the intercropping system and lack of control of plant pests and diseases reduce productivity. Agrotechnical measures need to be applied in a timely and appropriate manner to increase productivity.

Conclusions

The study of the cultivation and production of technical crops and the organisation of altitude zones in the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions shows that there are plenty of opportunities for sufficient development of this sector in the north-western part of Azerbaijan. The analysis of the location and modern condition of technical crops in the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions shows that in the last 10 years attention has been paid to the cultivation of technical crops on the territory of the north-western part of Azerbaijan and their production has increased. In particular, this region has become the main producer of sunflower and sugar beet in the country. Thus, in 2023, more than two-fifths of the country's sugar beet production fell to the Gazakh-Tovuz economic region, and almost two-thirds of the country's grain sunflower production fell to the Ganja-Dashkasan economic region. The main altitude zone where technical crops are grown and produced is between 201–500 m absolute altitude. Only 81.6 % of cotton plantations and 84.0 % of production are concentrated on plains with an absolute altitude of up to 200 m. This is due to the favourable natural conditions for growing this crop at these altitudes. In the Gazakh-Tovuz and Ganja-Dashkasan economic regions, it is possible to solve problems in the field of technical horticulture and achieve high productivity by correct use of natural and economic factors. In these economic regions, it is appropriate to pay attention to all areas of technical crops to use productive varieties and to apply progressive achievements in this field.

References

1. State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan. *The foreign trade of Azerbaijan*. Baku: State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan; 2024. 214 p.
2. Gurbanzade AA. *Agricultural geography of Azerbaijan*. Baku: Cooperation; 2011. 256 p. Azerbaijani.
3. Abasov ID. *Agriculture of Azerbaijan and the world countries*. Baku: East-West; 2013. 712 p. Azerbaijani.
4. Zeynalli AT. *Modern problems of agricultural geography of Azerbaijan*. Baku: Science; 2005. 391 p. Azerbaijani.
5. Humbatov HS, Shabanov MJ, Verdiyeva RJ. *Juicy feed plants*. Baku: Nurlan; 2013. 152 p. Azerbaijani.
6. Humbatov HS, Bashirov VV, Mohumayev VR. *Oily and essential oil plants*. Baku: Science and Education; 2016. 248 p.
7. Humbatov HS, Babazade AR. *Sugar beet*. Baku: [s. n.]; 2019. 104 p.
8. Khalilov KhG. *Cotton fiber technology*. Baku: Nurlan; 2012. 231 p.
9. State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan. *Agriculture of Azerbaijan*. Baku: State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan; 2024. 701 p. Azerbaijani.
10. State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan. *Regions of Azerbaijan. Statistical compilation*. Baku: State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan; 2024. 849 p. Azerbaijani.
11. Schneiter AA. *Sunflower technology and production*. Madison: American Society of Agronomy; 1997. 825 p. DOI: 10.2134/agronmonogr35.
12. Лукомец ВМ, Кривошлыков КМ. Производство подсолнечника в Российской Федерации: состояние и перспективы. *Земледелие*. 2009;8:3–6. EDN: KYLMBV.
13. Чалова ОН. Проблемы и перспективы выращивания семян подсолнечника в Пензенской области. *Региональная экономика: теория и практика*. 2011;20:40–47. EDN: NTRKCX.
14. Biancardi E, McGrath JM, Panella LW, Lewellen RT, Stevanato P. Sugar beet. In: Bradshaw J, editor. *Root and tuber crops*. New York: Springer; 173–219 (Handbook of plant breeding; volume 7). DOI: 10.1007/978-0-387-92765-7_6.
15. Калиничева ЕЮ. Стратегия развития свеклосахарного производства в регионе. *Региональная экономика: теория и практика*. 2010;17:47–52. EDN: LKYAPT.
16. Blaise D. Effect of tillage systems on weed control, yield and fibre quality of upland (*Gossypium hirsutum* L.) and Asiatic tree cotton (*G. arboreum* L.). *Soil and Tillage Research*. 2006;91:207–216.
17. Xufu Zhao, Clem Tisdell. A comparative economic study of China's and Australia's cotton production. *Economic Theory, Applications and Issues*. 2009;53:1–37.
18. Humbatov HS, Khalilov KhG. *Technical plants*. Baku: Aytac; 2010. 415 p. Azerbaijani.
19. Khan MA, Wahid A, Ahmad M, Tahir MT, Ahmed M, Ahmad S, et al. World cotton production and consumption: an overview. In: Ahmad S, Hasanuzzaman M, editors. *Cotton production and uses*. Singapore: Springer; 2020. p. 1–8.
20. Prikhodko D, Sterk B, Ishihara Y, Mancini F, Mumjinjanov H, Weissen H. *Azerbaijan: cotton sector review*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2019. 134 p.
21. Seyidaliyev N. *Basics of cotton farming*. Baku: East-West; 2012. 324 p. Azerbaijani.
22. Mammadov RM, editor. *Problems of territorial organization of light industry in Azerbaijan*. Baku: Avropa; 2017. 170 p. Azerbaijani.
23. Pashayev NA, Ayyubov NH, Eminov ZN. *Economic, social and political geography of the Republic of Azerbaijan: problems, processes, constructive aspects*. Baku: Chirag; 2010. 416 p.

Received 13.11.2023 / revised 09.03.2025 / accepted 09.03.2025.

УДК 553.5

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

И. С. ДАНИЛОВИЧ^{1), 2)}, И. В. ТАРАСЕВИЧ^{2), 3)}

¹⁾Институт природопользования НАН Беларуси, ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь

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

³⁾Белгидромет, пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены оценка современных изменений водного режима рек Беларуси и возможные факторы его трансформации. Показаны продолжающиеся тенденции к увеличению зимнего меженного стока рек, высоты зимних паводков и одновременному уменьшению стока рек весной со снижением частоты наводнений в период весеннего половодья. Данные устойчивые тенденции изменения режима рек в зимне-весенний сезон связаны с усилением западного переноса в Атлантико-Европейском секторе с середины 1960-х гг., обусловившим установление мягких зим, уменьшение высоты снежного покрова и увеличение количества жидких осадков. Современные тенденции изменения режима рек в теплый период года связаны с усилением меридиональной циркуляции с середины 1990-х гг., повышением засушливости и одновременным ростом повторяемости ливневых осадков и, как следствие, увеличением минимальных расходов воды летне-осенний межени и высоты дождевых паводков в восточной половине страны. На всей территории Беларуси, но особенно в западной части республики отмечается рост повторяемости сильных гидрологических засух в связи с существенным недобором осадков в последние десятилетия.

Ключевые слова: межень; половодье; дождевой паводок; осадки; засуха; изменение климата.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты № X23РНФ-122 и X24КИ-076).

Образец цитирования:

Данилович ИС, Тарасевич ИВ. Трансформация пространственно-временных закономерностей водного режима рек Беларуси в условиях изменяющегося климата. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;1:99–107.

EDN: HARZYV

For citation:

Danilovich IS, Tarasevich IV. Transformation of spatio-temporal pattern of river regime in Belarus according to climate changes. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;1:99–107. Russian.
EDN: HARZYV

Авторы:

Ирина Сергеевна Данилович – кандидат географических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории климатических исследований¹⁾, доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики²⁾.

Ирина Владимировна Тарасевич – старший преподаватель кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики²⁾, ведущий инженер-гидролог³⁾.

Authors:

Irina S. Danilovich, PhD (geography), docent; leading researcher at the laboratory of climate research^a and associate professor at the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics^b.
irina-danilovich@yandex.ru

Irina V. Tarasevich, senior lecturer at the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics^b, and leading hydrological engineer^c.
ira5582831@yandex.ru



TRANSFORMATION OF SPATIO-TEMPORAL PATTERN OF RIVER REGIME IN BELARUS ACCORDING TO CLIMATE CHANGES

I. S. DANILOVICH^{a, b}, I. V. TARASEVICH^{b, c}

^a*Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
10 F. Skaryny Street, Minsk 220076, Belarus*

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

^c*Belhydromet, 110 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220114, Belarus*

Corresponding author: I. V. Tarasevich (ira5582831@yandex.ru)

Abstract. The paper presents an assessment of current changes in the water regime of rivers in Belarus and possible factors of its transformation. There were established the continuing trends towards an increase in winter low-water river flow, the height of winter floods and a simultaneous decrease in spring streamflow with a decrease in the frequency of floods during the spring flood. These stable trends in the change of river regime in the winter – spring season are associated with an increase in westerly across the Atlantic-European sector since the mid 1960s, which led to mild winters, a decrease in snow cover depth, and an increase in the liquid precipitation amount. Current trends in the change of river regime in the warm season are associated with increased meridional circulation since the mid 1990s, increased aridity and a simultaneous increase in the frequency of heavy rainfall, and, as a consequence, an increase in the minimum flow during the summer – autumn low-water period and the height of rain floods in the eastern half of the country. There has been an increase in the frequency of severe hydrological droughts throughout Belarus, but especially in the western part of the republic due to a significant precipitation deficit in recent decades.

Keywords: low-flow period; snow-melting flood; rain flood; precipitation; drought; climate change.

Acknowledgements. The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grants No. X23RNF-122 and X24KI-076).

Введение

Исследование водного баланса речных водосборов на глобальном уровне показывает, что в 1985–2014 гг. более половины основных бассейнов мира демонстрировали тенденции к значительному снижению годового стока со скоростью 0,15–0,30 % в год [1]. Данное явление связано с неравномерностью выпадения осадков и ростом повторяемости погодных аномалий, таких как сильные ливни и атмосферные засухи. Для водосборов Восточно-Европейской равнины наблюдаются разнонаправленные тенденции динамики водных ресурсов. Так, для речных бассейнов на территории Беларуси, а также в верховье бассейна р. Дон, граничащего с бассейном р. Днепр, изменения годового стока варьируют в пределах $\pm 10\%$ и являются статистически незначимыми, но далее на юго-восток отмечается снижение годового стока, которое в устье р. Дон достигает 25 %. В то же время на реках в северо-западной части Восточно-Европейской равнины наблюдается выраженное увеличение годового стока на 20–50 % [2]. Снижение годового стока характерно также для рек на севере Украины [3], поскольку последние годы в стране были засушливыми [4]. Для большинства рек Польши годовой сток в 1988–2020 гг. уменьшился на 15–20 % [5]. В странах Балтии преимущественно прослеживаются тенденции к увеличению годового стока [6], но на водосборах южной части бассейна Балтийского моря отмечается его устойчивое снижение [7; 8].

Наиболее значительные изменения речного стока в Восточной Европе происходят в зимний и весенний сезоны. В европейской части России (Ленинградская область и Южная Карелия) преобладает положительная динамика годовых максимальных расходов воды (Q_{\max}) [2]. На западе России в 1950–2019 гг. отмечено снижение Q_{\max} на 10–20 %, на некоторых водосборах – на 20–50 % [2].

В равнинных частях речных бассейнов Украины максимальный сток характеризовался постепенным увеличением с 1947 по 1980 г. [9]. В дальнейшем почти на половине водосборов наблюдалось постоянное снижение годовых максимумов стока, что можно объяснить повышением зимних температур воздуха и частыми оттепелями. Однако при этом указанные факторы привели к увеличению расходов воды в период зимней межени [3]. Аналогичные тенденции были отмечены в бассейне р. Десны на севере Украины вблизи границы с Беларусью [10].

Снижение доли весеннего стока на 10–25 % выявлено на водосборах с наиболее суровыми климатическими условиями на северо-востоке Польши [5]. Тенденции изменения годовых максимальных расходов воды крупнейших рек стран Балтии (Даугава, Лиелупе, Вента, Гая и Салата) указывают на их статистически значимое снижение [8].

В период летне-осеннеи межени расходы воды на водосборах европейской части России в 1978–2010 гг. увеличились на 30–50 % по сравнению с таковыми в 1946–1977 гг. [11]. Однако увеличение минимального стока оказалось менее существенным (15 %) вплоть до его снижения в среднем течении р. Дон. В Украине речной сток в период летне-осеннеи межени в 2015, 2016 и 2020 гг. был очень низким [4]. На всей территории Польши в 1988–2020 гг. летний сток сократился на 15–20 %, а осенний – на 10–15 % [5].

Исследования режима рек в Литве не выявили четких тенденций к увеличению засушливости и экстремальных засух до 2000 г. [12]. С 1980-х гг. в период с апреля по август наблюдается повышенная засушливость в бассейне р. Неман из-за значительного снижения количества осадков и роста испарения с поверхности водосбора [13]. Кроме того, в странах Балтии в летние месяцы происходит уменьшение речного стока и усиление засушливости [14–16].

Учитывая разнонаправленный характер динамики различных видов стока на территории Восточно-Европейской равнины, цель данного исследования заключается в выявлении региональных тенденций изменения водного режима рек Беларуси в разные фазы гидрологического цикла и установлении его возможных причин.

Материалы и методы исследования

Для исследования гидрологического режима рек использованы данные государственного водного кадастра¹, включающие средние месячные и характерные расходы воды (наибольшие расходы воды весеннего половодья и паводков холодного и теплого периодов, наименьшие расходы воды зимней и летне-осеннеи межени) по 40 гидропостам сети наблюдений Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (Белгидромет).

Расходы воды обобщены с 1945 по 2020 г., оценка динамики водных ресурсов страны выполнена с 1900 по 2020 г. Отдельно выделяется период изменения климата Беларуси, за начало которого принимается 1989 г. [17], но изменения в режиме рек прослеживаются с 1970-х гг. [18], поэтому далее упоминается период, охватывающий последние 30–50 лет.

В ходе исследования для анализа пространственно-временного распределения величин стока оценивались средние значения и проводилась выборка экстремальных значений характерных расходов воды в разные фазы гидрологического цикла. Для изучения динамики различных видов речного стока рассчитывались величины трендов по методу наименьших квадратов, который минимизирует сумму квадратов разностей между значениями функции и соответствующими значениями данных. Статистическая значимость полученных величин трендов оценивалась по *t*-критерию Стьюдента.

Для картирования характеристик стока рек с разной площадью водосбора расходы воды пересчитывались в модули стока (т. е. расход воды с единицы площади) по формуле

$$M = 1000 \frac{q}{F},$$

где M – модуль стока, л/(с · км²); q – расходы воды, м³/с; F – площадь водосбора реки, км².

Карты построены в программе *ArcView* (версия 10.3) с использованием метода интерполяции *spline*.

Результаты и их обсуждение

Водные ресурсы, формирующиеся на территории Беларуси, находятся в сильной зависимости от количества выпадающих на речные водосборы осадков. Коэффициент корреляции между годовыми суммами осадков и годовыми запасами водных ресурсов составляет 0,7. Динамика выпадения осадков в последние десятилетия характеризуется малыми изменениями в сторону повышения (в пределах 5–7 %). Погодичные отклонения годовых сумм осадков в 1945–2010 гг. на территории Беларуси в большинстве лет были положительными, однако начиная с 2010 г. более часто отмечается недобор осадков (рис. 1). Годовые запасы водных ресурсов страны за рассматриваемый период оцениваются в 56 км³ и характеризуются чередованием периодов повышенной и пониженной водности. Наибольший объем водных ресурсов с 1945 по 2020 г. зафиксирован в 1998 г. Он был равен 88,88 км³ (второй по величине максимум с 1900 г.), что составило 154 % от многолетнего среднего значения. Минимальный объем водных ресурсов зарегистрирован в 2015 г. (51 % от нормы). Несмотря на небольшие изменения годового количества осадков, лишь с 2010 г. отмечается значительное сокращение водных ресурсов (до 40 % в отдельные годы).

¹Государственный водный кадастр [Электронный ресурс] : материалы наблюдений гос. сети гидрометеорол. наблюдений Респ. Беларусь : рег. свидетельство № 0870100022 / Респ. центр по гидрометеорологии, контролю радиоактив. загрязнения и мониторингу окружающей среды. Минск, 2020. Доступ из локальной сети.

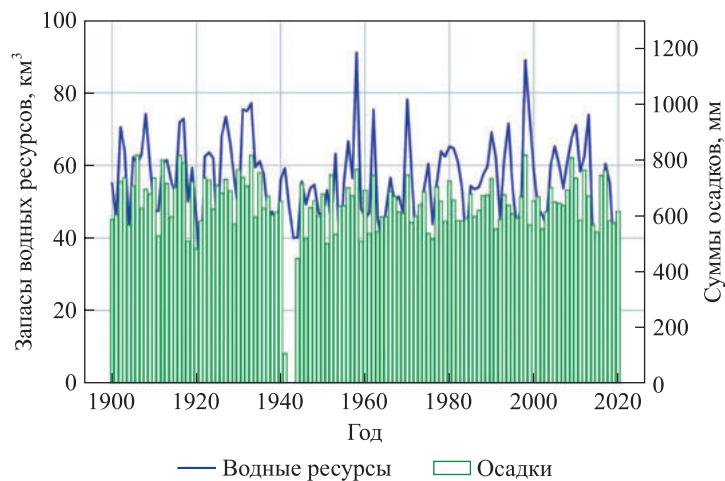


Рис. 1. Динамика годовых сумм осадков и запасов водных ресурсов на территории Беларуси в 1900–2020 гг.

Fig. 1. Dynamics of annual precipitation and water resources in Belarus in 1900–2020

Зимняя межень. Климатические изменения в холодный период года характеризуются устойчивыми положительными трендами температуры воздуха. Рост температуры воздуха, особенно в зимний период, на территории Беларуси превышает 2 °C [19]. Увеличение температуры воздуха обусловило смещение сроков наступления фаз гидрологического цикла, повышение зимнего меженного стока и одновременно снижение стока в период весеннего половодья.

С 1990-х гг. начало зимней межени сдвинулось на 5–13 дней позже, в результате чего ее продолжительность во всех бассейнах сократилась в среднем на 14–26 дней, колеблясь от 89–99 дней на южных реках до 113–123 дней на северных реках.

Пространственное распределение величин минимального стока зимней межени соответствует распределению годового стока: наибольшие значения минимальных расходов воды в зимний сезон отмечаются на севере страны. Здесь они составляют около 4 л/(с · км²), постепенно снижаясь к югу до 2 л/(с · км²) (рис. 2, а). Изменения зимнего меженного стока в последние десятилетия сохраняют тенденцию к увеличению с наибольшим ростом (на 13–18 и 30 % соответственно) на севере Беларуси в бассейне р. Западной Двины и северо-востоке страны в бассейне р. Днепр (верховье бассейна р. Сож). Наименьшее увеличение зимнего меженного стока (в пределах 7–9 %) зафиксировано на юге республики в бассейне р. Припять (рис. 2, б). Такое распределение связано с более высокими показателями осадков в зимний период на севере страны, а также с сокращением продолжительности выпадения осадков в твердом виде и увеличением количества жидких осадков.

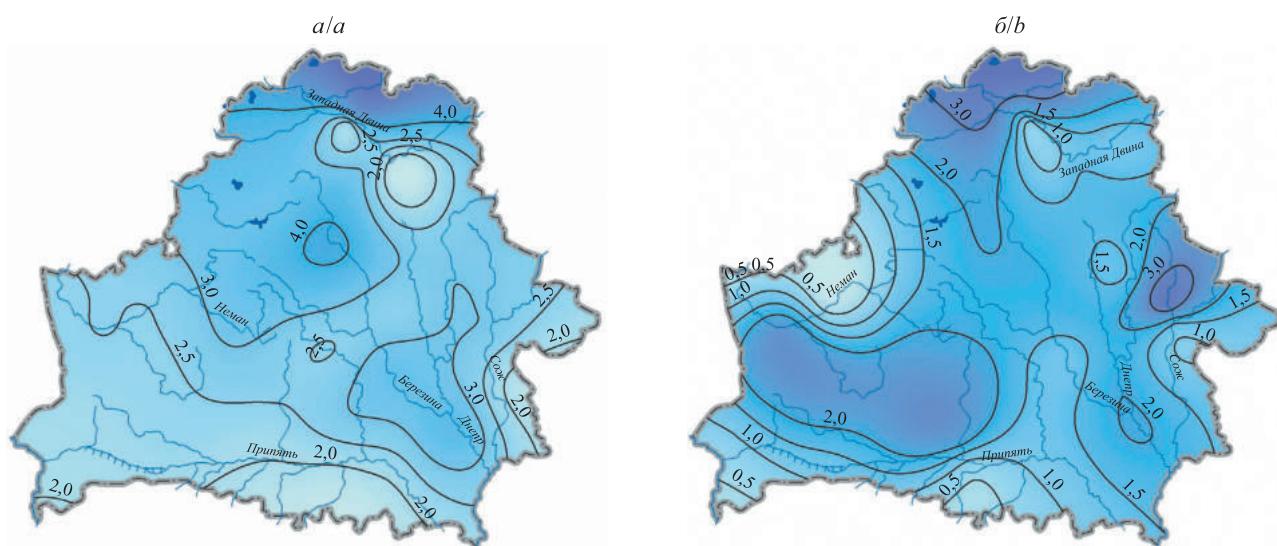


Рис. 2. Распределение наименьших расходов воды зимнего периода (а) и пространственное распределение трендов минимальных расходов воды зимнего периода с 1945 по 2020 г. (б), л/(с · км²)

Fig. 2. Distribution of the minimal discharge in winter (a) and spatial distribution of minimal discharge trends in winter since 1945 to 2020 (b), L/(s · km²)

Увеличение зимнего стока на территории Беларуси [20; 21] синхронизировано с его изменениями в южной части бассейна Балтийского моря [6; 22; 23], что обусловлено повышением температуры воздуха, увеличением частоты оттепелей, более ранними сроками начала интенсивного таяния снега и весеннего половодья.

Зимние паводки. Предыдущее исследование зимних паводков [24] показало увеличение паводочных расходов воды в 1988–2010 гг. по сравнению с таковыми в 1966–1987 гг. на большинстве рек Беларуси (от 10–20 % в бассейне р. Припяти до 20–40 % в бассейне р. Западной Двины). В бассейне р. Западный Буг отмечено снижение величины зимних паводков на 20–40 %.

Представленные расчеты свидетельствуют о продолжающемся росте повторяемости зимних паводков преимущественно в восточной половине страны в верховьях бассейнов рек Западная Двина, Днепр и на левобережье бассейна р. Припяти. В этих бассейнах в центральной части Беларуси наибольшие зимние расходы воды увеличились на 1–6 л/(с · км²), или 5–20 %. На юго-востоке республики их рост составил до 30–40 %.

В западной и южной частях страны наблюдается уменьшение высоты зимних паводков на 1–10 л/(с · км²). В бассейнах рек Неман, Вилия, Западный Буг и низовые бассейна р. Западной Двины снижение пиков паводков достигает 15–30 %, тогда как на правобережье бассейна р. Припяти оно превышает 40 %. Данные изменения связаны с более сильным повышением температуры воздуха на западе и юге Беларуси и, как следствие, низким снегонакоплением на водосборах. Например, в бассейнах указанных рек запасы воды в снеге в 1945–1990 гг. колебались в пределах 50–70 мм. С 1990-х гг. преобладающие запасы воды в снеге находились на уровне 40–50 мм, а высота снежного покрова зимой уменьшилась на 10–15 см.

Зимние паводки отмечались в отдельные годы только в бассейне р. Припяти и на ее притоках. Катастрофические наводнения (повторяемость 1 раз в 55–100 лет) при прохождении зимних паводков наблюдались в 1974–1975, 1980–1981 и 1998–1999 гг.; большие наводнения (повторяемость 1 раз в 10–50 лет) были зафиксированы в 1947–1948, 1974–1975, 1981–1982, 1988–1989, 1990–1991, 1992–1993, 1993–1994, 1997–1998, 1998–1999, 1999–2000, 2002–2003, 2008–2009, 2009–2010, 2010–2011 и 2012–2013 гг. [18; 21]. Наибольшее количество зимних паводков пришлось на 1990–2020 гг. Однако начиная с 2000 г. продолжается рост расходов воды в период зимней межени без резких паводков.

Весеннее половодье. Анализ опасных гидрологических явлений на реках Беларуси, зафиксированных с 1880 по 2000 г.², показывает, что наибольшее количество наводнений, вызванных весенними половодьями, произошло в 1951, 1953, 1956, 1958, 1962–1968, 1970, 1979, 1994, 1996 и 1999 гг. (впоследствии в 2004 и 2010 гг.). Высокие половодья наиболее часто наблюдались в период с 1950 по 1970 г., а с 1970-х гг. отмечается снижение их повторяемости, что связано с усилением западного переноса с 1960-х гг. [25], преобладанием оттепельного характера погоды и, как следствие, малыми запасами воды в снеге перед началом половодья. Для сравнения: на реках Украины повышенный сток наблюдался в 1931–1933, 1958, 1970, 1980 и 1998 гг. Наибольшие расходы воды весеннего половодья на равнинных реках этой страны были зафиксированы в 1932, 1970 и 1979 гг. [4]. В бассейне р. Десны на севере Украины отмечено снижение частоты весенних паводков [10]. Аналогичные тенденции наблюдались в Польше [26].

Динамика опасных явлений на реках связана с трансформацией внутригодового распределения стока, которое существенно изменилось за последние десятилетия [21; 27–30]. Объем весеннего стока снижается из-за раннего расходования запасов воды в снеге перед началом снеготаяния и половодья, что, в свою очередь, обусловлено преобладанием с середины 1960-х гг. зональных процессов в атмосфере с мягкими и влажными зимами и повышенной повторяемостью штормов в Центральной и Северной Европе [25].

На рис. 3 показаны распределение наибольших расходов воды весеннего половодья (см. рис. 3, а) и пространственное распределение трендов максимальных расходов воды весеннего половодья с 1945 по 2020 г. (см. рис. 3, б).

Тенденция к снижению максимального стока была устойчива на протяжении последних 30–50 лет. В 1989–2005 гг. оно достигало 20 % в бассейне р. Западной Двины и 50–60 % в бассейнах рек Неман, Днепр и Припять. В этот период начало половодья сместились на 11–22 дня раньше [21].

Наибольшие изменения максимального стока рек характерны для северо-запада Беларуси [30]. Так, в бассейне р. Западной Двины снижение стока составило от 15 до 18 л/(с · км²). В бассейне р. Вилии в 1989–2009 гг. сток уменьшился на 50–80 % по сравнению с таковым в 1951–1987 гг., что объясняется его частичным перебросом в бассейн р. Свислочи [27].

²Стихийные гидрометеорологические явления на территории Беларуси : справочник / Белорус. науч.-исслед. центр «Экология», Респ. гидрометеорол. центр ; [под общ. ред. М. А. Гольберга]. Минск : Белорус. науч.-исслед. центр «Экология», 2002. 131 с.

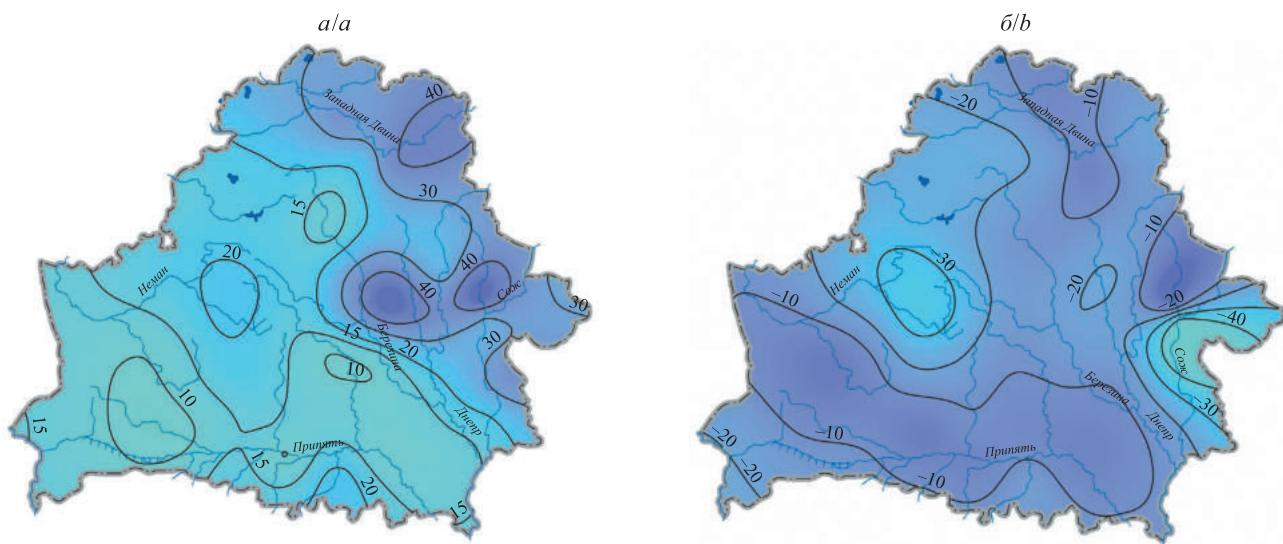


Рис. 3. Распределение наибольших расходов воды весеннего половодья (а) и пространственное распределение трендов максимальных расходов воды весеннего половодья с 1945 по 2020 г. (б), $\text{м}^3/\text{с}$

Fig. 3. Distribution of the maximal discharge during spring floods (a) and spatial distribution of maximum discharge trends since 1945 to 2020 (b), m^3/s

Наименьшее снижение весеннего стока характерно для южной и центральной частей страны, главным образом для бассейна р. Припяти, где изменения составили от 4 до 18 $\text{l}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, или от 0 до 10 % [30], что связано с более интенсивными мелиоративными работами на водосборе, особенно в его верхней части [27]. В то же время в 1986–2015 гг. отмечался рост весеннего стока на юго-востоке республики на 15–40 % и его снижение на юго-западе страны на 6–30 % по сравнению с величинами стока в 1961–1985 гг. [28].

С учетом наблюдений последних лет установлено продолжающееся снижение максимальных расходов воды во всех речных бассейнах в 1989–2020 гг. [31]. Наибольшие изменения обнаружены в водосборах малых рек (от 5–6 до 1–3 $\text{l}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$) из-за их большей чувствительности к климатическим аномалиям, таким как экстремальные осадки или засухи (см. рис. 3, а).

Однако, несмотря на устойчивую тенденцию к снижению максимального стока и уменьшению повторяемости наводнений, в южной части страны в бассейне р. Припяти было отмечено несколько высоких половодий. Для этого бассейна характерно наименьшее снижение весеннего стока за последние 30–50 лет. Высокая повторяемость гидрологических экстремумов в данном бассейне объясняется равнинным рельефом и большими площадями заболоченных территорий. В последние десятилетия высокие половодья в бассейне р. Припяти были зафиксированы в 1979 и 1999 гг. Небольшие по высоте половодья зарегистрированы в 2005, 2006, 2010, 2013, 2018 и 2019 гг., при этом небольшие наводнения отмечаются практически каждый год.

Летне-осенняя межень. Речной сток в период летне-осенней межени на реках Беларуси в большей степени зависит от осадков и в меньшей степени – от температуры воздуха.

С устойчивым повышением температуры воздуха в последние десятилетия связано смещение начала летне-осенней межени на 7–22 дня раньше, в результате чего ее продолжительность увеличилась в среднем на 12–29 дней. Аналогичные тенденции характерны и для центральной части Польши, где максимальная продолжительность меженного периода возросла до 171 дня [32].

Режим увлажнения в теплый период года характеризуется ростом количества осадков в северо-восточной части Беларуси и его снижением на западе страны, а также усилением экстремальности климата, что выражается в увеличении повторяемости и продолжительности засушливых периодов и одновременном росте повторяемости ливневых осадков. В период изменения климата происходит сокращение продолжительности выпадения осадков в летний сезон на 15–20 % на большинстве метеостанций республики и увеличение количества дней с низкой относительной влажностью на 1–4 дня за 10 лет [19]. При этом наблюдается увеличение суточных максимумов осадков на 20–30 %, особенно на юге страны [33]. Но, несмотря на регулярный дефицит осадков и увеличение их интенсивности, как отмечено выше, годовое количество осадков с 1990-х гг. существенно не изменилось.

Чередование периодов с атмосферными засухами и ливнями с серединой 1990-х гг. может быть обусловлено перестройкой атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе, сменой фазы североатлантического колебания с положительной на отрицательную и усилением меридиональных процессов в атмосфере [34–36].

В связи с пространственной неоднородностью выпадения осадков изменения в режиме рек в период летне-осеннеї межени характеризуются различными тенденциями в разных речных бассейнах. Колебания летне-осеннеї стока неустойчивы во времени в отличие от стабильного повышения зимнего стока и снижения весеннеї стока в период потепления климата.

Вследствие разнонаправленных краткосрочных колебаний летне-осеннеї стока его доля во внутригодовом распределении стока существенно не изменилась (от увеличения на 1–4 % в бассейне р. Днепр до снижения на 1–2 % в бассейне р. Неман) из-за значительного недобора осадков на западе страны в последние десятилетия [33].

Несмотря на малые изменения во внутригодовом распределении стока, в бассейнах рек Западная Двина, Днепр и Припять отмечается рост минимальных расходов воды в период открытого русла (рис. 4). В бассейнах рек Западная Двина и Днепр наблюдается увеличение максимумов дождевых паводков, вызванных обильными ливнями в теплое время года. В бассейне р. Припяти существенных изменений паводков как в основной реке, так и в ее притоках не произошло. Частота паводков в бассейне р. Неман снизилась из-за значительного дефицита осадков в последние десятилетия.

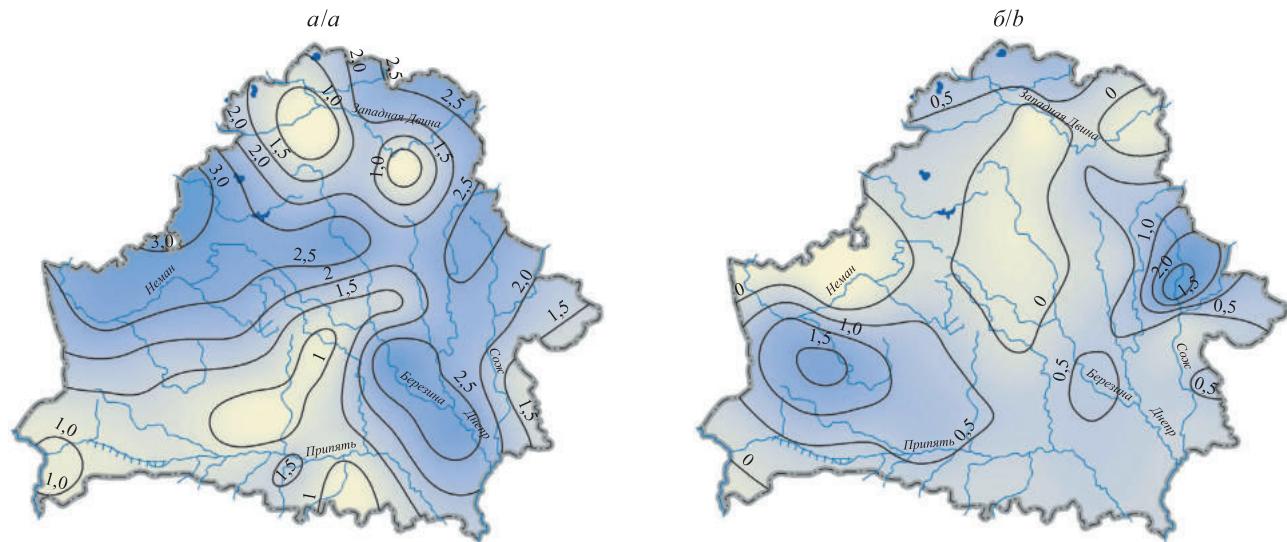


Рис. 4. Распределение наименьших расходов воды летне-осеннеї межени (а) и пространственное распределение трендов минимальных расходов воды летне-осеннеї межени с 1945 по 2020 г. (б), m^3/c

Fig. 4. Distribution of the minimal discharge in summer – autumn low-water season (a) and spatial distribution of minimal discharge trends in summer – autumn low-water season since 1945 to 2020 (b), m^3/s

Начиная с 1990-х гг. пространственное распределение осадков за июнь – август указывает на рост засушливости в теплый период года на большей части территории Беларуси. Наибольший дефицит осадков характерен для западной половины страны, где отмечены наименьшие годовые и летние суммы осадков за исследуемый период. Бассейны рек Неман, Западный Буг и верховьев бассейна р. Припяти (т. е. запад и юго-запад республики) были наиболее засушливыми районами с 1990-х гг., дефицит осадков здесь составил 20–30 % по сравнению с их количеством в предыдущие десятилетия. Как следствие, повторяемость гидрологических засух, определенных по стандартизированным индексам осадков (SPI), на реках страны увеличилась на 15–20 % [37].

С 1990-х гг. отмечается уменьшение количества слабых и умеренных гидрологических засух, но двукратное увеличение количества сильных и экстремальных гидрологических засух. На р. Неман за послевоенные годы до начала периода потепления гидрологических засух не наблюдалось. В бассейне р. Неман на территории Литвы в 1961–2010 гг. признаков усиления засух также не выявлено [12]. Однако за последние десятилетия отмечено семь сильных засух на р. Неман у г. Гродно.

В центральной части Беларуси в бассейне р. Днепр повторяемость гидрологических засух увеличилась на 5–10 %. В районе г. Могилёва до 1990 г. сильных засух не наблюдалось, а в период с 1990 по 2020 г. было зафиксировано три сильные гидрологические засухи. В бассейне р. Припяти рост маловодных периодов менее значим, что связано с более медленными колебаниями речного стока из-за равнинного рельефа и заболоченных территорий. Однако в районе г. Мозыря зафиксировано увеличение числа сильных засух с трех до шести явлений.

Противоположные тенденции (т. е. переувлажнение в июне – августе) наблюдались на востоке страны в верховьях бассейнов рек Днепр и Сож, где отмечено уменьшение повторяемости гидрологических засух на 3–5 %.

Заключение

Проведенное исследование раскрывает современные тенденции изменения режима рек в различные фазы гидрологического цикла: зимнюю межень, включающую холодные дождевые паводки, весеннееводье, связанное со снеготаянием, и летне-осеннюю межень с теплыми дождевыми паводками. Выполненные оценки указывают на продолжающиеся увеличение речного стока в зимний сезон, рост наименьших расходов воды зимней межени и повышение пиков холодных паводков, а также снижение стока в период весеннего половодья и уменьшение повторяемости наводнений. Эти тенденции стабильны на протяжении последних 30–50 лет, охватывающих период заметного изменения климата на территории Беларуси. Устойчивые тенденции в холодное время года объясняются преобладанием положительной фазы североатлантического колебания с 1960 по 1990 г. и усилением западного переноса в этот период. Зональные процессы обусловили интенсивное повышение температуры воздуха зимой, частые оттепели и рост количества осадков в Европе [38].

С середины 1990-х гг. возрастает интенсивность меридиональной циркуляции, связанной со скандинавским блокированием ведущего потока в атмосфере [39], вдоль которого происходит движение циклонов, в результате чего с 2000-х гг. на территории Беларуси наблюдаются увеличение повторяемости засух и одновременный рост суточных максимумов осадков, обусловленных конвективными процессами в атмосфере [33]. Изменения в гидрологическом режиме вызваны увеличением наименьших расходов воды в восточной половине страны (бассейны рек Западная Двина, Днепр, Припять), ростом максимумов дождевых паводков в теплый период года в бассейнах рек Западная Двина и Днепр, а также двукратным увеличением повторяемости сильных гидрологических засух во всех речных бассейнах, но особенно в бассейне р. Неман, где зафиксирован существенный недобор осадков в последние десятилетия. Характерные изменения в режиме рек в теплый период года менее устойчивы во времени и зависят от изменчивости выпадения осадков.

Библиографические ссылки

1. Xiong J, Yin J, Guo S, He S, Chen J, Abhishek. Annual runoff coefficient variation in a changing environment: a global perspective. *Environmental Research Letters*. 2022;17(6):064006. DOI: 10.1088/1748-9326/ac62ad.
2. Frolova NL, Magritskii DV, Kireeva MB, Grigor'ev VYu, Gelfan AN, Sazonov AA, et al. Streamflow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data. *Water Resources*. 2022;49(3):333–350. DOI: 10.1134/S0097807822030046.
3. Lobodzinskyi O, Vasylenko Y, Koshkina O, Nabyvanets Y. Assessing the impact of climate change on discharge in the Horyn River basin by analyzing precipitation and temperature data. *Meteorology Hydrology and Water Management*. 2023;11(1):93–106. DOI: 10.26491/mhwm/163286.
4. Вишневський ВІ, Куцій АВ. *Багаторічні зміни водного режиму річок України*. Київ: Наукова думка; 2022. 251 с.
5. Brzezińska W, Wrześniński D, Świątek S. Wpływ ocieplenia klimatu na odpływ rzek w Polsce w latach 1951–2020. W: Kostrewski A, Abramowicz D, Cichoń M, Hildebrandt-Radke I, Kicińska D, Kolendowicz L, et al., redaktorzy. *Geoprzestrzeń. Numer 7. Kompleksowe badania środowiska geograficznego*. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe; 2023. s. 59–74.
6. Wilson D, Hisdal H, Lawrence D. Has streamflow changed in the Nordic countries? Recent trends and comparisons to hydrological projections. *Journal of Hydrology*. 2010;394(3–4):334–346. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.09.010.
7. Hansson D, Eriksson C, Omstedt A, Chen D. Reconstruction of river runoff to the Baltic Sea, AD 1500–1995. *International Journal of Climatology*. 2011;31(5):696–703. DOI: 10.1002/joc.2097.
8. Gailiušis B, Kriauciūnienė J, Jakimavičius D, Šarauskienė D. The variability of long-term runoff series in the Baltic Sea drainage basin. *Baltica*. 2011;24(1):45–54.
9. Obodovskyi O, Lukianets O, Korohoda N. Estimation of long-term fluctuations of river water flow by observation data. In: Obovodovskyi O, editor. *River runoff in Ukraine under climate change conditions*. [S. l.]: Lambert Academic Publishing; 2020. p. 79–109.
10. Snizhko S, Bertola M, Ovcharuk V, Shevchenko O, Blöschl G. Climate change impact on seasonality of flood in the Desna River catchment, North Ukraine. In: *16th International scientific conference on monitoring of geological processes and ecological condition of the environment; 2022 November 15–18; Kyiv, Ukraine. Volume 2*. [S. l.]: European Association of Geoscientists and Engineers; 2022. p. 588–592.
11. Kireeva MB, Frolova NL, Winde F, Dzhamalov RG, Rets EP, Povalishnikova ES, et al. Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards. *Geography, Environment, Sustainability*. 2016;9(4):33–47.
12. Rimkus E, Stonevičius E, Korneev V, Kažys J, Valiuškevičius G, Pakhomau A. Dynamics of meteorological and hydrological droughts in the Nemunas River basin. *Environmental Research Letters*. 2013;8(4):045014. DOI: 10.1088/1748-9326/8/4/045014.
13. Stonevičius E, Rimkus E, Kažys J, Bukantis A, Kriauciūnienė J, Akstinas V, et al. Recent aridity trends and future projections in the Nemunas River basin. *Climate Research*. 2018;75:143–154. DOI: 10.3354/cr01514.
14. Poljanšek K, Marín Ferrer M, De Groot T, Clark I, Faivre N, Peter D, et al. *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less*. Poljanšek K, Marín Ferrer M, De Groot T, Clark I, editors. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2017. 60 p. DOI: 10.2760/451402.
15. Stahl K, Tallaksen LM, Hannaford J, van Lanen HAJ. Filling the white space on maps of European runoff trends: estimates from a multi-model ensemble. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012;16(7):2035–2047. DOI: 10.5194/hess-16-2035-2012.
16. Gudmundsson L, Seneviratne SI, Zhang X. Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources. *Nature Climate Change*. 2017;7(11):813–816. DOI: 10.1038/nclimate3416.

17. Логинов ВФ, Лысенко СА, Мельник ВИ. *Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования*. 2-е издание. Минск: Энциклопедикс; 2020. 263 с.
18. Данилович ИС, Журавович ЛН, Нагибина МЕ, Квач ЕГ. Особенности формирования водности рек Беларуси в последние десятилетия. *Природные ресурсы*. 2017;2:5–12.
19. Данилович ИС, Логинов ВФ. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси. *Центральноазиатский журнал географических исследований*. 2021;1:2:35–48.
20. Danilovich I, Zhuravlev S, Kurochkina L, Groisman P. The past and future estimates of climate and streamflow changes in the Western Dvina River basin. *Frontiers in Earth Science*. 2019;7:204. DOI: 10.3389/feart.2019.00204.
21. Полищук АИ, Чекан ГС, редакторы. *Гидрологический мониторинг Республики Беларусь*. Минск: Кнігазбор; 2009. 267 с.
22. Reihan A, Koltsova T, Kriauciūnienė J, Lizuma L, Meilutytė-Barauskienė D. Changes in water discharges of the Baltic states rivers in the 20th century and its relation to climate change. *Nordic Hydrology*. 2007;38(4–5):401–412. DOI: 10.2166/nh.2007.020.
23. Stahl K, Hisdal H, Hannaford J, Tallaksen LM, van Lanen HAJ, Sauquet E, et al. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2010;14(12):2367–2382. DOI: 10.5194/hess-14-2367-2010.
24. Волчек АА, Шелест ТА. *Паводки на реках Беларуси*. Брест: Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина; 2016. 199 с.
25. Gillett NP, Fyfe JC. Annular mode changes in the CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters*. 2013;40(6):1189–1193. DOI: 10.1002/grl.50249.
26. Wrzesiński D. Flow regime patterns and their changes. In: Zeleňáková M, Kubiak-Wójcicka K, Negm AM, editors. *Management of water resources in Poland*. Cham: Springer; 2021. p. 163–180 (Kostianoy A, Shirshov PP, editors. Springer water). DOI: 10.1007/978-3-030-61965-7_9.
27. Логинов ВФ, Волчек АлА, Волчек Ана. *Весенние половодья на реках Беларуси: пространственно-временные колебания и прогноз*. Минск: Беларусская наука; 2014. 244 с.
28. Волчек АА, Корнеев ВН, Парфомук СИ, Булак ИА. *Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата*. Волчек АА, Корнеев ВН, редакторы. Брест: Альтернатива; 2017. 239 с.
29. Лопух ПС, Паргасёнок ИС. *Влияние атмосферной циркуляции на формирование гидрологического режима рек Беларуси*. Минск: Белорусский государственный университет; 2013. 216 с.
30. Partasenok IS, Groisman PY, 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, Groisman PY. Changes of hydrological extremes in the center of eastern Europe and their plausible causes. *Water*. 2023;15(16):2992. DOI: 10.3390/w15162992.
32. Wrzesiński D, Marsz AA, Sobkowiak L, Styszyńska A. Response of low flows of Polish rivers to climate change in 1987–1989. *Water*. 2022;14(18):2780. DOI: 10.3390/w14182780.
33. 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.
34. Marsz AA, Sobkowiak L, Styszyńska A, Wrzesiński D. Causes and course of climate change and its hydrological consequences in the Greater Poland region in 1951–2020. *Quaestiones Geographicae*. 2022;41(3):183–206. DOI: 10.14746/quageo-2022-0033.
35. Попова ВВ, Мацковский ВВ, Михайлов АЮ. Современные изменения климата сушки внетропической зоны Северного полушария. *Вестник Московского университета. Серия 5, География*. 2018;1:3–13. EDN: YPQIRP.
36. Данилович ИС, Логинов ВФ, Беганский АВ. Влияние циклогенеза в Атлантико-Европейском секторе на пространственно-временное распространение атмосферных осадков в Беларуси. *Природные ресурсы*. 2023;1:3–15.
37. Данилович ИС, Гледко ЮА, Тарасевич ИВ. Повторяемость засух на территории Беларуси в связи с атмосферной циркуляцией в Атлантико-Европейском секторе. *Метеорология и гидрология*. 2023;9:61–71. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-9-61-71.
38. Логинов ВФ, Данилович ИС, Китаев ЛМ, Акентьева 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.
39. Попова ВВ. Современные тренды осадков и атмосферной циркуляции в речных бассейнах европейской части России. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023;87(1):60–76. DOI: 10.31857/S2587556623010144.

Получена 20.05.2024 / исправлена 10.06.2024 / принята 06.03.2025.
Received 20.05.2024 / revised 10.06.2024 / accepted 06.03.2025.

ГЕОЛОГИЯ

GEOLGY

УДК 551.435.42(476)

СТРУКТУРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕДНИКОВЫХ ЛОЖБИН И ВПАДИН БЕРЕЗИНСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ В БЕЛАРУСИ

М. Е. КОМАРОВСКИЙ¹⁾

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

Аннотация. Изучены основные особенности морфологии, геологического строения и происхождения ледниковых ложбин и впадин березинской (окской, эльстерской) генерации на территории Беларуси. Эти вопросы способствуют разработке проблемы ледникового литоморфогенеза, выявлению роли врезов в формировании полезных ископаемых, национальному планированию природоохранных мероприятий. Достоверность полученных результатов основана на использовании достаточно большого объема фактического материала (анализе более 15 тыс. описаний разрезов буровых скважин, доступных геофизических данных, построении 193 геологических разрезов и серии среднемасштабных геологических структурных карт березинского ледникового горизонта) и применении комплекса геологических, литологических, палеогеоморфологических, биостратиграфических методов исследований. Выполненная работа включает следующие новые результаты. Установлена и охарактеризована генерация эрозионных отрицательных форм березинского оледенения на территории Беларуси. Доказана связь локализации ложбин и впадин с рельефом ледникового ложа, зонами активных разломов, полями развития деформируемых пород и неглубокого залегания скальных выступов, а также с радиально-секторальной структурой и динамикой ледника. Уточнена классификация ледниковых отрицательных форм, выделено и охарактеризовано девять их морфогенетических типов. Установлено преобладание среди них ложбин и впадин ледниковой экзарации, выдавливания и размыва (50,0 %) и ложбин ледниковой экзарации и размыва (23,9 %). Выявлена существенная роль в березинской генерации крупных ложбин и впадин полигенетического происхождения, наследующих ранее

Образец цитирования:

Комаровский МЕ. Структурно-генетические особенности ледниковых ложбин и впадин березинской генерации в Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;1:108–124.

EDN: HRIPWT

For citation:

Komarovskiy ME. Structural and genetic features of glacial valleys and basins of the Berezina generation in Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;1:108–124. Russian.

EDN: HRIPWT

Автор:

Михаил Евгеньевич Комаровский – кандидат геолого-минералогических наук, доцент; доцент кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики.

Author:

Michail E. Komarovskiy, PhD (geology and mineralogy), docent; associate professor at the department of regional geology, faculty of geography and geoinformatics.
mkomarovskiy@mail.ru

сформированные (ясельдинские, донские, санские I) врезы. Объяснен механизм образования разных типов отрицательных форм, обоснованы последовательно сменяющиеся стадии морфогенеза при выдвижении и деградации ледника.

Ключевые слова: ледниковые ложбины; ледниковые впадины; березинская генерация; ложе ледника; ледниковый поток; экзарация; гляциодислокации.

STRUCTURAL AND GENETIC FEATURES OF GLACIAL VALLEYS AND BASINS OF THE BEREZINA GENERATION IN BELARUS

M. E. KOMAROVSKIY^a

^a*Belarusian State University, 4 Nizaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

Abstract. The main features of the morphology, geological structure and origin of glacial valleys and basins of the Berezina (Oka, Elsterian) generation in the territory of Belarus have been studied. These issues contribute to the development of the problem of glacial lithomorphogenesis, identification of the role of incisions in the formation of minerals, and rational planning of environmental measures. The reliability of the results obtained is based on the use of a fairly large volume of factual material (analysis of more than 15 thousand descriptions of borehole sections, available geophysical data, construction of 193 geological sections and a series of medium-scale geological structural maps of the Berezina glacial horizon) and the use of a complex of geological, lithological, palaeogeomorphological, and biostratigraphic research methods. The work performed includes the following new results. The generation of erosive negative forms of the Berezina glaciation in the territory of Belarus has been established and characterised. The relationship between the localisation of valleys and basins with the relief of the glacial bed, zones of active faults, fields of development of deformable rocks and shallow occurrence of rocky ledges, as well as with the radial-sectoral structure and dynamics of the glacier has been proven. The classification of glacial negative forms has been clarified, nine of their morphogenetic types have been identified and characterised. The prevalence of valleys and basins of glacial exaration, extrusion and erosion (50.0 %) and valleys of glacial exaration and erosion (23.9 %) among them has been established. A significant role in the Berezina generation of large valleys and basins of polygenetic origin, inheriting previously formed (Yaseldinsky, Don, Sanian I) incisions, has been revealed. The mechanism of formation of different types of negative forms has been explained, successively changing stages of morphogenesis during the advancing and degradation of the glacier have been substantiated.

Keywords: glacial valleys; glacial basins; Berezina generation; glacier bed; ice stream; exaration; glacial tectonics.

Введение

В настоящее время значительное внимание уделяется изучению ледниковых врезов – глубоких понижений вытянутой или котловинной формы, связанных с эрозионной и гляциотектонической деятельностью четвертичных ледниковых покровов и их талых ледниковых вод. Интерес к исследованию ледниковых ложбин определяется их важным научным и практическим значением, особенно для разработки проблемы ледникового литоморфогенеза, обоснования поиска новых месторождений полезных ископаемых (главным образом минеральных стройматериалов, пресных подземных вод) и рационального планирования геолого-съемочных работ и природоохранных мероприятий.

Березинские ложбины представляют собой формы в поверхности дочетвертичных отложений и основании четвертичной толщи, врезанные березинским (окским, эльстерским) плейстоценовым континентальным ледниковым покровом, явившимся вторым после ясельдинского ледникового покрова. Эти ложбины были закартографированы с помощью сейсмического профилирования и анализа буровых данных в области эльстерского оледенения Западной и Центральной Европы. Здесь удалось установить широкое распространение ложбин у максимальной границы и во внутренней зоне оледенения, выявить направление их простирания, отметить основные параметры и особенности строения и выдвинуть гипотезы о способах образования [1; 2]. Глубокие и многочисленные врезы березинского времени обнаружены и на территории Беларуси в бассейнах рек Днепр, Неман, Припять и Западная Двина [3; 4]. Однако в проблеме происхождения березинских ложбин и впадин на западе Восточно-Европейской равнины остаются нерешенными ряд вопросов, в частности не определены ориентировка этих врезов, их соотношение со структурой ледникового покрова и главными направлениями ледникового течения,

специфические черты строения генерации и отдельных морфогенетических типов, а также причины того, что субглациальные водно-эрэзионные ложбины в основании четвертичной толщи в Беларуси встречаются гораздо реже и неравномернее, чем в Западной Европе, несмотря на схожие палеогляциологические условия и др.

Цель статьи – обсудить основные особенности морфологии, геологического строения и происхождения ложбин и впадин березинской генерации на территории Беларуси. Исходя из этого, ставятся следующие задачи: выделить ледниковые ложбины в четвертичной толще, установить связь расположения врезов со структурой ледникового покрова, выявить морфогенетическое разнообразие ледниковых отрицательных форм и показать на конкретных примерах особенности геологического строения и происхождения наиболее распространенных типов этих форм.

Состояние проблемы генезиса березинских ложбин

На поверхности дочетвертичных отложений ледниковой области Восточно-Европейской равнины березинские ложбины были обнаружены в 1960-х гг. Подавляющее большинство исследователей считали такие понижения речными долинами доледникового возраста. Первым предположение о ледниковом происхождении и окском возрасте многих глубоких ложбин в рельефе подошвы четвертичных отложений ледниковых областей высказал Г. И. Горецкий [5]. По мнению ученого, такие вытянутые узкие понижения сформировались при активном продвижении ледника в результате размыва потоками талых вод доледниковых речных долин и последующей экзарации их бортов и днищ ледником. Среди врезов Г. И. Горецкий выделил ложбины ледникового выпахивания, рытвины ледникового стока и размыва, а также формы ледникового выпахивания и размыва.

Дальнейшее развитие концепция об определяющей роли ледника и подледных талых вод в формировании березинских ложбин получила в ряде обобщающих работ по палеопотамологии Белорусского Понеманья, гляциотектонике и гляциоморфогенезу Беларуси. Понижения в рельефе поверхности дочетвертичных пород (Ушанско-Налибокская ложбина и др.), имеющие крупные размеры, котловинообразную форму, сокращенную мощность меловых пород, не без основания расценивались как результат экзарации березинского ледника [3]. Частая встречаемость ложбин в Белорусском Понеманье и Подднепровье в комплексе с поперечными полосами напорных конечных морен и зонами гляциодислокаций способствовала тому, что многие исследователи рассматривали их в качестве структур выдавливания субстрата [6]. Изучение этих форм в центральной Беларуси позволило установить ложбины рытвинного, трогового и котловинного типов, ложбины-ванны и ледниковые ванны вдавливания, выделить их на картах рельефа ложа четвертичной толщи [3].

На современном этапе были выполнены работы по изучению генетической связи ложбин и впадин со структурой, разломными зонами, деформационными свойствами и литологией коренного субстрата [7; 8], анализу роли рельефа ледникового основания в возникновении березинских экзарационно-эрэзионных Дисненской, Полоцкой и Суражской впадин и водно-эрэзионных ложбин [9].

Из зарубежных специалистов значительный вклад в развитие концепций образования эльстерских ложбин внесли западноевропейские и российские геологи, предложившие разные модели их формирования. В Западной Европе и южной части Прибалтики отмечается доминирование пяти концепций:

- ледниковой экзарации (для объяснения возникновения мелких корытообразных ложбин и ванн, заполненных мореной);
- подледной водно-ледниковой эрозии (применительно к узким врезам, выполненным флювиогляциальными отложениями);
- преобразования речных долин посредством ледниковой экзарации и водно-ледникового размыва [10];
- речной эрозии во время гляциоэвстатического понижения [11];
- сложного способа образования, при котором ложбины были эродированы циклическими выбросами субглациальных талых вод с ледниковой эрозией в качестве дополнительного агента [12; 13].

В России и северной части Прибалтики в качестве основной концепции обосновления крупных впадин и корытообразных ложбин на северо-западе Восточно-Европейской равнины рассматривается экзарационная деятельность ледника [14–16]. Существуют также альтернативные гипотезы развития ложбин [17].

Методика исследования

Схема исследования включала: 1) картографирование погребенных березинских ложбин и впадин; 2) изучение морфологии и внутренней структуры понижений; 3) определение происхождения врезов и их связи со структурой ледникового покрова и геологической деятельностью ледника и подледных талых вод.

Геологическое картографирование поверхности березинского ледникового горизонта на территории Беларуси в масштабе 1 : 200 000 было выполнено на основе анализа разрезов более 15 тыс. буровых скважин государственного предприятия «Белгосгеоцентр» и доступных данных высокоточной гравиметрической съемки, электроразведки, а также материалов аэрокосмических исследований. Карта строилась способом, описанным в работе [4]. Критериями распознавания и определения местоположения погребенных ложбин и впадин на карте служили вытянутые спрямленные очертания, значительная глубина, *V*- и *U*-образные поперечные профили, связь с погребенными конечными моренами, гляциодислокациями, камами, флювиогляциальными конусами выноса, дельтами и другие морфологические черты. Многие березинские ложбины и впадины содержат на поверхности слои озерных, озерно-болотных и аллювиальных александрийских межледниковых отложений, идентифицированных биостратиграфическими методами, или маркирующий горизонт лимногляциальных глин времени наступления припятского оледенения. Данные о расположении межледниковых отложений использовались для определения возраста, уточнения ориентировки и параметров ложбин, установленных морфологическим методом.

Исследование структуры ложбин и других форм рельефа, гляциодислокаций на прилегающей местности выполнялось с помощью литологических методов по 193 построенным геологическим профилям. Сопряженный анализ фаций ледниковых и водно-ледниковых отложений, гляциогенных структур, гляциодислокаций и рельефа березинской поверхности позволил выявить характер геологического строения ложбин и впадин.

Происхождение отрицательных форм определялось исходя из их морфологии и особенностей заполнения [3]. Согласно морфогенетической классификации [4] выделялись ложбины ледниковой экзарации, ложбины ледникового выдавливания, субгляциальные водно-эрэзионные ложбины и врезы полигенетического происхождения. Строилась карта расположения основных морфогенетических типов березинских ледниковых ложбин и впадин.

Результаты исследования

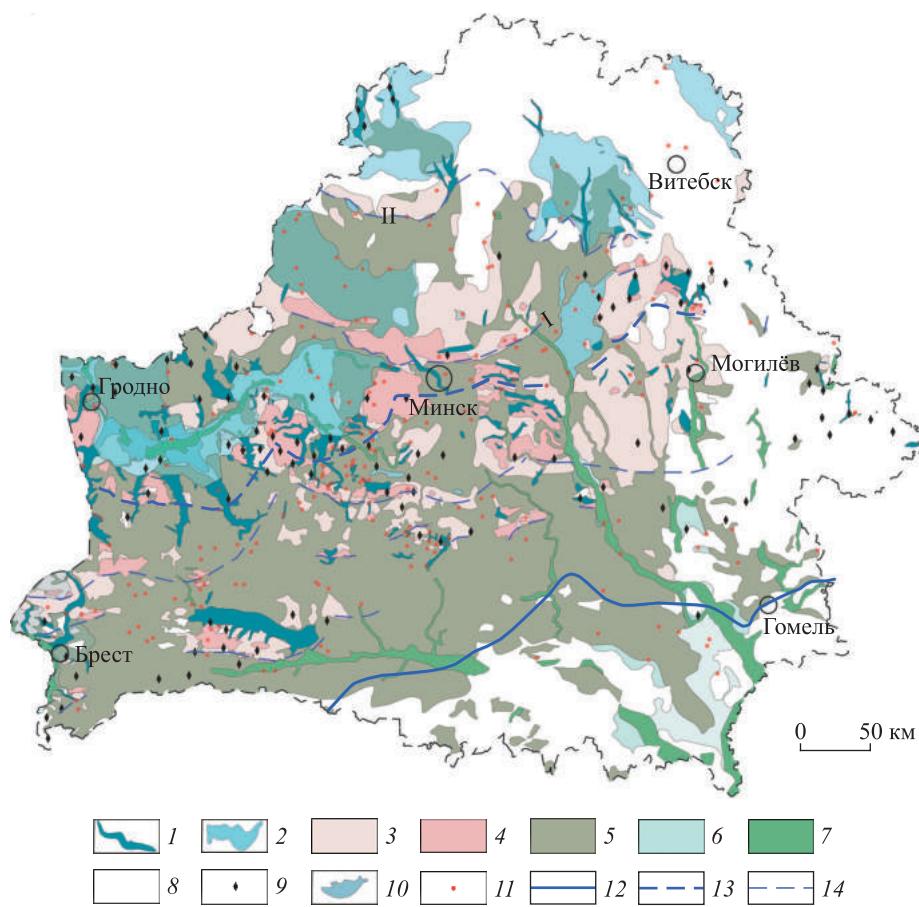
Распространение березинских ложбин и впадин. Исследуемые формы рельефа Беларуси являются частью более обширной сети врезов области эльстерского оледенения на территории Европы. Они установлены в поверхности дочетвертичных пород в Северо-Западной Европе в пределах Северного моря и восточной Великобритании [18], Нидерландов, Дании, а также в Центральной Европе в пределах Северо-Германской низменности и северной Польши [1], стран Прибалтики, Беларуси [10; 11], западной части Украины и на северо-западе Восточно-Европейской равнины в бассейнах верхних течений рек Днепр, Волга и Ока.

В Северо-Западной и Центральной Европе эльстерские ложбины являются наиболее древними четвертичными структурами на поверхности коренного субстрата. Здесь они создают обширную сеть из перекрещивающихся продольных и поперечных форм, которые в большинстве случаев направлены строго радиально от центра к краю ледникового щита. На севере Центральной Европы и особенно в пределах Северо-Германской низменности и Польши эльстерские ложбины значительно глубже, чем в Беларуси. Самые крупные из них имеют глубину свыше 500 м, ширину от 3 до 5 км и длину до 100–150 км [1].

В Беларуси ложбины и впадины локализуются в краевой и внутренней зонах березинского оледенения и характеризуются неравномерным распределением. Высокая плотность березинских ложбин и впадин отмечается в центральной, западной, юго-западной и северной частях страны, тогда как в восточной части республики их плотность снижается до нескольких процентов [8]. В центре и на западе Беларуси наиболее значительными являются Озерская, Мостовская, Налибокская и Вилейская ложбины, на севере – Дисненская, Полоцкая, Суражская, Чашникская и Сенненская ложбины, в бассейне р. Днепр – Александрийская, Копысско-Шкловская и Ясельдинская ложбины, а в бассейне р. Вислы – Западно-Бугская, Малоритская ложбины и др. (рис. 1).

В центральном и западном регионах Беларуси ледниковые ложбины выявлены в пределах погребенных флювиогляциальных, моренных и озерно-аллювиальных равнин, низин и краевых образований ясельдинского рельефа. По сравнению с ясельдинскими врезами березинские врезы шире представлены в северной и юго-западной частях Беларуси, где они тяготеют к крупным формам рельефа – денудационной Северо-Белорусской равнине и озерно-аллювиальным низинам дочетвертичного и раннечетвертичного возраста (Брестский и Малоритский районы).

Распределение березинских ледниковых ложбин и впадин на территории Беларуси тесно связано со структурой, деформационными свойствами и литологией коренного субстрата. Их распространение ограничено в основном Белорусской антеклизой и северной частью Беларуси, где преобладают деформируемые мезокайнозойские мергельно-меловые, песчано-глинистые отложения и слаболитифицированные девонские пески и песчаники, которые залегают над выступами более прочных пород с наклоном навстречу леднику.



Rис. 1. Расположение ложбин и впадин в поверхности березинского ледникового горизонта:
 1 – ледниковые ложбины; 2 – ледниковые впадины; 3 – основная морена;
 4 – напорные конечные морены; 5 – флювиогляциальные отложения;
 6 – озерно-аллювиальные пески и алевриты; 7 – аллювий; 8 – участки отсутствия отложений;
 9 – ледниковые отторженцы; 10 – более молодые гляциодислокации;
 11 – скважины, вскрывшие александрийские межледниковые отложения;
 12 – граница березинского оледенения; 13 – граница минской стадии;
 14 – границы фаз (I – заславской, II – мядельской) и осцилляций

Fig. 1. Location of valleys and basins in the surface of the Berezina glacial horizon:
 1 – glacial valleys; 2 – glacial basins; 3 – lodgement till; 4 – push end moraines; 5 – fluvioglacial deposits;
 6 – lacustrine and alluvial sands and silts; 7 – alluvium; 8 – areas without deposits; 9 – glacial erratic masses;
 10 – younger glacial tectonics; 11 – boreholes that exposed Alexandrian interglacial deposits; 12 – Berezina glaciation boundary;
 13 – Minsk stage boundary; 14 – boundaries of phases (I – Zaslavl, II – Myadel) and oscillations

Размещение многих ложбин определяется также зонами активных разломов преимущественно субмеридионального, субширотного и северо-восточного направлений. В большинстве случаев ложбины располагаются вдоль центра разломной зоны или непосредственно над разломом, ориентированным как в продольном, так и в поперечном направлении относительно движения ледника [7]. Разломы являются одним из основных факторов локализации Чашникской, Сенненской, Глубокской, Червенской, Ясельдинской, Малоритской ложбин и др.

Соотношение березинских ложбин и впадин с радиально-секторальной структурой краевых комплексов. Еще одной важной особенностью пространственного распределения березинских ложбин и впадин является их отчетливая связь с радиально-секторальной структурой краевых комплексов. В основном они тяготеют к полосам развития краевого ледникового рельефа и крупным бассейнам, соответствующим ледниковым потокам и лопастям. Обнаружена приуроченность ложбин и впадин к границам остановок и возвратно-трансгрессивных подвижек края ледника. Однако установить ранг этих границ представляется сложной задачей. В северной Германии, Дании и Польше обнаружены две эльстерские морены двух стадий подвижек и разделяющий их короткий теплый интерстадиальный период (милтицкий (мронгавский) интервал) [19; 20]. На развитие двух стадиальных морен, разделенных свериновским интерстадиалом, и одной пачки крупной осцилляции в березинском ледниковом комплексе в Белорусском Понеманье указывал Г. И. Горецкий [3]. Ранг краевых комплексов определялся

по индивидуальным геолого-геоморфологическим критериям [21]. В соответствии с этим были выделены три основные краевые зоны:

- максимальная стадиальная зона вдоль южной границы березинского ледника;
- минская (смиловичская) стадиальная и заславская фазиальная зоны в центре Беларуси;
- мядельская фазиальная зона на севере страны (см. рис. 1).

Существует вариант реконструкции структуры ледникового покрова березинского времени, предложенный А. В. Матвеевым [22]. Для детализации соотношения между расположением эрозионных форм и динамической структурой ледника, кроме характера распределения моренных отложений, ориентировки и густоты ледниковых ложбин и крупных неровностей доледникового и ледникового рельефа, использовались довольно существенные отличия в петрографическом составе крупнообломочного материала и минеральном составе тяжелой фракции в морене вдоль простирации краевой зоны.

На западе Беларуси березинская морена содержит максимальное количество обломков скандинавских кристаллических пород (40,2 %), палеозойских известняков (34,0 %) и пониженное количество девонских доломитов, песчаников и алевролитов, принесенных с территории западной Латвии. Основную долю местных пород составляют обломки мела, мергеля, кремней и фосфоритов, родиной которых являются южная Литва и северо-западная Беларусь. Среди галек кристаллических пород в морене на западе Беларуси и северо-западе Украины обнаружены разновидности, принесенные ледником из центральной Швеции, со дна северного участка средней части Балтийского моря и Аландских островов [23]. Эти данные показывают, что на западе Беларуси в березинском леднике обособлялся Неманский (Балтийский) ледниковый поток, продвигавшийся с северо-запада на юго-восток.

В центральной части Беларуси в березинской морене преобладают обломки палеозойских известняков, девонских песчаников, алевролитов, аргиллитов и доломитов, принесенных из западной Эстонии, Рижского залива и восточной Литвы. Процентное содержание местных мезозойских карбонатных и прочих пород выше, чем на западе и востоке страны. Формирование березинской морены связано с северо-северо-западным источником сноса и Припятским (Рижским) ледниковым потоком.

Для петрографического состава березинской морены в бассейне р. Днепр характерно повышенное по сравнению с рассмотренными районами содержание девонских доломитов (23,4 %) и палеозойских известняков (28,6 %). Количество девонских песчаников, алевролитов и аргиллитов составляет 6,3 %. Доля обломков мезозойских карбонатных образований уменьшается до 4,4 %. Эти данные указывают на поступление обломочного материала в бассейн р. Днепр в березинское время с севера и северо-северо-запада вместе с Днепровским (Чудским) ледниковым потоком.

В восточных районах Беларуси и бассейнах верхних течений рек Десны и Оки (Россия) морена содержит примерно равное количество обломков осадочных и кристаллических пород и имеет более тесную связь с местными питающими провинциями [24]. Ориентировка обломков, находки белемнитов из юрских пород в бассейне верхнего течения р. Оки указывают на обособление в березинском леднике Деснянского (Ладожского) ледникового потока, продвигавшегося с северо-северо-запада на юго-юго-восток [25].

Для минералогического состава большинства ледниковых потоков характерна амфибол-ильменит-гранатовая ассоциация руководящих минералов Фенноскандии (амфибол, гранат) и минералов местного происхождения (ильменит). Среди транзитных минералов в морене Неманского (Балтийского) ледникового потока доминирует сидерит (6,8 %), характерный для расположенных северо-западнее девонских пород Прибалтики. Также в морене этого потока содержится больше пирита, рутила, кианита, силлиманита и глауконита, значительное количество (7,7 %) эпидота, т. е. минералов из мезозойских отложений на территории северо-западной Литвы и Беларуси.

В Припятском (Рижском) ледниковом потоке среди транзитных минералов доминирует сидерит (5,2 %) в сочетании с примесью доломита (2,5 %), апатита, кальцита и сфена, свойственных девонским породам, которые залегают в центральной Латвии и восточной Литве. Показательна примесь лейкоксена (5,7 %), эпидота (8,5 %) и акцессорных минералов – глауконита, ставролита, турмалина и др.

В березинской морене в бассейне р. Днепр, который находился в сфере влияния Днепровского (Чудского) ледникового потока, доля транзитных минералов уменьшается до 8,3 %, среди них ведущими компонентами становятся фосфат (5,5 %) и лимонит (4,1 %), увеличивается количество ставролита и сфена, что указывает на унаследованность состава от нижнепалеозойских и девонских пород, залегающих на востоке Эстонии, северо-западе России и севере Беларуси. В ряду минералов местных пород повышено содержание ильменита (до 19,3 %), заметно присутствие лейкоксена, пирита, эпидота, турмалина и других минералов, захваченных из встречающихся в данном районе мезозойских пород.

Приведенный состав морены свидетельствует о том, что ледниковые ложбины приурочены к четырем ледниковым потокам – Неманскому (Балтийскому), Припятскому (Рижскому), Днепровскому (Чудскому) и Деснянскому (Ладожскому) ледниковым потокам.

Морфогенетические типы ледниковых понижений. В березинской генерации возрастают участие ложбин и впадин ледниковой экзарации, выдавливания и размыва (50,0 %) и ложбин ледниковой экзарации и размыва (23,9 %), а доля врезов других типов снижается. Для 53,7 % ложбин березинского возраста проявляется унаследованность основных черт ранее сформированных врезов. Среди новообразованных структур впервые становятся отчетливо заметными впадины ледниковой экзарации и размыва, а также впадины ледниковой экзарации и выдавливания (рис. 2).

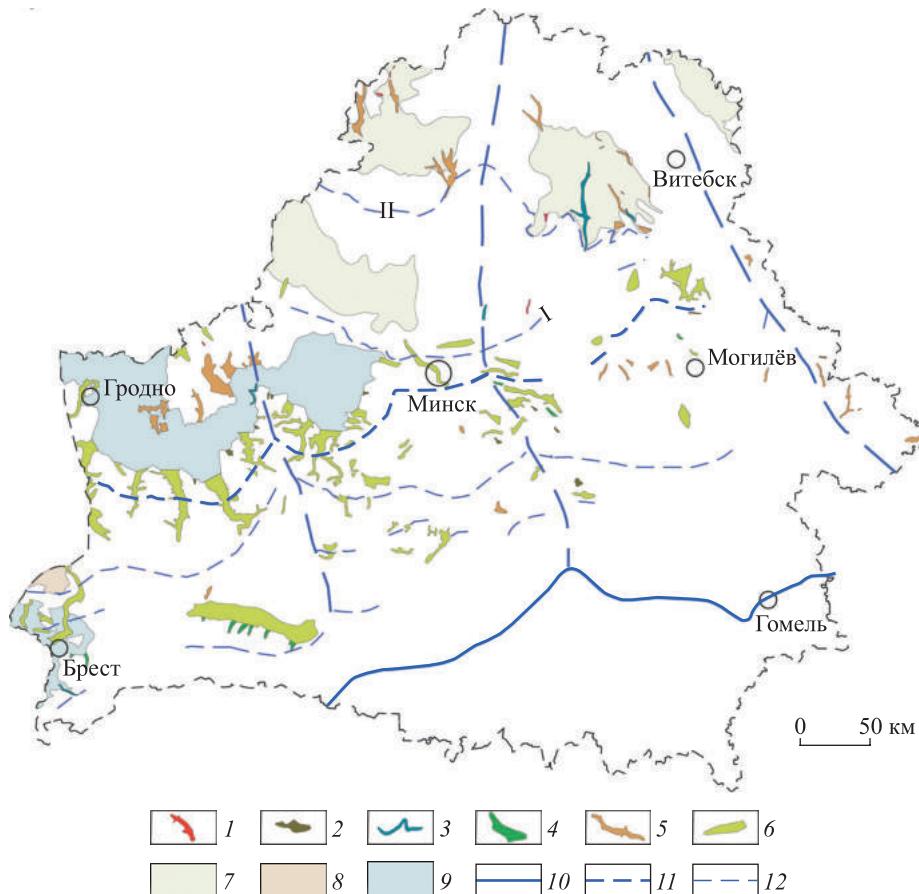


Рис. 2. Расположение основных морфогенетических типов березинских ледниковых ложбин и впадин:

- 1 – ложбины ледниковой экзарации; 2 – ложбины ледникового выдавливания;
- 3 – субглациальные водно-эрэзионные ложбины; 4–9 – врезы полигенетического происхождения
- (4 – ложбины ледниковой экзарации и выдавливания, 5 – экзарационно-эрэзионные ложбины,
- 6 – ложбины ледниковой экзарации, выдавливания и размыва, 7 – впадины ледниковой экзарации и размыва,
- 8 – впадины ледниковой экзарации и выдавливания, 9 – впадины ледниковой экзарации, выдавливания и размыва);
- 10 – граница березинского оледенения; 11 – граница минской стадии;
- 12 – границы фаз (I – заславской, II – мядельской) и осцилляций

Fig. 2. Location of the main morphogenetic types of the Berezina glacial valleys and basins:

- 1 – glacial exaration valleys; 2 – glacial extrusion valleys; 3 – tunnel valleys; 4–9 – incisions of a polygenetic origin
- (4 – valleys of glacial exaration and extrusion, 5 – exaration-erosion valleys,
- 6 – valleys of glacial exaration, extrusion and erosion, 7 – basins of glacial exaration and erosion,
- 8 – basins of glacial exaration and extrusion, 9 – basins of glacial exaration, extrusion and erosion);
- 10 – Berezina glaciation boundary; 11 – Minsk stage boundary;
- 12 – boundaries of phases (I – Zaslavl, II – Myadel) and oscillations

Крупные ледниковые впадины расположены в поверхности березинского ледникового горизонта на территории центрального, западного, юго-западного и северного регионов Беларуси. Они приурочены к понижениям поверхности дочетвертичных и ясельдинских пород, по которым продвигались ледниковые потоки и лопасти березинского оледенения.

Основу березинской генерации составляют крупные впадины полигенетического происхождения и троговые ложбины ледниковой экзарации, выдавливания и размыва. Эти понижения образуют изолированные субмеридиональные (продольные или радиальные) системы, направленные в сторону движения ледника, и субширотные (поперечные) системы, вытянутые вдоль ледникового фронта.

Простиранье в направлении течения ледника характерно для Дисненской, Полоцкой и Суражской впадин, которые расположены на поверхности коренных пород в центре, на западе и востоке северной

части Беларуси и приурочены к денудационной Северо-Белорусской равнине. Эти впадины являются звенями субмеридиональных систем макропонижений северо-запада Русской равнины, служивших динамическими осями ледниковых потоков березинского оледенения. Так, Дисненская впадина, Приморская низменность и Рижский залив входят в Рижско-Дисненскую систему низменностей, по которым продвигался Припятский (Рижский) ледниковый поток. Полоцкая впадина и Псковско-Великорецкая низменность в составе Псковско-Полоцкой радиальной полосы понижений направляли Днепровский (Чудский) ледниковый поток, представлявший собой выводной ледник. Суражская впадина связана с течением Деснянского (Ладожского) ледникового потока [14].

Дисненская, Полоцкая и Суражская впадины имеют слабо вытянутую в направлении движения ледника плановую форму длиной до 84 км, шириной до 78 км и площадью до 4,3 тыс. км². Для них характерны пологовогнутый профиль в разрезе, очень неровное днище и склоны, расчлененные многочисленными ложбинами, ваннами и скалистыми выступами (рис. 3).

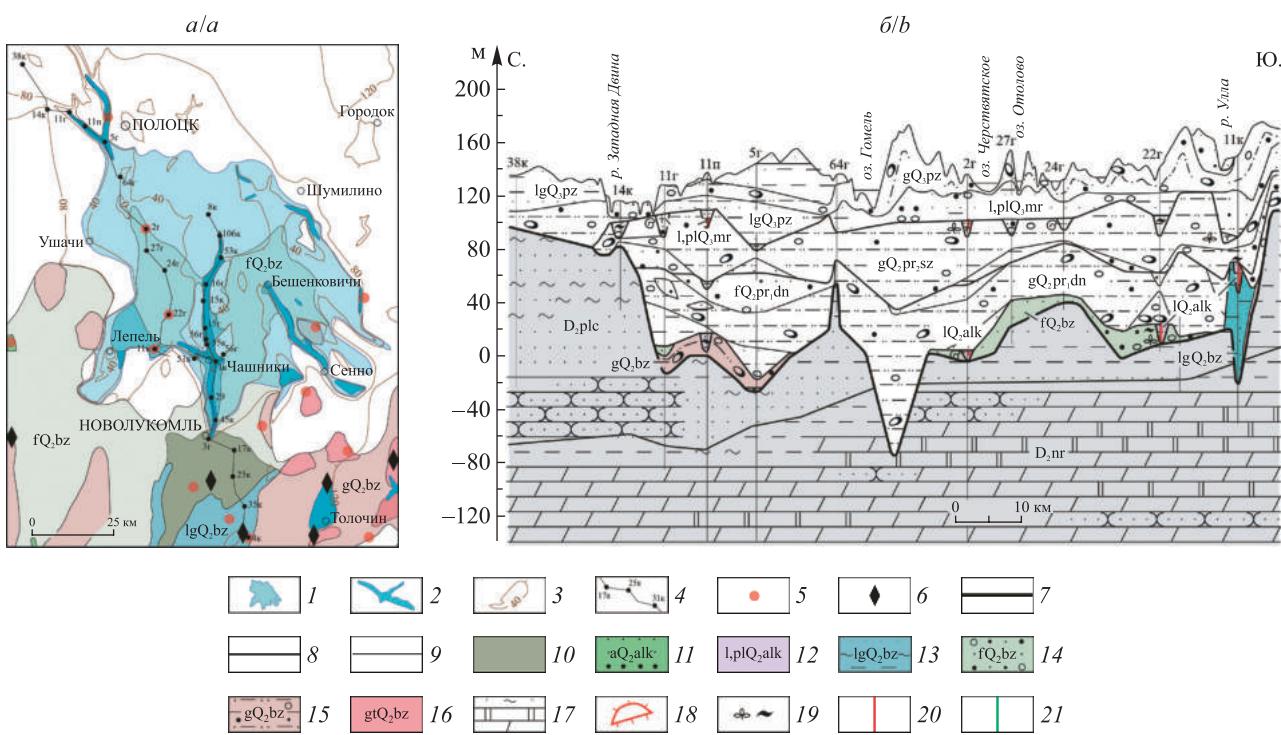


Рис. 3. Строение Полоцкой впадины (а – план поверхности березинского ледникового горизонта; б – геологический разрез в направлении с северо-запада на юго-восток по линии аг. Борковичи Верхнедвинского района – аг. Дворец Чашникского района):

1 – ледниковая впадина; 2 – ледниковая ложбина; 3 – изогипса; 4 – линия геологического разреза;

5 – скважины с палеонтологически изученными отложениями александрийского горизонта; 6 – гляциодислокации;

7 – граница между отложениями четвертичной и более древних систем; 8 – граница между горизонтами;

9 – граница между генетически разными одновозрастными отложениями; 10 – флювиогляциальные дельты и конусы выноса; 11 – кривичский аллювий; 12 – александрийские озерные и болотные отложения;

13 – лимногляциальные глины, алевролиты и пески; 14 – флювиогляциальные пески с гравием и галькой;

15 – березинская морена; 16 – конечно-моренные супеси и суглинки; 17 – девонские песчаники, алевролиты, доломиты и мергели; 18 – ледниковые отторженцы; 19 – остатки растений, гумусированность;

20 – интервал межледниковых отложений, изученный палинологически;

21 – интервал межледниковых отложений, изученный путем диатомового анализа

Fig. 3. Structure of the Polotsk glacial basin (a – plan of the surface of the Berezina glacial horizon; b – geological section in the direction from northwest to southeast along the line of the agrotown of Borkovichi, Verkhnedvinsk District – the agrotown of Dvoretz, Chashniki District):

1 – glacial basin; 2 – glacial valley; 3 – isohypse; 4 – geological section line;

5 – boreholes with paleontologically studied deposits of the Alexandrian interglacial; 6 – glacial tectonics;

7 – boundary between deposits of the Quaternary and older systems; 8 – boundary between horizons;

9 – boundary between genetically different sediments of the same age; 10 – fluvioglacial deltas and fans;

11 – Krivichi alluvium; 12 – Alexandrian lacustrine and swamp deposits; 13 – limnoglacial clays, silts and sands;

14 – fluvioglacial sands with gravel and pebbles; 15 – Berezina moraine; 16 – terminal moraine sandy loams and loams;

17 – Devonian sandstones, siltstones, dolomites and marls; 18 – erratic masses;

19 – plant remains, humus content; 20 – interval of interglacial deposits studied palynologically;

21 – interval of interglacial deposits studied by diatom analysis

Как правило, рассматриваемые впадины врезаны в маломощные (менее 100 м) девонские пески и слабосцементированные песчаники. Отложения содержат прослои глин, алевролитов и залегают на более плотных карбонатно-глинистых и глинисто-алевролитовых породах, поверхность которых имеет наклон к северу и северо-востоку. Переуглублены прежде всего участки днища вдоль оси и у дистальных склонов (см. рис. 3, *a*). Врез впадин составляет в среднем 20–35 м, а на углубленных участках достигает 60–90 м. На территории этих понижений наблюдается уменьшение мощности терригенной песчано-глинистой толщи девона по направлению к их центру и дистальным склонам пропорционально увеличению вреза (см. рис. 3, *b*). Исключение составляет только Суражская впадина на северо-востоке Беларуси. Будучи врезанной в более устойчивые к ледниковой экзарации карбонатные породы, она имеет наименьшую глубину (до 25 м).

Березинская толща отложений в целом является маломощной (обычно не превышает 20 м) и залегает с эрозионным (стратиграфическим) несогласием на девонских породах преимущественно на самых глубоких центральном и южном участках днища впадин с абсолютными отметками около 22–54 м. На северных и боковых склонах и присклоновых участках днища, а местами и в центре впадин она имеет ограниченное распространение или отсутствует. Здесь на экзарационной поверхности коренных пород регистрируются более молодые припятские отложения.

Во впадинах в строении березинской толщи отложений преобладает основная морена с гляциодинамическими текстурами. Также в ней присутствуют текстуры ассилияции пород ледникового ложа. На значительных по площади участках морена размыта или перекрыта флювиогляциальными и лимногляциальными отложениями. Сказанное позволяет заключить, что возникновение крупных Дисненской, Полоцкой и Суражской впадин в субчетвертичной поверхности в большей степени связано с экзарацией березинского ледника и в меньшей степени – с водно-ледниковой эрозией.

Впадины, направленные вдоль ледникового фронта, выделяются в краевой зоне березинского оледенения. Наиболее крупные формы наследуют местоположение и ориентировку ясельдинских гляциодепрессий, огибающих Центрально-Белорусский массив вдоль его северного склона с наклоном навстречу движению ледника [8; 26]. Однако по сравнению с впадинами ясельдинского оледенения рассматриваемые понижения имеют более значительные ширину (до 84–120 км), длину (до 90–150 км) и площадь (около 3,7–4,0 тыс. км²). Приращение их размеров прежде всего связано с экзарацией и выдавливанием березинским ледником отложений на дистальном и проксимальном склонах древних понижений и возвышенных участках, разделяющих соседние впадины. В результате в березинском рельефе возникает огромная субширотная дуга крупных Сопоцкинской, Мостовской и Налибокской впадин (см. рис. 1). Новообразованные поперечные Брестская, Каменецкая и Вилейская впадины тяготеют к равнинным или низменным участкам ложа и являются менее крупными, чем унаследованные макроформы.

Как правило, впадины рассматриваемого типа установлены на площадях развития мезозойских мергельно-меловых, палеоген-неогеновых песчано-глинистых пород и плейстоценовых доберезинских отложений, обладающих слабыми физико-механическими свойствами. Во впадинах на их поверхности залегает березинская ледниковая толща мощностью от 20 до 60 м, а местами 90 м и более. Как и в впадин ледниковой экзарации, у впадин краевой зоны в разрезах березинской толщи ведущее значение имеет основная морена с гляциодинамическими текстурами. Только здесь для нее характерно более широкое развитие складчатых и чешуйчато-надвиговых гляциоструктур и ледниковых отторженцев. Особенно примечательной чертой этих впадин является наличие гляциодислокаций в породах, окружающих понижения по южной периферии [3; 6]. Проявлениями гляциотектоники здесь выступают многочисленные гляциодиапиры и гляциокупола, отторжение и внедрение меловых, палеогеновых и неогеновых пород в четвертичную толщу в форме ледниковых отторженцев и складчато-чешуйчатых систем. Самые мощные гляциодислокации и напорные конечные морены выстроены дугообразной гирляндой у дистальных бортов Сопоцкинской, Мостовской и Налибокской впадин (см. рис. 1).

В пределах впадин над основной мореной широко встречаются флювиогляциальные отложения мощностью до 20–55 м. Они слагают зандровые равнины внутренней зоны понижений. Озерно-аллювиальные низины тяготеют к центральным пониженным участкам Налибокской и Мостовской впадин. Лимногляциальные низины характерны для Мостовской впадины. По тальвегу этих понижений с востока на запад фрагментарно прослеживается долина кривичского пра-Немана. Приведенные данные свидетельствуют о том, что обособление этих крупных впадин связано с экзарацией и выдавливанием рыхлых подстилающих четвертичных и дочетвертичных отложений лопастями березинского ледника и отчасти с фрагментарным размывом талыми ледниковыми водами.

Троговые ложбины рассекают днище и склоны большинства крупных впадин, а также используют главные речные долины. Было выделено три основных типа этих отрицательных форм:

- ложбины ледниковой экзарации и размыва;
- ложбины ледниковой экзарации, выдавливания и размыва;
- ложбины ледниковой экзарации и выдавливания.

Ложбины ледниковой экзарации и размыва в основном расположены на склонах и днище Дисненской и Погоцкой впадин и врезаны в девонские песчано-глинистые отложения. К ним относятся Видзовская, Браславская, Глубокская и Новополоцкая ложбины. Структуры этого типа также рассекают северный склон Мостовской впадины и возвышение березинского рельефа западнее г. Могилёва, находящиеся в области развития отложений от мелового до ясельдинского возраста. Ложбины ледниковой экзарации и размыва представляют собой длинные (до 45 км), широкие (до 4,5 км), глубокие (28–79 м), прямые или слабоизвилистые формы с корытообразным поперечным сечением. Обычно они ориентированы вдоль движения льда, наследуя незаполненные ложбины и долины доледникового рельефа. На участках суперпозиции наблюдается раздвигание бортов ложбин в стороны, в результате чего врезы в березинском рельефе более широкие и менее глубокие, чем на ясельдинской поверхности. Склоны и днище ложбин сложены основной мореной с текстурами пластического течения льда и текстурами внедрения. Местами у склонов в ней отмечаются отторженцы коренных пород. Конечных морен и инъективных боковых морен в окаймлении этих ложбин не обнаружено. Углубления поверхности днища ложбин ниже и выше морены выполнены лимногляциальными и флювиогляциальными породами. Такие формы на поверхности березинских отложений возникли в результате активной ледниковой экзарации (абразии и плакинга) и водно-ледниковой эрозии и аккумуляции.

Ложбины ледниковой экзарации, выдавливания и размыва и ложбины ледниковой экзарации и выдавливания являются наиболее многочисленными в березинской генерации. Они расчленяют дистальные склоны впадин, а также окаймляющие их гряды и возвышенности, расположенные в краевой зоне березинского ледника. К ним относятся Ясельдинская, Гродненско-Лососенская, Свислочская, Росинская, Зельвенская, Щаровская, Ушанская, Сервечская, Червенская, Александрийская, Копысско-Шкловская ложбины и др. Отмечается совпадение троговых ложбин с выступом фундамента Белорусской антиклизы, выходами в ложе ледника мергельно-меловых пород верхнего мела, песчано-глинистых пород мезокайнозоя и отложений ясельдинского ледникового горизонта. Более крупные ложбины часто приурочены к древним врезам на поверхности ясельдинских пород. В осевых частях сильно вытянутых ледниковых языков ложбины могут простираться в направлении течения льда и иметь спрямленную форму. Кроме того, такие ложбины могут следовать вдоль края языков в виде дуг, повторяющих их очертания. В краевой зоне нередко отмечаются серии парных дугообразных поперечных врезов, идущих в противоположные стороны от осевой продольной ложбины.

Березинские ложбины ледниковой экзарации, выдавливания и размыва представляют собой более крупные и отчетливо выраженные в погребенном рельефе формы по сравнению с ясельдинскими врезами схожего происхождения. Они имеют длину до 56 км, ширину до 4–8 км и, как правило, корытообразный профиль. В геологическом строении березинских ложбин ледниковой экзарации, выдавливания и размыва отмечаются следующие особенности: 1) преобладание в разрезах березинской толщи основной морены с гляциодинамическими текстурами; 2) широкое распространение в составе подморенной толщи лимногляциальных глин и реже флювиогляциальных разнозернистых песков; 3) частое размещение гляциодислокаций и отторженцев в основании и на бортах; 4) расположение вокруг ложбин конечно-моренных гряд и возвышенностей; 5) залегание на поверхности морены зандровых разнозернистых песков, галечников и нередко линз кривичского аллювия [3; 6].

Отчетливо проявляется генетическое родство между ледниковыми ложбинами и напорными конечно-моренами в Верхнем Приднепровье, хорошо изученном Г. И. Горецким [27]. Здесь располагаются Александрийская и Копысско-Шкловская ложбины (рис. 4).

Александрийская ложбина простирается на 28 км в направлении с северо-запада на юго-восток. Копысско-Шкловская ложбина проходит от г. Орши под современной долиной р. Днепр на юго-запад. Возле г. п. Копысь эти две ложбины сливаются в одну главную троговую ложбину. Плановая конфигурация данных ложбин древовидная, имеются меньшие ответвления, отходящие от них с различной глубиной врезания [28] (см. рис. 4, а).

Рассматриваемые ложбины наследуют глубокие древние экзарационно-эрзационные троговые формы и долину венедского пра-Днепра. В пределах ранее возникших врезов они углубляются в аллювиальные, ледниковые и девонские породы на 50–80 м. Эти ложбины являются более мелкими, но превосходят ясельдинские врезы по ширине (4–6 км). В поверхности березинских отложений их днище находится на абсолютных отметках 117–135 м, т. е. на 23–25 м ниже бортов.

В обрамлении ложбин располагаются напорные конечные морены, которые с юго-западной стороны окаймляют Александрийскую ложбину и с юго-восточной стороны окружают Копысско-Шкловскую ложбину, оконтуривая ледниковый язык. Березинские моренные и подморенные флювиогляциальные и лимногляциальные отложения дислоцированы в гляциокупола и гляциодиапиральные складки в основании ложбин, сорваны и отдавлены в виде надвиговых пачек и отторженцев на склоны и конечно-моренные гряды (см. рис. 4, б и в).

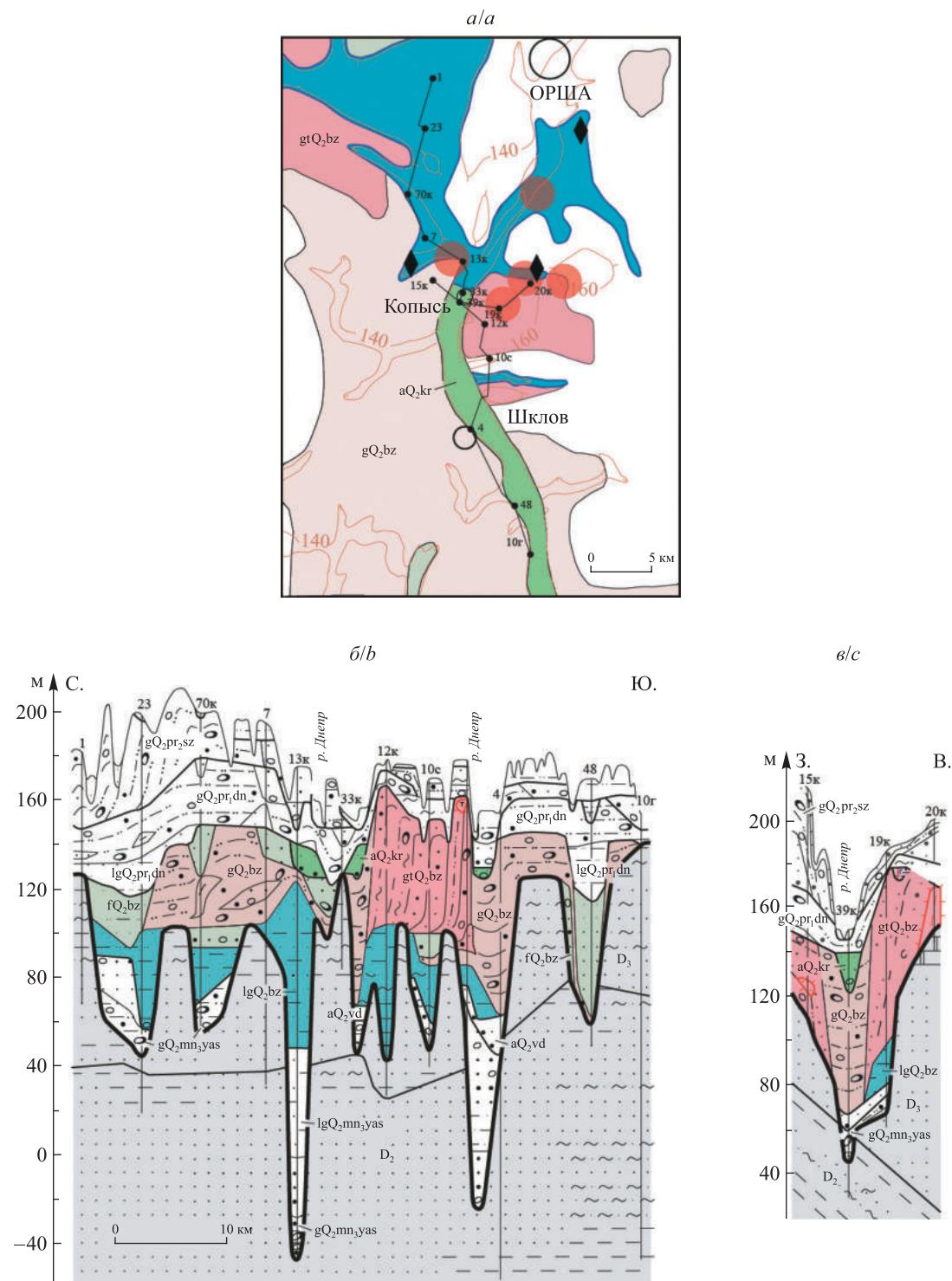


Рис. 4. Соотношение Александрийской и Копысской-Шкловской ложбин с напорными конечными моренами (а – план поверхности березинского ледникового горизонта; б – геологический разрез меридионального простираия по линии д. Белево Оршанского района – аг. Добреяка Могилёвского района; в – поперечный разрез по линии д. Борки-1 Шкловского района – д. Краснопольцы Оршанского района).
 Условные обозначения см. на рис. 3

Fig. 4. Correlation of the Alexandria and Kopyssko-Shklovskaya valleys with push end moraines
 (a – plan of the surface of the Beresina glacial horizon; b – geological section of meridional extend
 along the line of the village of Belevo, Orsha District – the agrotown of Dobreika, Mogilev District; c – cross section
 along the line of the village of the village of Borki-1, Shklov District – the village of Krasnopoltsy, Orsha District).
 Symbols see on fig. 3

На днище ложбин морену подстилают флювиогляциальные гравийно-галечные пески, ленточные глины, слоистые алевриты и тонкие пески мощностью 10–60 м, а также песчано-алевритовые отложения гляциоаллювиального происхождения. Сверху ее перекрывают разнозернистые флювиогляциальные пески с гравием и галькой. Вдоль тальвега Копысского-Шкловской ложбины прослеживается долина кривичского пра-Днепра.

Таким образом, рассмотренные троговые ложбины являются результатом совместного проявления экзарации, отдавливания и деформирования пород древних врезов ледниковых языками, локального водно-ледникового размыва отложений на их днище.

Субглациальные водно-эрзационные ложбины играют менее заметную роль в поверхности березинских отложений по сравнению с ложбинами других типов. В отличие от аналогичных ложбин ясельдинской генерации они встречаются на всей территории краевой зоны березинского оледенения обособленно и не образуют ветвящихся систем. К наиболее крупным субглациальным водно-эрзационным ложбинам принадлежат Чашникская, Сенненская, Цнянская, Кремушевская и Малоритская ложбины (рис. 5).

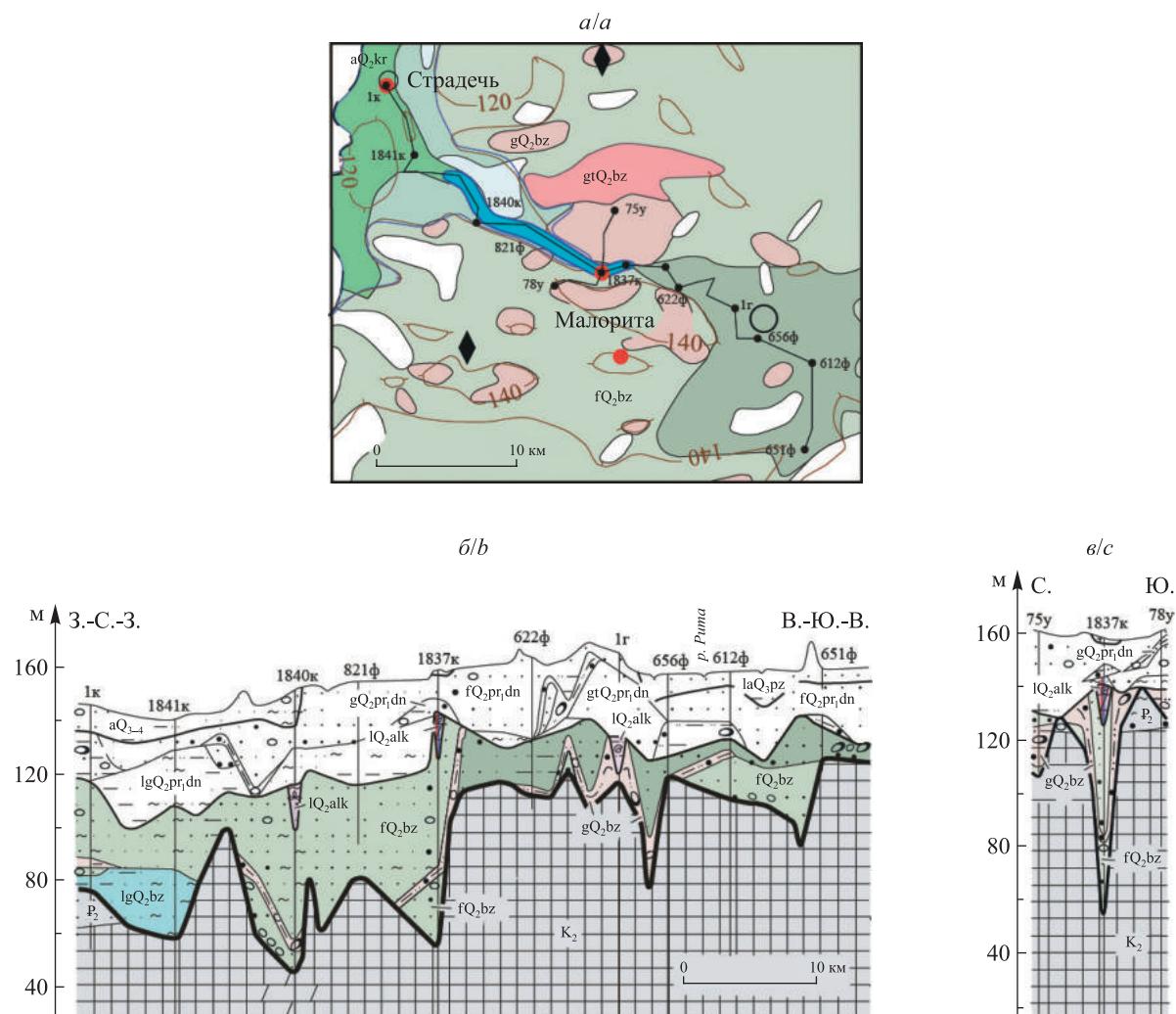


Рис. 5. Строение Малоритской ложбины и флювиогляциального конуса выноса на ее дистальном окончании
(*a* – план поверхности березинского ледникового горизонта; *b* – продольный разрез по линии аг. Страдечь Брестского района – аг. Хотислав Малоритского района; *c* – поперечный разрез по линии д. Язвин – д. Богуславка Малоритского района).

Условные обозначения см. на рис. 3

Fig. 5. Structure of the Maloritskaya tunnel valley and the fluvioglacial fan at its distal end
(*a* – plan of the surface of the Berezina glacial horizon; *b* – longitudinal section along the line of the agrotown of Stradech, Brest District – the agrotown of Khotislav, Malorita District; *c* – cross section along the line of the village of Yazvin – the village of Boguslavka, Malorita District).
Symbols see on fig. 3

В березинском рельефе ложбины указанного типа чаще встречаются в крупных глубоких впадинах, служивших ложем для ледниковых лопастей. Здесь они тяготеют к зафронтальной зоне лопастей и нередко наследуют предшествующие продольные ложбины и зоны активных разломов. Новейшие исследования показали [29], что эти ложбины характеризуются меридиональным и веерообразным расположением, значительной относительной глубиной (до 116–142 м) и минимальными абсолютными отметками вреза (до –122 м) при сравнительно небольшой ширине (до 0,5 км), каньонообразным профилем в березинской поверхности.

В строении ложбин участвуют хорошо промытые галечно-валунные и гравийно-галечные отложения, разнозернистые пески субгляциальных потоков (у подошвы) и основная морена (у поверхности). Днище переуглублений местами перекрывается песчаными отложениями зандрового типа, а на наиболее низких участках – шоколадными глинами. Ложбины заканчиваются обширными флювиогляциальными конусами выноса или дельтами в березинской поверхности.

Примером ложбины субгляциальной водно-эрэзионной природы является Малоритская ложбина между аг. Страдечь Брестского района и г. Малоритой (см. рис. 5, а).

Малоритская ложбина располагается на дистальной периферии Брестской впадины в краевой зоне ледниковой лопасти, занимавшей пространство этой впадины во время оледенения. Данная ложбина наследует зону активного Северо-Ратновского разлома, имеет спрямленную форму, длину 24 км, ширину около 250–500 м, глубину 5–22 м в березинском рельефе, врезается в палеогеновые пески и меловые мергель и мел. Подошва ложбины волнистая, борта крутые, поперечный профиль *V*-образный (см. рис. 5, в). В основном ложбину заполняют отложения стремительных потоков талых вод: слоистые разнозернистые пески, слои галечника и песчано-гравийной смеси. На поверхности их сменяет покров основной морены мощностью 2–10 м, слагающий борта ложбины. Днище ложбины выполнено зандровыми песками и кривичским аллювием пра-Буга. В пониженной центральной части ложбины встречаются котловины с озерными осадками александрийского межледникового [30]. В районе г. Малориты в устье ложбины представлены мощные скопления флювиогляциальных разнозернистых песков в виде обширного конуса выноса (см. рис. 5, а и б).

Таким образом, возникновение субгляциальных водно-эрэзионных ложбин связано с канализированной эрозией талых ледниковых вод у основания ледника [29].

Обсуждение происхождения ложбин

Березинский ледниковый покров вызвал появление новой генерации ложбин и впадин в четвертичной толще Беларуси, более молодой, чем ясельдинская генерация. Возникновение врезов березинской генерации тесно связано с особенностями гляциодинамики и структуры ледникового покрова, а также геологического строения, литологии пород, рельефа ледникового ложа и др. Значение имели следующие особенности: 1) расположение почти всей территории страны в полосе деятельности периферического ледникового покрова, а ее северной части во внутренней зоне ледника; 2) радиально-секторальная структура ледникового покрова, дифференциация его на четыре крупных активных выводных ледника и лопасти; 3) ареальная дегляциация и прерывистый ход отступания ледника, неоднократные (около шести случаев) остановки и подвижки его края ранга фаз (заславская и мядельская) и осцилляций, а также ранга стадии (минская) на рубежах полос конечно-моренных гряд и возвышенностей.

Приуроченность Дисненской, Полоцкой и Суражской впадин к субмеридиональным системам макропонижений субчетвертичной поверхности северо-запада Русской равнины, малая мощность и особенности состава и текстуры основной морены считаются признаками возникновения этих форм в условиях преобладания процессов ледниковой экзарации, что отражено в публикациях [4; 14; 15]. Экзарационное понижение поверхности коренных пород в пределах низменностей северо-запада Русской равнины на осевых участках ледниковых потоков исследователи оценивают по-разному: В. А. Исаченков [14] придерживается мнения, что величина этого понижения составляет в среднем 60–80 м, О. П. Абботиньш [15] считает ее равной 50–70 м, а А. Н. Маккавеев [31] определяет как 62 ± 16 м. На севере Беларуси величину экзарационного понижения поверхности коренных пород можно выяснить в пределах Полоцкой и Дисненской впадин. Здесь выявлены маломощные девонские пески и слабосцементированные песчаники, выходящие на субчетвертичную поверхность, и установлена их мощность на днище и за пределами впадин, что позволяет определить толщину удаленных пород. Согласно геологическому разрезу (см. рис. 4, б) на днище Полоцкой впадины снесены пески и песчаники полоцкого горизонта мощностью 20–95 м и часть (до 8 м) аргиллитов и мергелей наровского надгоризонта. Мощность удаленных отложений среднего девона в Дисненской впадине составляет 20–60 м.

Впадины образуются под активно движущимися ледниковыми потоками в пределах благоприятно ориентированных понижений ложа. Считается, что движение льда должно быть в виде интенсивного пластического течения или глыбового скольжения. Типы текстур в основной морене свидетельствуют

о том, что процесс экзарации осуществлялся в основном путем захвата тонких слойков, отрыва и отщепления небольших обломков пород ложа (плакинга), а также посредством царапания и истирания поверхности ложа (корразии и абразии) вдоль динамически активных осей ледниковых потоков [15]. Ледниковые потоки за счет экзарации понизили субчетвертичную поверхность на обширных площадях и привели к заложению Дисненской, Полоцкой и Суражской впадин, а также обособлению в ледораздельных зонах разобщенных субмеридионально вытянутых поднятий и выступов [4].

На заключительных этапах развития экзарационных впадин и ложбин сформировался слой основной морены, значительные площади их днища и склоны размылись потоками талых ледниковых вод, локальными лимногляциальными водоемами и оказались в разной степени занесенными и сглаженными водно-ледниковыми аккумуляциями.

Второй тип макропонижений, широко представленных в березинской генерации, – это впадины ледниковой экзарации, выдавливания и размыва (Сопоцкинская, Мостовская, Налибокская и Брестская впадины) и впадины ледниковой экзарации и выдавливания (Каменецкая впадина) прикраевой зоны. Часто их называют лопастными бассейнами или гляциодепрессиями [32]. Эти макропонижения выражены во внутренней зоне березинского оледенения вблизи края гигантских ледниковых лопастей, которые выделялись в процессе деградации оледенения в заславскую и мядельскую фазы и минскую стадию повторного наступления ледника. Связь впадин с понижениями ясельдинской поверхности и площадями развития мягких пород, гляциодинамические текстуры основной морены, встречаемость впадин в комплексах краевых ледниковых образований в сочетании с гляциоструктурами, ледниковыми отторженцами и гляциотектоническими деформациями на южной периферии расцениваются исследователями как результат ледниковой экзарации и выдавливания субстрата [3; 6; 8].

Экзарация ложа имела место в fazu наступления и стационарного состояния ледника, когда по впадинам продвигались ледниковые потоки. Экзарационное воздействие ледниковых потоков прежде всего проявлялось вдоль их динамической оси в сносе созданных ранее плейстоценовых и коренных отложений на склонах, центральных самых низких участках днища древних понижений и возвышений, разделяющих соседние понижения. В таких местах полностью или частично снесены березинские отложения прогляциальной свиты, ясельдинский ледниковый горизонт и часть меловых коренных пород общей мощностью до 40–50 м в Налибокской впадине и 60–70 м в Мостовской впадине. Разрушение пород ложа в большей степени осуществлялось посредством экзарации срезания, отрыва, отщепления и выдавливания, в меньшей степени – посредством ледниковой абразии.

Основным процессом в образовании впадин считается выдавливание субстрата в fazu дегляциации. Ранее сформированные впадины были преобразованы гигантскими активными лопастями. У дистальных бортов впадин вследствие повторных надвиганий краевых зон ледниковых лопастей во льду появились разрывы, складки, гляциодинамические чешуйчатые надвиги, а в отложениях ложа произошли срывы, отдавливание, деформирование и создание гляциодислокаций различного типа [3; 6; 15]. Вследствие этого на ряде весьма крупных участков ложа на южной периферии впадин была снесена мощная толща доберезинских плейстоценовых меловых пород (до 37–43 м и приблизительно 15–52 м соответственно). В итоге краевые зоны лопастей березинского ледника смогли расширить и углубить предшествующие впадины и образовать в периферийной зоне окаймляющие полосы напорных конечно-моренных возвышенностей и гряд. Преобразование впадин посредством гляцигенной аккумуляции, водно-ледниковых и аллювиальных процессов завершило их развитие.

Троговые ложбины являются прямым результатом линейной ледниковой экзарации. По происхождению в березинской генерации выделены две основные разновидности этих форм:

- троговые ложбины эрозионно-экзарационной природы;
- троговые ложбины ледниковой экзарации, выдавливания и размыва.

Ложбины первой разновидности в основном вырабатывались в поверхности девонских отложений на севере Беларуси, в меньшем количестве – в других регионах. Они формировались на дистальных склонах Дисненской и Полоцкой впадин, в зонах активных разломов и уступов, обращенных навстречу продвигавшемуся леднику, а также в более податливых породах. Считается, что на таких участках абразия и срыв глыб коренных пород и унос их движущимся льдом усиливалась, в результате чего возникали желоба и протяженные продольные ложбины (Новополоцкая, Шумилинская, Каневская ложбины и др.). Часто троговые эрозионно-экзарационные ложбины появлялись на месте ранее существовавших глубоких ясельдинских врезов, ориентированных вдоль движения ледника. Начальные процессы их формирования обычно включали приледниковую водно-ледниковую эрозию и осадконакопление. Продвижение ледяных струй вдоль ложбин сопровождалось ускорением течения, концентрацией напряжений и эродирующими действиями на породы ложа, разрушением бортов и углублением днища. Подобным образом сформировались широкие унаследованные ложбины ледниковой экзарации и размыва северного склона Мостовской и Дисненской впадин.

Выработка троговых ложбин второй разновидности происходила в краевой зоне ледниковых языков, которые врезались в доледниковые линейные понижения, вытянутые в направлении движения ледника. Такими формами являлись глубокие ясельдинские ложбины субмеридиональной ориентации на дистальных склонах Сопоцкинской, Мостовской, Налибокской и Вилейской впадин, ложбины вдоль долин пра-Днепра, пра-Березины, пра-Случи и др. Формирование этих структур включало следующие сменяющие друг друга события и процессы: 1) размыв потоками талых ледниковых вод и подпрудными водоемами днищ и нижних участков древних врезов и частичное заполнение их покровами флювиогляциальных и лимногляциальных отложений; 2) продвижение по ложбинам ледяных потоков, углубление и расширение ложбин главным образом за счет экзарации пород на днище и бортах, создание основной морены (трансгрессивная фаза); 3) возникновение, задержки и подвижки ледниковых языков в пределах осевых ложбин, создание дугообразных поперечных врезов и напорных конечных морен вследствие выдавливания и деформирования материала вдоль края языков (фаза деградации); 4) преобразование сформированных ложбин посредством водно-ледниковой эрозии и аккумуляции (стагнация ледника).

Образование субглациальных водно-эрэзионных ложбин обусловливалось канализированной эрозией талых ледниковых вод у основания ледника, проявившейся в деградационную фазу оледенения в зафронтальной зоне лопастей, а также на дистальных склонах впадин вдоль продольных понижений и зон разломов. Предполагаемым механизмом их формирования были быстрые выбросы больших объемов талой воды, накопившейся в подледных или наледных водоемах [27; 29]. Результатом врезания подледных потоков в коренной субстрат и расширения подледных каналов стали рытвины с флювиогляциальными дельтами и конусами выноса в устьях.

Выводы

Березинская генерация эрозионных форм широко развита в поверхности дочетвертичных отложений и основании четвертичной толщи области березинского оледенения на территории Беларуси. Она отличается характером расположения, разнообразием состава формирующих ее морфогенетических типов ледниковых ложбин и впадин, отчетливой выраженностью в погребенном рельефе и условиями образования.

В расположении березинских врезов обнаруживается связь с древними низинами, участками развития деформируемых пород со скальными выступами в цоколе и зонами активных разломов преимущественно субмеридионального, субширотного и северо-восточного направлений, а также радиально-секторальной структурой и динамикой березинского ледника. При этом большинство ложбин и впадин приурочены к полосам развития краевого ледникового рельефа, крупным бассейнам, соответствующим ледниковым потокам и лопастям, и границам остановок и возвратно-трансгрессивных подвижек края ледника.

По морфологии и условиям образования в березинской генерации выделено девять типов ледниковых врезов. Уникальность березинской генерации заключается:

- в преобладании ложбин и впадин ледниковой экзарации, выдавливания и размыва (50,0 %) и ложбин ледниковой экзарации и размыва (23,9 %) и снижении доли ложбин других типов;
- наиболее существенной роли крупных впадин полигенетического происхождения и троговых ложбин;
- наследовании большинством ложбин основных черт ранее сформированных врезов.

Формирование впадин ледниковой экзарации и размыва происходило во внутренней зоне березинского оледенения вдоль динамически активных осей ледниковых потоков в пределах благоприятно ориентированных понижений и было результатом плакинга, корразии и абразии девонских песчаников на севере страны. В формировании впадин краевой зоны березинского оледенения основными процессами являлись ледниковая экзарация и выдавливание. В фазу выдвижения ледник вызывал на площадях определенного геологического строения абразию, срезание, отрыв, отщепление и выдавливание пород ложа. Такие участки располагались вдоль линий наиболее быстрого течения льда, на территории низин ясельдинского рельефа, площадях развития мягких пород и неглубокого залегания скальных выступов (низины, огибающие с севера Белорусскую антеклизы). Экзарационное понижение поверхности ложа здесь составляло несколько десятков метров. В фазу деградации, когда впадины заняли гигантские активные лопасти и преобразовались в гляциодепрессии, повторные надвигания лопастей вызвали заложение складчатых и разрывных гляциоструктур в краевом льду, а также срыв, отдавливание, деформирование и создание гляциодислокаций различного типа в отложениях ложа. В центре и на западе страны в ходе этого процесса несколько десятков метров пород субстрата было снесено и выдавлено на дистальный склон гляциодепрессий. В итоге краевые зоны лопастей березинского ледника смогли расширить и углубить предшествующие впадины и образовать в периферийной зоне окаймляющие полосы напорных конечно-моренных возвышенностей и гряд.

Троговые ложбины вырабатывались как во внутренней, так и в краевой зоне на всех этапах развития березинского оледенения. Их формирование включало следующие сменяющие друг друга события и процессы: 1) размыв потоками талых ледниковых вод и подпрудными водоемами днищ и нижних участков древних врезов и частичное заполнение их покровами флювиогляциальных и лимногляциальных отложений; 2) продвижение по ложбинам наиболее быстрых масс льда, углубление и расширение ложбин главным образом за счет экзарации пород на днище и бортах, создание основной морены (трансгрессивная фаза); 3) возникновение, задержки и подвижки ледниковых языков в пределах осевых ложбин, создание дугообразных поперечных врезов и напорных конечных морен вследствие выдавливания и деформирования материала вдоль края языков (фаза деградации); 4) преобразование сформированных ложбин посредством водно-ледниковой эрозии и аккумуляции (стагнация ледника). В эволюции ложбин в северных районах Беларуси третьего события могло и не быть.

Образование субглациальных водно-эрэзионных ложбин обусловливалось канализированной эрозией талых ледниковых вод у основания ледника, проявившейся в деградационную фазу оледенения в зафронтальной зоне лопастей на дистальных склонах впадин и вдоль зон разломов. Быстрые выбросы больших объемов талой воды, накопившейся в подледных или наледных водоемах, сопровождались врезанием подледных потоков в коренной субстрат и расширением подледных каналов в основании ледника, а также формированием флювиогляциальных дельт и конусов выноса в их устьях.

Библиографические ссылки

1. Stackebrandt W, Ludwig AO, Ostaficzuk S. Base of Quaternary deposits of the Baltic Sea depression and adjacent areas (map 2). *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*. 2001;8(1):13–19.
2. Kehew AE, Piotrowski JA, Jørgensen F. Tunnel valleys: concepts and controversies – a review. *Earth-Science Reviews*. 2012; 113(1–2):33–58. DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.02.002.
3. Горецкий ГИ. Особенности палеопотамологии ледниковых областей (на примере Белорусского Понеманья). Минск: Наука и техника; 1980. 288 с.
4. Комаровский МЕ. Палеоложбины Белорусского Поозерья. Минск: Белорусский государственный университет; 2009. 183 с.
5. Горецкий ГИ. О происхождении и возрасте глубоких долинообразных понижений в рельефе постели антропогеновых отложений ледниковых областей. В: Горецкий ГИ, Кригер НИ, редакторы. *Нижний плейстоцен ледниковых районов Русской равнины*. Москва: Наука; 1967. с. 17–34.
6. Левков ЭА. *Гляциотектоника*. Минск: Наука и техника; 1980. 280 с.
7. Комаровский МЕ, Хилькевич ЕВ. Соотношение между ледниковыми ложбинами и активными разломами на территории Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2018;2:106–117. EDN: WCZTQW.
8. Комаровский МЕ, Семенюк АС. Значение геологического строения и литологии коренных пород для распределения и происхождения ледниковых ложбин на территории Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2020;2:78–90. DOI: 10.33581/2521-6740-2020-2-78-90.
9. Комаровский МЕ. Значение рельефа в возникновении ледниковых ложбин в Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2021;1:93–106. DOI: 10.33581/2521-6740-2021-1-93-106.
10. Гайгалас АИ, Мелешите МИ. Погребенные палеоврезы на территории Балтийского региона и формирование плейстоценовых морен. В: Алексеев МН, Николаев НИ, Яхимович ВЛ, редакторы. *Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин*. Москва: Наука; 1984. с. 187–192.
11. Раукас АВ, Таваст ЭХ. Морфология и генезис переуглублений на территории Северной Прибалтики. В: Алексеев МН, Николаев НИ, Яхимович ВЛ, редакторы. *Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин*. Москва: Наука; 1984. с. 180–187.
12. Piotrowski JA. Tunnel-valley formation in northwest Germany – geology, mechanisms of formation and subglacial bed conditions for the Bornhöved tunnel valley. *Sedimentary Geology*. 1994;89(1–2):107–141. DOI: 10.1016/0037-0738(94)90086-8.
13. Jørgensen F, Sandersen PBE. Buried and open tunnel valleys in Denmark – erosion beneath multiple ice sheets. *Quaternary Science Reviews*. 2006;25(11–12):1339–1363. DOI: 10.1016/j.quascirev.2005.11.006.
14. Исаченков ВА. Плейстоценовая экзарация и происхождение котловин крупных приледниковых озер северо-запада Русской равнины. В: Ленинградский политехнический институт имени М. И. Калинина. *Природа и хозяйственное использование озер северо-запада Русской равнины. Том 1, выпуск 1*. Ленинград: [б. и.]; 1976. с. 3–10.
15. Аболтиныш ОП. *Гляциоструктура и ледниковый морфогенез*. Рига: Зинатне; 1989. 284 с.
16. Карпухина НВ. *Геоморфологическое строение и история развития рельефа Чудско-Псковской низменности* [диссертация]. Москва: [б. и.]; 2013. 189 с.
17. Малаховский ДБ. Проблемы генезиса и возраста рельефа северо-запада Русской платформы. *Геоморфология и палеогеография*. 1995;2:44–53.
18. Carr SJ. The North Sea basin. In: Ehlers J, Gibbard PL, editors. *Quaternary glaciations – extent and chronology. Part 1, Europe*. Amsterdam: Elsevier; 2004. p. 261–270 (Rose J, editor. *Developments in Quaternary sciences; volume 2*). DOI: 10.1016/S1571-0866(04)80077-0.
19. Ehlers J, Eissmann L, Lippstreu L, Stephan H-J, Wansa S. Pleistocene glaciations of north Germany. In: Ehlers J, Gibbard PL, editors. *Quaternary glaciations – extent and chronology. Part 1, Europe*. Amsterdam: Elsevier; 2004. p. 135–146 (Rose J, editor. *Developments in Quaternary sciences; volume 2*). DOI: 10.1016/S1571-0866(04)80064-2.
20. Lindner L, Marks L. New approach to stratigraphy of palaeolake and glacial sediments of the younger Middle Pleistocene in mid-eastern Poland. *Geological Quarterly*. 1999;43(1):1–8.

21. Комаровский МЕ. Гляциодинамическая модель поозерского оледенения на территории Беларуси. *Літасфера*. 2013;2:34–40. EDN: YVOGOD.
22. Матвеев АВ, редактор. *Палеогеография кайнозоя Беларуси*. Минск: Институт геологических наук НАН Беларуси; 2002. 163 с.
23. Гайгалас АИ. *Гляциоседиментационные циклы плейстоцена Литвы*. Вильнюс: Мокслас; 1979. 98 с.
24. Астапова СД. Корреляция и расчленение моренных отложений краевых ледниковых образований Белорусской гряды по данным минералого-geoхимических исследований. В: Горецкий ГИ, Астапова СД, Вальчик МА, Величкович ФЮ, Вознячук ЛН, Дромашко СГ и др. *Комплексное изучение ледниковой формации и краевых ледниковых образований Белоруссии с целью их глобальной корреляции*. Минск: Институт геохимии и геофизики Академии наук БССР; 1980. с. 109–154.
25. Величко АА, Писарева ВВ, Фаустова МА. Оледенения и межледниковые Восточно-Европейской равнины в раннем и среднем плейстоцене. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2005;13(2):84–102. EDN: HSIZXN.
26. Комаровский МЕ. Морфология и генезис ясельдинских ледниковых ложбин в Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2022;2:117–143. DOI: 10.33581/2521-6740-2022-2-117-143.
27. Горецкий ГИ. *Аллювиальная летопись великого пра-Днепра*. Москва: Наука; 1970. 491 с.
28. Горецкий ГИ. Об изучении генетических связей краевых ледниковых образований, ложбин ледникового выпахивания и размыва, гляциодислокаций и отторженцев. В: Асеев АА, Горецкий ГИ, Кригер НИ, Погуляев ДИ, Салов ИН, Шик СМ, редакторы. *Краевые образования материковых оледенений*. Москва: Наука; 1972. с. 64–69.
29. Хилькевич ЕВ. *Геологическое строение, морфология и формирование субгляциальных водно-эрзационных ложбин Белорусского Поозерья в квартере* [диссертация]. Минск: [б. и.]; 2022. 165 с.
30. Хурсевич ГК. Диатомей из лихвинских отложений разреза скв. 7 у д. Гвоздица и их стратиграфическое и палеогеографическое значение. В: Кузнецов ВА, Хотько ЖП, редакторы. *Вопросы геологии, геохимии и геофизики земной коры Белоруссии. Материалы 1-й научной конференции молодых ученых; 12–13 мая 1974 г.* Минск: Наука и техника; 1975. с. 124–128.
31. Маккавеев АН. Опыт количественной оценки рельефообразующей роли древних ледников на северо-западе европейской части СССР. *Геоморфология*. 1975;2:44–50.
32. Каплянская ФА, Тарноградский ВД. *Гляциальная геология*. Санкт-Петербург: Недра; 1993. 328 с.

Получена 11.02.2024 / исправлена 12.09.2024 / принята 17.03.2025.
Received 11.02.2024 / revised 12.09.2024 / accepted 17.03.2025.

УДК 55:004.9(075.8)(076.5)

ГИС-СРЕДСТВА В ГЕОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА *GMT*

В. И. ЗУЙ¹⁾

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

Аннотация. Представлены краткие сведения о программном пакете *Generic Mapping Tools (GMT)*, который входит в программу подготовки студентов и магистрантов геологических специальностей на факультете географии и геоинформатики Белорусского государственного университета в качестве одного из ГИС-средств и позволяет создавать высококачественные графические построения и анимации при выполнении курсовых и дипломных работ, написании магистерских диссертаций, научных статей и др. Рассмотрены основные функциональные возможности пакета, отмечены его главные отличия от коммерческих ГИС. Приведены примеры использования программного пакета *GMT* для решения геолого-геофизических задач в процессе освоения этого ГИС-средства студентами.

Ключевые слова: программные пакеты ГИС; картографирование; ГИС-графика; практика применения *GMT*; функциональные возможности *GMT*; *GMT*-скрипты.

GIS TOOLS IN GEOLOGY BASED ON *GMT* SOFTWARE PACKAGE

V. I. ZUI^a

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

Abstract. The article provides brief information about the *Generic Mapping Tools (GMT)* software package, which is included in the training programme for undergraduate and graduate students of geological specialties at the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University as one of the GIS tools. It allows creating high-quality graphic figures and animations when completing term papers and theses, writing master's dissertations, scientific articles, etc. The main functional capabilities of the package are considered, and its main differences from commercial GIS are noted. Examples of using the *GMT* software package to solve geological and geophysical problems in the process of mastering this GIS tool by students are considered.

Keywords: GIS software packages; mapping; GIS graphics; *GMT* practice; *GMT* functionality; *GMT* scripts.

Введение

Программный пакет *Generic Mapping Tools* («Универсальные картографические инструменты», сокращенно *GMT*) имеет более 60 модулей (утилит), конкретные функции каждого из которых определяются многочисленными опциями. Модули предназначены для обработки геологических, географических

Образец цитирования:

Зуй ВИ. ГИС-средства в геологии на основе программного пакета *GMT*. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;1:125–140.
EDN: EXLQCX

For citation:

Zui VI. GIS tools in geology based on *GMT* software package. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;1:125–140. Russian.
EDN: EXLQCX

Автор:

Владимир Игнатьевич Зуй – доктор геолого-минералогических наук, профессор; профессор кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики.

Author:

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



и других исходных данных и создания высококачественных графических иллюстраций (от простых графиков $x - y$ до искусственно освещенных карт рельефа и трехмерных изображений моделей поверхностей, различных картографических проекций), а также анимаций. В отличие от коммерческих ГИС пакет *GMT* представляет собой свободно распространяемый программный продукт, доступный для скачивания из интернета, что является положительным фактором как для студентов, магистрантов, аспирантов, так и для других пользователей при подготовке курсовых и дипломных работ, научных отчетов, презентаций и научных статей. Программный пакет *GMT* легко устанавливается на ноутбук. Объем оперативной памяти и свободное место на жестком диске для него некритичны. В отличие от *ArcGIS*, *QGIS*, *Oasis montaj*, *Credo*, *Surfer* и других ГИС пакет *GMT* не имеет графического интерфейса, однако это компенсируется обработкой больших массивов исходных данных при разных картографических работах. В остальном он сопоставим со многими коммерческими ГИС с высококачественной графикой [1–6].

Ряд утилит пакета *GMT* ориентированы на работу с геолого-геофизическими данными [7], они успешно используются в геолого-производственной практике и научной сфере. В процессе построения изображений программист может применять вычислительно-логические операции, использовать серию цветовых палеток пакета или дополнять их собственными цветовыми палетками в зависимости от индивидуальных предпочтений. Пакет *GMT* содержит многие функции, присущие коммерческому программному обеспечению, и поддерживает более 30 картографических проекций [1; 2].

Начиная с версий 5.0 и выше в программном пакете *GMT* предусмотрены две формы записи скриптов – традиционная (классическая) и современная (новая). Они выдают графические результаты высокого качества в векторных форматах PostScript (PS), Encapsulated PostScript (EPS) (в классической записи скриптов) и PDF (в новой записи скриптов), а также в растровых форматах BMP, JPG, PNG, PPM, TIFF либо в нескольких форматах одновременно. Проект программного пакета *GMT* был разработан в конце 1987 г. в Обсерватории Земли Ламонта – Доэрти при Колумбийском университете (*Lamont – Doherty Earth Observatory, Columbia University*) аспирантами П. Весселем и У. Смитом [1; 2]. С того времени он регулярно обновляется и периодически появляются новые версии.

В наши дни *GMT* является мощной, полнофункциональной ГИС, широко распространенной по всему миру. Ее легко инсталлировать под Unix, Unix-совместимые операционные системы (FreeBSD, Linux, Cygwin и др.), а также Windows и macOS. Последним релизом является *GMT* (версия 6.5.0). Весьма важное значение имеет тот факт, что программный пакет содержит встроенные данные о береговых линиях континентов, основных реках, озерах, каналах, островах, границах государств, часто используемых при построениях карт, и самоучитель (*tutorial*) с детальным описанием функциональных модулей, включающий более 50 тестов (*cookbook*). Пакет *GMT* использует форматы файлов, независимые от архитектуры [3]. В качестве входных данных могут выступать таблицы (ASCII и бинарные), сеточные данные с координатами (определенные по координатной сетке и пиксельные), цветовые палетки. Существует шесть основных категорий вывода в программе *GMT*: команды печати в формате PostScript, таблица(ы) данных, набор(ы) сеточных данных, статистика и сводки, предупреждения и ошибки, записанные в *stderr*¹ [7–9]. Ряд исходных данных можно скачать через интернет. Перед именами таких файлов данных стоит символ «@».

На факультете географии и геоинформатики Белорусского государственного университета программный пакет *GMT* входит в программу подготовки студентов и магистрантов геологических специальностей в качестве одного из ГИС-средств (чтение лекций с расширенным объемом лабораторных работ).

Функциональность программного пакета *GMT*

Рабочая среда программы *GMT*² [3–9] иллюстрирует отношения, о которых необходимо знать во время выполнения задания (рис. 1).

Сеанс выполнения задания в программе *GMT* начнется с набора системных настроек по умолчанию, которые можно переопределить, разместив собственный конфигурационный файл *gmt.conf* в рабочем каталоге. Некоторые модули пакета будут считывать скрытые данные (например, береговые линии океанов, морей, озер, реки, каналы, сухопутные и морские границы стран), пользовательские данные необходимо указать в явном виде.

¹Kumar U. High-quality maps using the modern interface to the Generic Mapping Tools (codes included). URL: <https://www.earth-inversion.com/utilities/High-quality-maps-using-the-modern-interface-to-the-Generic-Mapping-Tools> (date of access: 03.05.2022).

²Там же ; Работа с *GMT* под Windows // Академик : сайт. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1397983> (дата обращения: 03.05.2022).

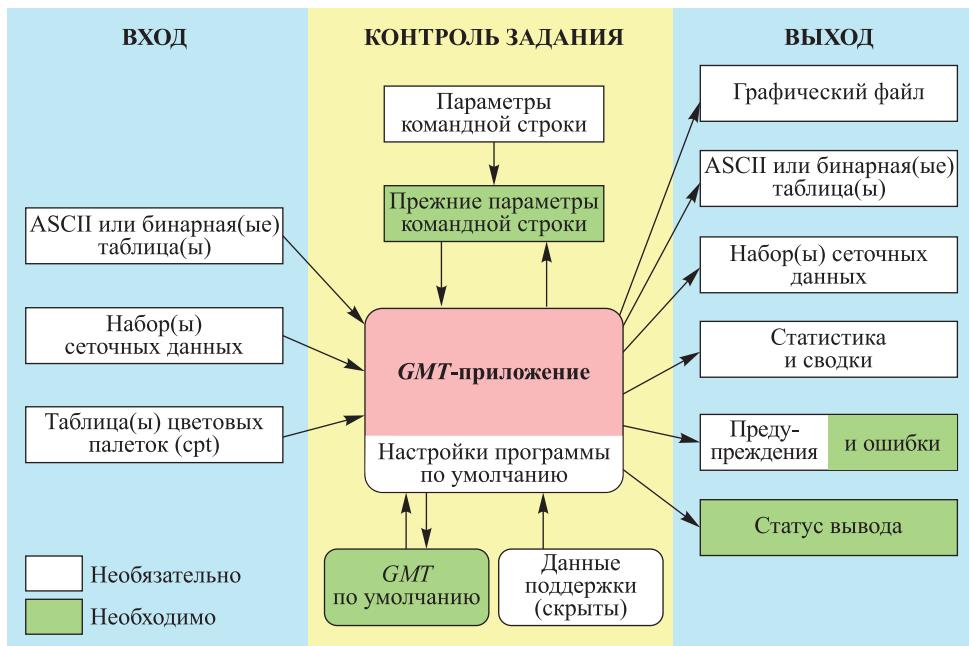


Рис. 1. Функциональная схема работы программного пакета *GMT*
(согласно [9], с изменениями)

Fig. 1. Functional diagram of the *GMT* software package
(according to [9], modified)

Программный пакет *GMT* позволяет преобразовывать полноцветные графические файлы (карты, схемы, диаграммы и др.), созданные в формате PostScript, в ряд распространенных графических форматов, а результирующий Postscript-файл можно открыть в графических редакторах *Adobe Illustrator*, *Corel PHOTO-PAINT* или *CorelDraw*. Однако свободно распространяемая программа *GSview* открывает его намного быстрее. Как программа *GSview*, так и необходимые для ее работы шрифты *GhostScript* имеются в свободном доступе в интернете на сайтах для 32- и 64-разрядной операционной системы Windows (см., например, <https://softradar.com/gsview>, <https://pages.cs.wisc.edu/~ghost>).

Проекции, поддерживаемые программным пакетом *GMT*

На рис. 2 представлены более 30 картографических проекций и преобразований координат, используемых в программном пакете *GMT*³ [7].



Рис. 2. Проекции, поддерживаемые программным пакетом *GMT*
Fig. 2. Projections supported by *GMT* software package

³Начало работы с *GMT*: описание работы с *GMT* на конкретном примере // GIS-Lab : сайт. URL: <http://gis-lab.info/qa/gmt.html> (дата обращения: 23.05.2024) ; документация, прилагаемая к инсталляционному пакету программы *GMT* (версия 6) (C:\programs\GMT6\share\doc и C:\programs\GMT6\share\doc\examples, а также C:\programs\GMT6\share\doc\examples\cookbook).

Методические приемы

Студенты либо магистранты геологических специальностей в процессе выполнения курсовых и дипломных работ, написания магистерских диссертаций сталкиваются с созданием графических приложений (карт, разрезов, гистограмм, диаграмм, включая розы-диаграммы и треугольные диаграммы), а также анимаций, используемых при подготовке итоговых презентаций с высоким разрешением. Эти графические построения легко реализуются с использованием программного пакета *GMT*. Более того, пакет *GMT* обеспечивает доступ к ряду глобальных баз данных (возраст мировой океанической коры, глобальный геоид EGM2008, глобальная модель магнитной аномалии EMAG2, глобальный рельеф местности, глобальная гравитационная аномалия свободного воздуха, глобальный топографический рельеф, глобальный вертикальный градиент силы тяжести, глобальная цифровая магнитная аномалия и т. п.). Методика освоения программного пакета *GMT* основана главным образом на практике построения ряда тестовых примеров в лабораторных условиях под руководством преподавателя.

Примеры графических построений

Приведенные ниже примеры для лабораторных работ могут быть представлены в двух вариантах написания скриптов – традиционном и современном (в последнем используются модули `begin...` `end`, при этом скрипт становится более компактным). Почти все *GMT*-инструменты посылают результат на стандартный выход в формате PostScript. Стандартный выход можно просто перенаправить и записать в нужный файл (`> file`) или приписать к уже существующему файлу (`>> file`). За счет этого достигается гибкость: мы рисуем карту, последовательно вызывая утилиты, каждая из которых добавляет в файл свою порцию данных (рамка, изолинии, маршруты, точки, надписи, масштабная линейка, легенда и т. п.). При работе под Windows последовательность вызовов утилит принято оформлять в виде исполняемого под DOS файла пакетной обработки `*.bat`. Порядок следования *GMT*-утилит в пакетном файле по сути является аналогом построения изображений с использованием шейп-файлов (векторных либо растровых слоев), как, например, в *ArcGIS* либо *QGIS*.

Из-за краткости изложения в статье не рассматриваются значения каждой из приведенных ниже в примерах опций, которым предшествует символ «`–`», равно как и функции утилит, которым предшествует запись `gmt`. Их описание можно найти в ряде документов⁴.

Основные черты рельефа Белорусско-Прибалтийского региона. Построим карту рельефа, используя данные из интернета. Скрипт *BelBaltic.bat* составим в традиционном виде:

```
set ps=BelBaltic.ps
makecpt -Cdem4 -T0/500 > Reliefmap.cpt
grdcut @earth_relief_30s -R18/34/50/60 -GBelBalt.grd
gmt grdimage BelBalt.grd -R18/34/50/60 -JM4i -B2g2 -CReliefmap.cpt -K > %ps%
gmt pscoast -R18/34/50/60 -JM4i -B2g2 -Df -Lf31.0/48.5/8.0/400+1km -Ia/blue \
-Na/0.75,white -W0 -Slightblue -O -K >> %ps%
gmt psscale -R18/34/50/60 -JM4i -CReliefmap.cpt -Dx3c/-1c+w5c/0.5c+jTC+h -B100 \
-By+1m -O -K >> %ps%
echo 27.5667 53.9 Minsk > towns
echo 30.9754 52.4345 Gomel >> towns
echo 21.0118 52.2298 Warszawa >> towns
echo 30.5238 50.4547 Kiev >> towns
echo 23.9096 54.9027 Kaunas >> towns
echo 24.10589 56.946 Riga >> towns
echo 24.7535 59.437 Tallinn >> towns
echo 28.3496 57.8136 Pskov >> towns
gmt pstext towns -R -J -F+f12p,Times-Italic+jLM -O >> %ps%
gmt psconvert -A -C-dINTERPOLATE -Tj BelBaltic.ps
```

Исходный файл рельефа (`@earth_relief_30s`) скрипт берет из интернета. Полученное изображение приведено на рис. 3.

⁴ Зуй В. И. Введение в GMT : метод. рекомендации для магистрантов фак. географии и геоинформатики специальности 1-51 80 04 «Геология». Минск : БГУ, 2022. 48 с. ; Zui V. I. Introduction to GMT : guidelines for undergraduates of the fac. of geogr. and geoinformatics specialty 1-51 80 04 «Geology». Minsk : Belarus. State Univ., 2023. 49 p.

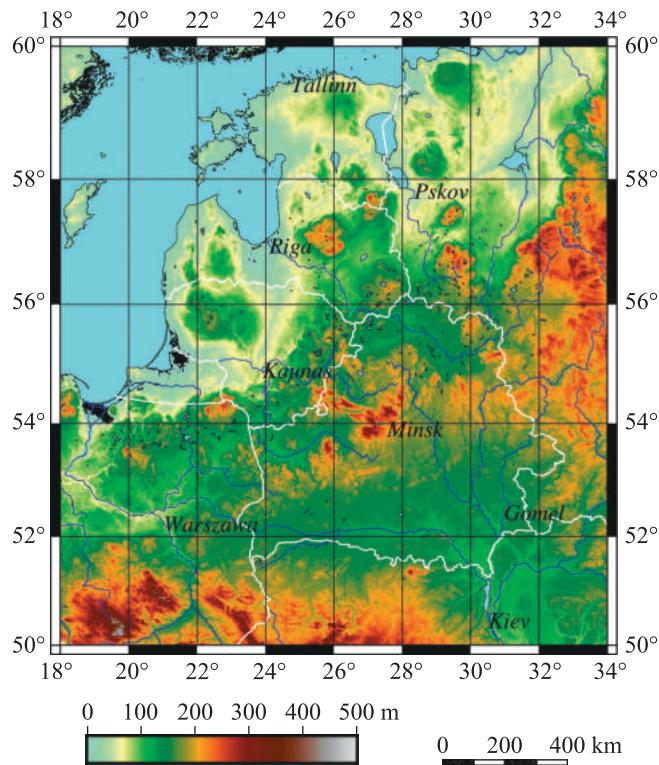


Рис. 3. Упрощенное изображение рельефа
Белорусско-Прибалтийского региона
Fig. 3. Simplified image of the relief of the Belarusian-Baltic region

Результат построения в формате PostScript преобразован в JPG-файл утилитой `psconvert`. На карте отчетливо выделяются Минская и Ошмянская возвышенности, имеющие значительные абсолютные высоты. В пределах обширной Полесской низменности превышение рельефа над уровнем моря составляет менее 200 м. С юга к ней примыкают Украинский щит и Волынская моноклиналь, где альтитуды вновь возрастают. По направлению к Балтийскому морю (Калининградская область, Литва, Латвия, Эстония) отметки рельефа монотонно снижаются.

Выделение Срединно-Атлантического рифта по землетрясениям. В срединно-океанических рифтах начинается раздвижение литосферных плит, которое сопровождается сейсмичностью и формированием крупных литосферных разломов, в том числе трансформных. Здесь субпараллельно формирующемуся рифту выделяются полосовые палеомагнитные аномалии, отражающие изменение положения магнитных полюсов в геологическом прошлом. За основу взят пример 07 из документа [9]. Использована современная форма записи скрипта:

```

REM Atlantic Rift GMT EXAMPLE 07 (modified)
gmt begin AtlanticRift
    gmt coast -R-60/10/-10/20 -JM24c -Slightblue -GP26+r300+ftan+bdarkbrown \
    -Dl -Lfx21/9.75/2.0/1500+1km -Wthinnest -B10 --FORMAT_GEO_MAP=dddF
    gmt plot @fz_07.txt -Wthinner,-
    gmt plot @quakes_07.txt -h1 -Scc -i0,1,2+s0.025 -Gred -Wthinnest
    gmt plot @isochron_07.txt -Wthin,blue
    gmt plot @ridge_07.txt -Wthicker,orange
    gmt legend legend.txt -Dx0.25/0.2/7/3.3+w3.0 -Vl -F+pthick
    echo -43 -5 SOUTH > tmp
    echo -43 -8 AMERICA >> tmp
    echo -7 11 AFRICA >> tmp
    gmt text tmp -F+f30,Helvetica-Bold,white=thin
    del tmp
gmt end show

```

Карта участка Срединно-Атлантического рифта с землетрясениями, изохронами и трансформными разломами представлена на рис. 4.

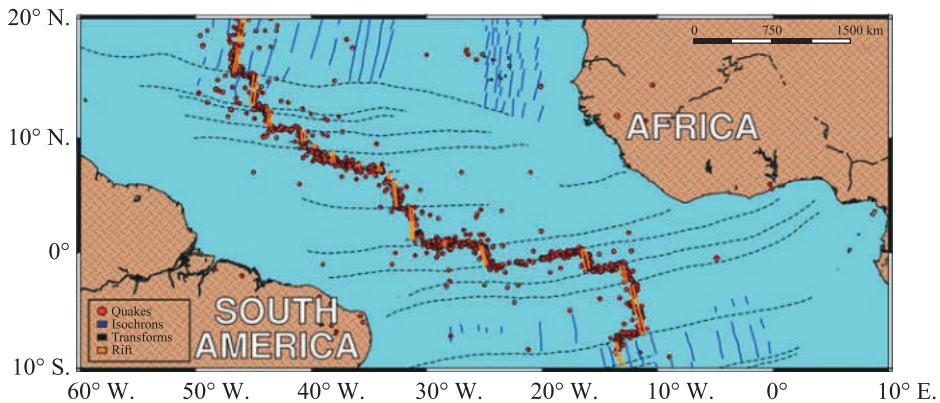


Рис. 4. Участок Срединно-Атлантического рифта (согласно [9], с изменениями).

Красными кружками показаны землетрясения, двойными желтыми линиями – участки рифта, синими линиями – полосовые палеомагнитные изохроны, штриховыми черными линиями – трансформные разломы и их продолжение за пределами рифта

Fig. 4. Section of the Mid-Atlantic Rift (according to [9], modified).

Red circles show earthquakes, double yellow lines trace sections of the rift, blue lines indicate striped paleomagnetic isochrones, and dashed black lines show transform faults with their continuation beyond the rift

Необходимые файлы – quakes.txt, isochron.txt, ridge.txt и fz.txt – программа берет с GMT-серверов. Файл с содержанием легенд (legend.txt) имеет следующий вид:

```
S 0.1i c 0.10i red 0.15p 0.2i Quakes
S 0.1i r 0.1i blue 0.25p 0.25i Isochrons
S 0.1i r 0.1i black 0.25p 0.25i Transforms
S 0.1i r 0.1i orange 0.25p 0.25i Rift
```

Фрагмент гравиметрической карты океанической коры Австралийско-Новозеландского региона. Площадная изменчивость неоднородного гравитационного поля региона приведена на рис. 5. На фоне средних значений (от 0 до +50 мГал) для океана выделяется полоса низких значений (до –50...–100 мГал) вдоль восточного берега Австралии и острова Тасмания, а также на западной оконечности обоих островов Новой Зеландии. Обычно это характерно для зон субдукции, с которыми связано формирование глубоководного желоба и накопление мощной толщи осадочного материала, что традиционно приводит к низким значениям гравитационного поля. За основу текста скрипта в современной форме записи использован пример 27а из документации GMT ([9], с изменениями):

```
REM GMT EXAMPLE 27a (modified)
REM Purpose: Illustrates how to plot Mercator img grids
gmt begin ex27a
    REM Gravity in tasman_grav.nc is in 0.1 mGal increments and the grid
    REM is already in projected Mercator x/y units.
    REM Make a suitable cpt file for mGal
    gmt makecpt -T-120/120 -Crainbow
    REM Since this is a Mercator grid we use a linear projection
    gmt grdimage @tasman_grav.nc=ns+s0.1 -I+d -Jx0.6c
    REM Then use gmt coast to plot land with original -R from grid img
    REM and use Mercator gmt projection with same scale as above on a spherical \
Earth
    gmt grdinfo @tasman_grav.nc -Ii > R.txt
    set /p R=<R.txt
```

```

gmt coast -Q -Ba10f5 -BWSNE
REM Put a color legend in top-left corner of the land mask
gmt colorbar -DjTL+o1c+w5c/0.4c -Bx -By+1mGal -I -F+gwhite+p1p
gmt end show

```

Исходный файл гравитационного поля (@tasman_grav) скрипт берет из интернета. Положительные значения поля силы тяжести (до +100 мГал) соответствуют горной цепи Большого водораздельного хребта на востоке Австралии в полосе городов Брисбен – Канберра.

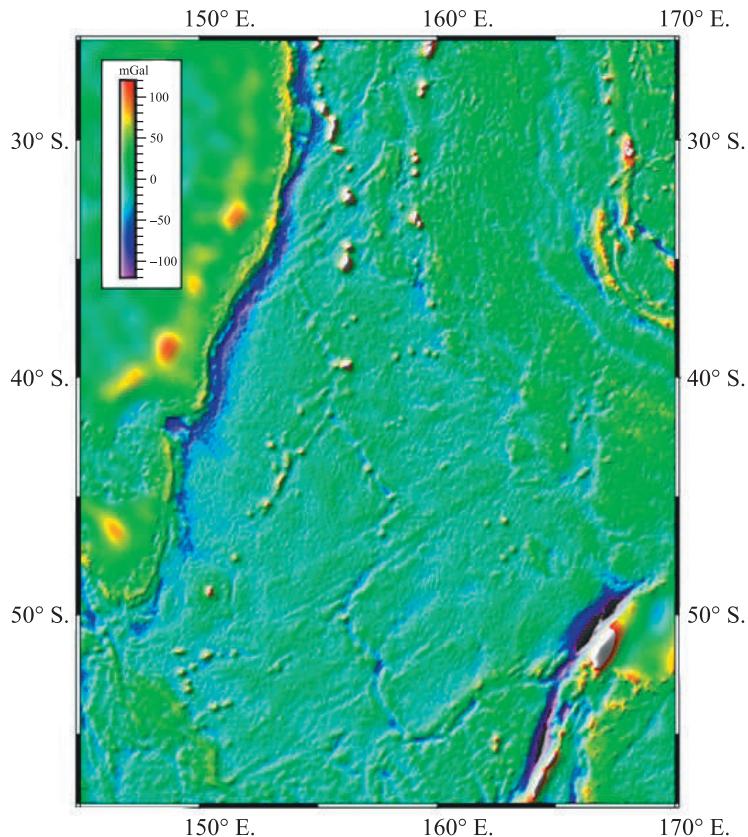


Рис. 5. Гравиметрическая карта Австралийско-Новозеландского региона
(согласно [9], с изменениями)

Fig. 5. Gravimetric map of the Australia-New Zealand region
(according to [9], modified)

Отображение океанических землетрясений в пределах 3000 км от Хобарта и более 1000 км от линии перемены дат. Скрипт приведен в современной форме (пример 24 из документации *GMT* (версия 6.4)):

```

gmt begin ex24
echo 147:13 -42:48 6000 > point.txt
echo ^> Our proxy for the dateline > dateline.txt
echo 180      0 >> dateline.txt
echo 180      -90 >> dateline.txt
gmt info -I10 @oz_quakes_24.txt > R.txt
set /p R=<R.txt
gmt coast %R% -JM22c -Gtan -Sdarkblue -Wthin,white -Dl -A500 -Ba20f10g10 \
-BWeSn
gmt plot @oz_quakes_24.txt -Sc0.1c -Gred
gmt select @oz_quakes_24.txt -Ldateline.txt+d1000k -Nk/s -Cpoint.txt+d3000k \
-fg -Il | gmt plot -Sc0.1c -Ggreen

```

```

gmt plot point.txt -SE- -Wfat,white
gmt text point.txt -F+f14p,Helvetica-Bold,white+jLT+tHobart -Dj7p
gmt plot point.txt -Wfat,white -S+0.5c
gmt plot dateline.txt -Wfat,white -A
del point.txt dateline.txt
gmt end show
    
```

Полученное изображение представлено на рис. 6. Рой точек отчетливо отображают глубинные океанические разломы, являющиеся границами литосферных плит и отражающиеся в сейсмичности.

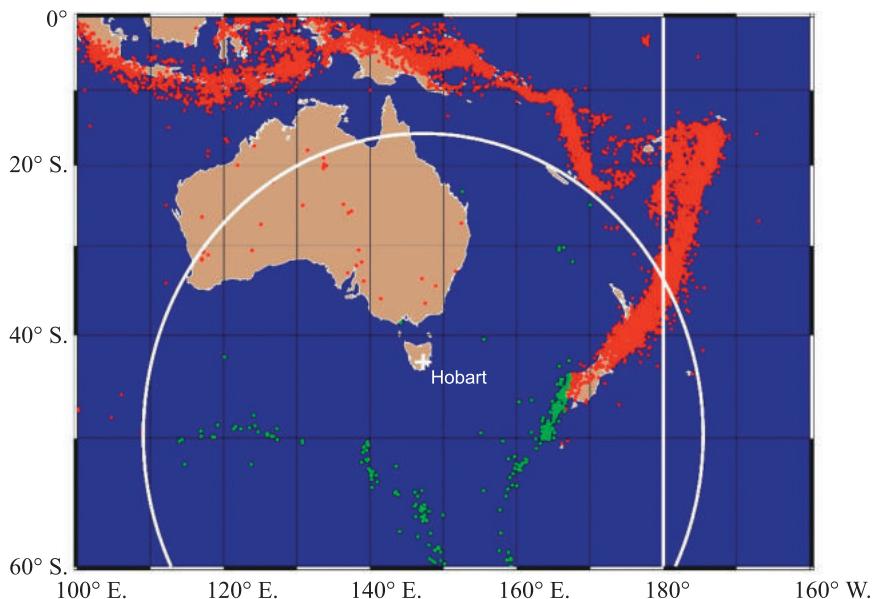


Рис. 6. Океанические землетрясения в пределах 3000 км от Хобарта и более 1000 км от линии перемены дат.

Красными точками показаны мелкофокусные землетрясения, зелеными точками – средненефокусные землетрясения.

Источник: [9]

Fig. 6. Oceanic earthquakes within 3000 km of Hobart and more than 1000 km from the International Date Line.

Red dots show shallow-focus earthquakes, green dots trace medium-focus earthquakes.

Source: [9]

Трехмерная карта изученности Черноморского региона по тепловому потоку. В акватории Черного моря и на прилегающей суше выполнены многочисленные определения плотности теплового потока с использованием геотермических зондов, внедряемых в морское дно, и буровых скважин на суше. Полученные значения отображают особенности геологического строения региона. Текст скрипта составлен в традиционной форме записи:

```

REM GMT Black Sea Heat Flow Density 3D
set ps=BlackSeaHFD_3D.ps
gmt pscoast -R26d/44d/40d/48d/0/100 -JX25d/15d -JZ7.5 -B1f1g1/1f1.0g0.5/20f10: "HFD, \
mW / m @+2@+":wESNZ -Dh -Ia/0/0/255 -Lfx2.5/-2.0/2.0/400+1km -Na/2 -Sazure2 \
-Gwheat -Wfaint -A5000 -p165/50 -K -V1 -X2.5 -Y2.5 > %ps%
gmt psxyz ArealHFD.txt -R -JX -JZ7.5 -So0.025ib1 -p165/50 -Glightblue -Wfaint \
-O -K -P >> %ps%
echo {print $1, $2, $3} > tmp.txt
gawk -f tmp.txt CountriesBLS.txt | gmt pstext -R -JX -JZ -O -p -Gwhite \
-F+f18p,Helvetica,firebrick=thinner+jRM >> %ps%
gmt psconvert -A -C-dINTERPOLATE -P -Tj BlackSeaHFD_3D.ps
del tmp.txt
    
```

Изображение приведено на рис. 7. На карту вынесены аббревиатуры прибрежных стран (файл CountriesBLS.txt) и сокращения для Черного (BLS), Азовского (SAz) и Мраморного (SMa) морей.

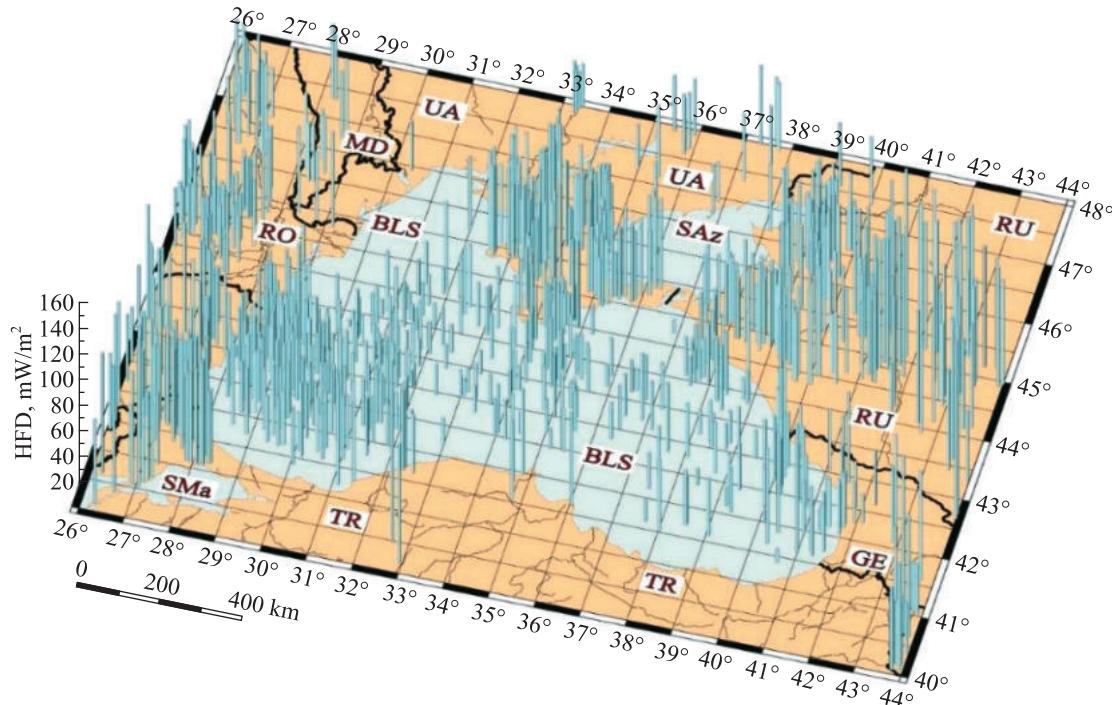


Рис. 7. Трехмерная карта теплового потока Черного моря

Fig. 7. Three-dimensional map of the heat flow of the Black Sea

Длина вертикальных полосок отражает значение плотности теплового потока в милливаттах на квадратный метр, масштаб показан в левом нижнем углу карты. Исходные файлы для построения карты – ArealHFD.txt, CountriesBLS.txt – задаются программистом.

Буровая изученность территории Минской области. Текст скрипта приведен в традиционном виде:

```

REM GMT Boreholes in the Minsk Region
REM
set ps=MinskRegionBoreholesLast.ps
gmt pscoast -R25.9/29.75/52.25/55.2 -Jm2.5c -B1f1g1:"HFD, mW / m @+2@+":WESNZ \
-Dh -Ia/0/0/255 -Lfx2.5/-1.5/2.0/200+1km -Na/2 -Sazure2 -Wfaint -A5000 -K -Vl \
-X3.5 -Y3.5 > %ps%
gmt psxy MinskOblBorder.txt -Jm -Gwheat -R -B -K -O -P -V -Wthin,black >> %ps%
gmt makecpt -Cgrey,yellow,green,lightblue,blue,pink,orange,red,firebrick \
-T0,50,100,200,300,500,750,1000,1500,2000 > WellsDepth.cpt
gmt psxy -R -J -O -K MinskBoreholesDepth.txt -Wfaint -Sc0.15 -CWellDepth.cpt \
>> %ps%
gmt psxy -R -J -O -K SozhMargin.txt -Wthin,black -: >> %ps%
gmt psxy -R -J -O -K PoozerieMarginEast.txt -Wthin,black,- -: >> %ps%
gmt psxy -R -J -O -K npripyat.txt -Wthick,blue >> %ps%
gmt psxy m-zvystp.gmt -J -R -B -K -O -P -Sf0.25/0.05L -V -Wthick,blue,- >> %ps%
gmt psxy lyakhovi.gmt -J -R -B -K -O -P -V -Wthick,blue >> %ps%
echo 28.75 52.5 PT > Labels
echo 27.275 52.305 MZhI >> Labels
gmt pstext -R -J -O -K -Gwhite -F+f14,Helvetica-Bold,white=thin Labels >> %ps%
REM Legend to the map
gmt pslegend -R -J -O -Dx7.75/0.5/7/3.3+w3.5 -Vl -X3.2 -Y-0.7 -F+pthick \
>> %ps% Depth_legend_New.txt
gmt psconvert -A -C-dINTERPOLATE -P -Tj MinskRegionBoreholesLast.ps

```

Пробуренные скважины неравномерно распределены по территории Минской области. Их глубина колеблется в широком диапазоне – от менее чем 100 м до более чем 600 м, а в южной части региона в пределах глубокого осадочного бассейна (Припятский прогиб) глубина отдельных скважин превышает 1000 м. На карту нанесены границы области и основные реки. Глубина каждой из скважин отображена в виде разноцветных кружков (рис. 8).

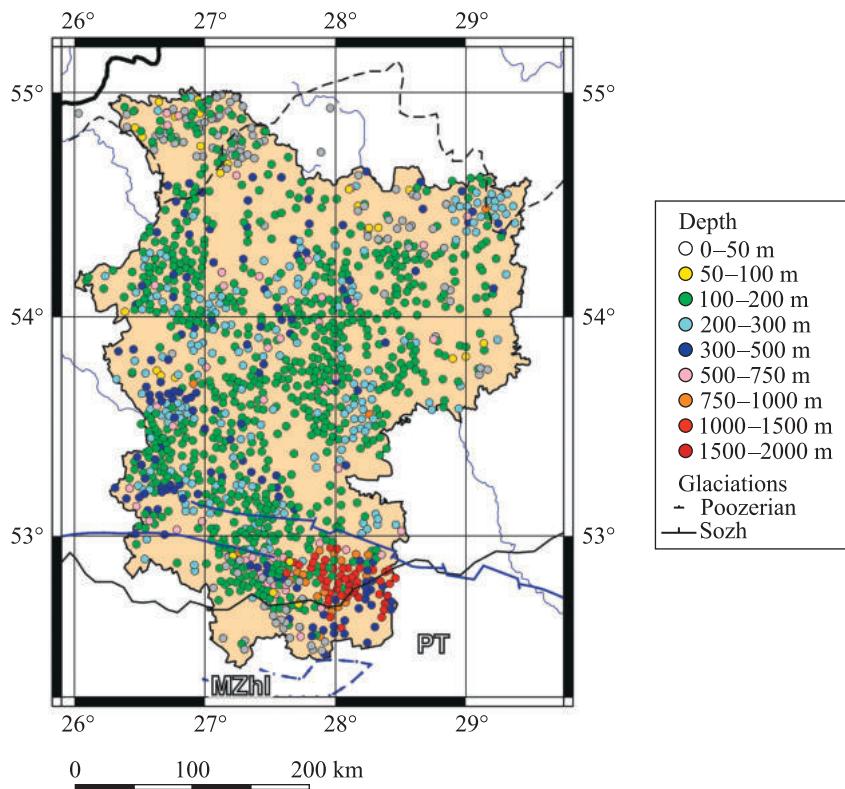


Рис. 8. Буровая изученность территории Минской области
 (MZhI – Микашевичско-Житковичский выступ; PT – Припятский прогиб)

Fig. 8. Drilling exploration within the territory of the Minsk Region
 (MZhI – Mikashevichi-Zhitkovichi Salient; PT – Pripyat Trough)

Для построения карты необходимы следующие файлы: MinskOblBorder.txt, MinskBoreholesDepth.txt, Depth_legend.txt.

Связь между возрастом и мощностью океанической коры. В океанах происходит постепенное утолщение земной коры при увеличении ее возраста, когда вновь образованная кора отходит от середины океанического рифта.

Текст скрипта заимствован из документации, прилагаемой к инсталляционному пакету программы *GMT* (версия 6) (C:\programs\GMT6\share\doc и C:\programs\GMT6\share\doc\examples, а также C:\programs\GMT6\share\doc\examples\cookbook), и приведен в современной форме записи:

```

REM Purpose: GMT EXAMPLE 49 Illustrates data analysis using the seafloor depth/age \
relationship
REM
gmt begin ex49
    REM Pull depth and age subsets from the global remote files
    gmt grdcut @earth_relief_02m -R30W/5E/30S/5S -Gdepth_pixel.nc
    gmt grdcut @earth_age_02m -R30W/5E/30S/5S -Gage_pixel.nc
    REM Flip to positive depths in km
    gmt grdmath depth_pixel.nc NEG 1000 DIV = depth_pixel.nc
    REM Obtain depth, age pairs by dumping grids and pasting results
    gmt grd2xyz age_pixel.nc -bof > age.bin
    gmt grd2xyz depth_pixel.nc -bof > depth.bin
    gmt convert -A age.bin depth.bin -bi3f -o2,5,5 -bo3f > depth-age.bin

```

```

REM Obtain modal depths every ~5 Myr
gmt blockmode -R0/100/0/10 -I5/10 -r -E -Q depth-age.bin -bi3f -o0,2,3 \
> modal.txt
REM Create density grid of (age,depth) distribution
gmt xyz2grd -R0/100/0/6.5 -I0.25/0.025 -r depth-age.bin -bi3f -An \
-Gdensity.nc
REM Make CPTs for ages and depths
gmt makecpt -Chot -T0/100/10 -H > t.cpt
gmt makecpt -Cabyss -T0/7 -H -I > z.cpt
gmt subplot begin 2x1 -Fs15c/11.3c -Sc
    REM Image depth distribution, modal depths, and competing predictions
    gmt grdimage density.nc -Q -Ct.cpt -JX15c/-11.3c -Bxaf+u" Myr" \
-Byaf+u" km" -c
        REM Compute Parsons & Sclater [1977] depth-age curve (in km)
        REM depth(t) = 0.35 * sqrt(t) + 2.5, t < 70 Myr
        REM             = 6.4 - 3.2 * exp (-t/62.8), t > 70 Myr
        gmt math -T0/100/0.1 T SQRT 0.35 MUL 2.5 ADD T 70 LE MUL 6.4 T 62.8 \
DIV NEG EXP 3.2 MUL SUB T 70 GT MUL ADD = ps.txt
        gmt plot ps.txt -W4p,green
        gmt plot ps.txt -W1p
        REM Compute Stein & Stein [1992] depth-age curve (in km)
        REM depth(t) = 0.365 * sqrt(t) + 2.6, t < 20 Myr
        REM             = 5.651 - 2.473 * exp (-0.0278 * t), t > 20 Myr
        gmt math -T0/100/0.1 T SQRT 0.365 MUL 2.6 ADD T 20 LE MUL 5.651 T \
-0.0278 MUL EXP 2.473 MUL SUB T 20 GT MUL ADD = ss.txt
        REM Plot curves and place the legend
        gmt plot ss.txt -W4p,white
        gmt plot ss.txt -W1p
        gmt plot -Ss0.4c -Gblue modal.txt -Ey+plp,blue
        gmt plot -Ss0.1c -Gwhite modal.txt
        echo S 0.5c - 0.9c - 4p,green 1.2c Parsons & Sclater (1977) \
> tmp.txt
echo S 0.5c - 0.9c - 4p,white 1.2c Stein & Stein (1992) >> tmp.txt
echo S 0.5c s 0.4c blue - 1.2c Modal depth estimates >> tmp.txt
gmt legend -DjRT+w5.5c+o0.25c -F+plp+gbeige+s tmp.txt
echo S 0.5c - 0.9c - 1p 0.75c > tmp.txt
echo S 0.5c - 0.9c - 1p 0.75c >> tmp.txt
echo S 0.5c s 0.1c white - 0.75c >> tmp.txt
gmt legend -DjRT+w5.5c+o0.25c tmp.txt
REM Image depths with color-coded age contours
gmt grdimage depth_pixel.nc -R30W/5E/30S/5S -JM? -Cz.cpt -c
gmt plot -W1p @ridge_49.txt
gmt grdcontour age_pixel.nc -A+f14p -Ct.cpt -Wa0.1p+c -GL30W/22S/5E/13S
gmt colorbar -Cz.cpt -DjTR+w4.7c/0.4c+h+r+o0.85c/0.35c -Baf+u" km" \
-F+plp+gbeige+s+c0p/10p/4p/4p
gmt subplot end
REM
del age_pixel.nc depth_pixel.nc age.bin depth.bin depth-age.bin density.nc \
modal.txt ps.txt ss.txt z.cpt t.cpt tmp.txt
REM
gmt end show

```

Исходные файлы рельефа (@earth_relief_02m) и возраста земной коры (@earth_age_02m) скрипт берет из интернета.

Графическая зависимость между мощностью океанической коры и ее возрастом в миллионах лет (Myr) приведена в верхней части рис. 9. Она иллюстрирует постепенное утолщение вновь образованной океанической коры Срединно-Атлантического рифта при увеличении ее возраста по мере удаления от центра спрединга, представленного в нижней части рис. 9.

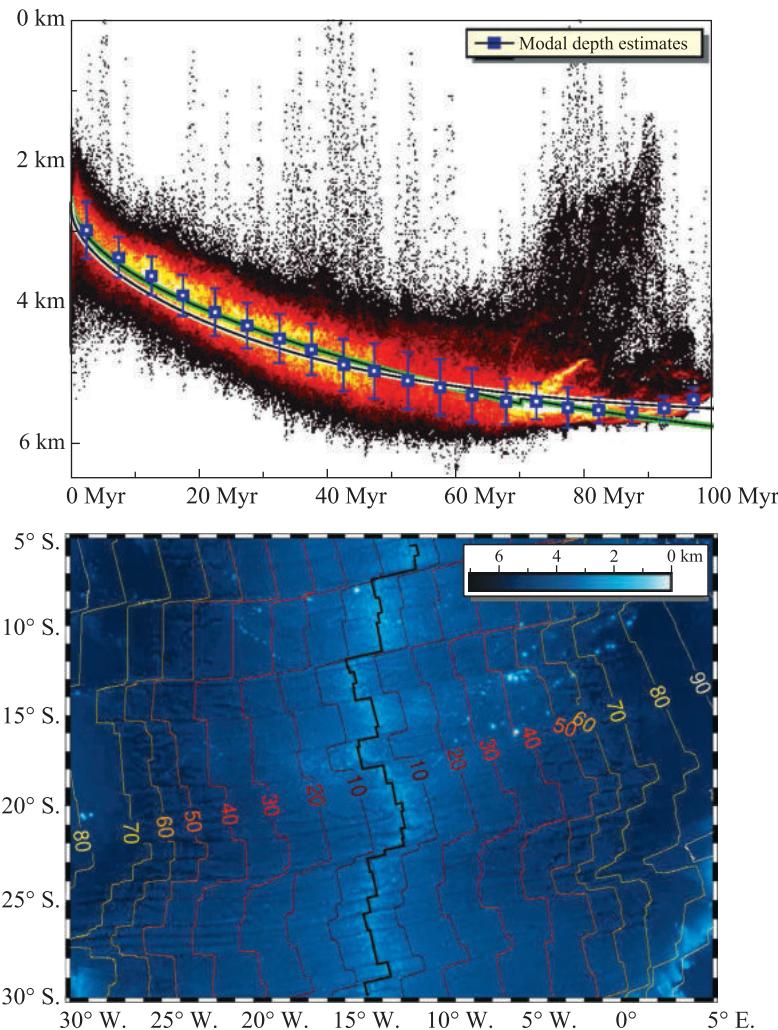


Рис. 9. Связь между возрастом и мощностью океанической коры

Fig. 9. Relationship between age and thickness of oceanic crust

Карта распределения температуры в Оршанской впадине на глубине 100 м. Скрипт записан в традиционной форме:

```

REM Temperature distribution within the Orsha Depression, depth of 100 m
REM
set ps=Orsha100mT.ps
REM
gmt psbasemap -R27/33/53/56.5 -Jc30/54.5/1:2500000 -B1f1g1 -V1 -P -K -X1.5 -Y3 \
> %ps%
gmt pscoast -Jc -R -B -Dh -K -Ia/2/0/125/155 -Na/2 -Lfx2.0/-1.5/6/150k+1km -O \
-K -P -V -W1 >> %ps%
gmt blockmean Belt100m_2021.txt -R -I0.2m -V > Bel100mT.txt
gmt surface Bel100mT.txt -GBel100mT.surface -I1.5m -R -T0.35 -V
gmt grdimage Bel100mT.surface -CBelt100m.cpt -Jc -K -O -P -R -V >> %ps%
gmt psxy BAnorth.txt -Jc -R -B -K -O -P -: -V -Wthickest,orange >> %ps%
gmt psxy OrD-07km.txt -Jc -R -B -K -O -P -: -V -Wthickest,blue >> %ps%
gmt psxy TectonBelOD.txt -Jc -R -B -K -O -P -: -V -Wthickest,blue,-. >> %ps%
gmt grdcontour Bel100mT.surface -Jc -C0.5 -A0.5+f10p -O -K -L5/15 -Gd2.5 -S1 \
-T5.0/5.0 -Wthick,black >> %ps%
gmt psxy Polotsk2.txt -Jc -R -B -K -O -P -V -Wthick,black >> %ps%
gmt psxy MinskOblBorder.txt -R -J -B -K -O -P -V -Wthin,red >> %ps%
gmt psxy VitebskOblSouth.txt -R -J -B -K -O -P -V -: -Wthin,red >> %ps%
gmt psxy Mogil_OblCor.txt -R -J -B -K -O -P -V -: -Wthin,red >> %ps%

```

```

gmt psxy npripyat.gmt -Jc -R -B -K -O -P -Sf0.25/0.05R -V -Wthick,black >> %ps%
gmt psscale -DjCT+w1.85i/0.35c+o2.5/12.4c -E+f24,Helvetica-Bold,white=thin@+o@-C \
-O -K -CBelt100m.cpt -Baf -R -J -O -K -Vl >> %ps%
gmt pscoast -Jc -R -B1f1g1 -Dh -Ia/4/0/125/155 -K -Na/2 -O -P -V -W,thin,black \
>> %ps%
gmt psxy Bel100mT.txt -Jc -R -B -G200/0/0 -K -O -P -Sc0.12 -V -W,thick,red >> %ps%
gmt psxy BeltownsOrsha.txt -Jc -R -B -Glightred -K -O -P -Sa0.3 -V -Wblack,thick \
>> %ps%
echo 30.6 55.1 Vitebsk > tmp
echo 30.35 54.1 Mogilev >> tmp
echo 27.75 53.75 Minsk >> tmp
echo 32.5 54.9 Smolensk >> tmp
echo 31.35 54.83 Rudnya >> tmp
echo 32.3 53.45 Khotimsk >> tmp
echo 28.2 55.93 Asveya >> tmp
echo 31.4 55.72 Velizh >> tmp
echo 30.25 55.95 Nevel >> tmp
echo 32.45 53.9 Roslavl >> tmp
echo 30.4 54.6 Orsha >> tmp
echo 27.6 54.95 Dokshitsy >> tmp
echo 28.22 55.45 Disna >> tmp
echo 28.5 54.15 Borisov >> tmp
gmt pstext -R -Jc -O -F+f9,Times,black=thinnest tmp >> %ps%
del tmp
gmt psconvert -A -C-dINTERPOLATE -P -Tj Orsha100mT.ps

```

Распределение температуры в Оршанской впадине на глубине 100 м имеет контрастный вид. Область низких значений (менее 7,5 °C) выявлена в восточной части впадины вблизи границы с Россией. Ее продолжение за пределы Беларуси выделено неуверенно из-за очень редкой сети скважин с доступными термограммами. Полоса повышенной температуры (более 8 °C) простирается в субмеридиональном направлении от северной зоны Припятского прогиба через восточный склон Белорусской антеклизы на территорию России. Ее контуры за пределами Беларуси также проведены неуверенно из-за нехватки данных (рис. 10).

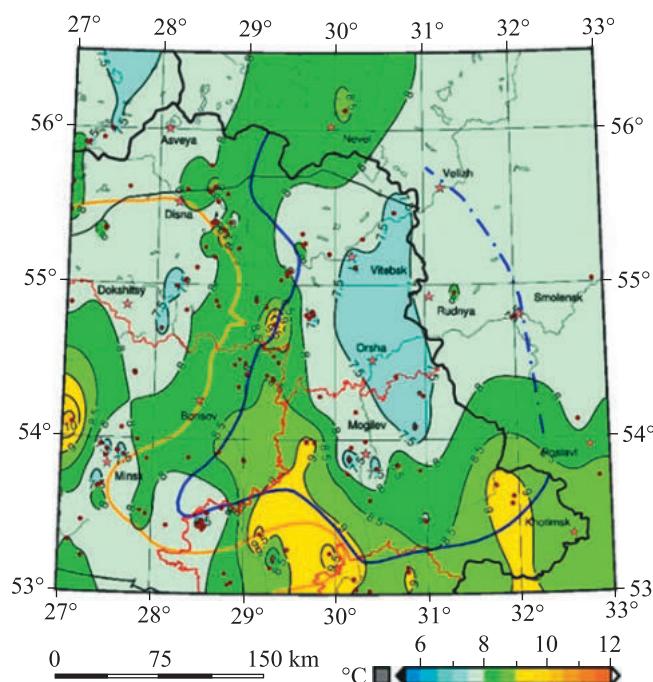


Рис. 10. Распределение температуры в Оршанской впадине на глубине 100 м
Fig. 10. Temperature distribution in the Orsha Depression at the depth of 100 m

Для составления карты необходимы следующие файлы исходных данных: BelT100m_2021.txt, BelT100m.cpt, BAnorth.txt, OrD-07km.txt, TectonBelOD.txt, Polotsk2.txt, MinskOblBorder.txt, Vitebsk-OblSouth.txt, Mogil_OblCor.txt, npripyat.gmt, BeltownsOrsha.

Карта Берингова пролива. Скрипт для построения карты приведен в современной форме записи:

```
REM Creating the Bering Strait map
gmt begin BeringSrait pdf,jpg
gmt basemap -R-178/-164/63/68 -JM15c -B2f1 -BWENS -Lfx3.5/-1.5/4.0/400+1km \
-V1 -X3 -Y2.6
gmt grdcut @earth_relief_30s -R-178/-164/63/68 -Gh.grd
gmt grdimage h.grd -R-178/-164/63/68 -JM15c -Cmount.cpt -Ne0.1 -fg -V1
gmt coast -JM15c -B2f1 -S151/190/255 -Df -Na/1p,white -Ia/0.25p,blue \
-W0.25p,royalblue -V1
gmt plot Points.txt -Sc0.26 -W1,black -Gwhite -V1
gmt text Settlements.txt -R-178/-164/63/68 -Dj0.25c/0.1c \
-F+f12p,Helvetica,black+j+a
echo -168.8 66.0 Bering Strait > tmp
echo -169.5 67.5 Chukchi Sea >> tmp
echo -168.0 64.0 Bering Sea >> tmp
gmt text tmp -Dj0.25c/0.1c -F+f14,Helvetica-Bold,yellow=thin
gmt colorbar -Dx8c/-1.55c+w6c/0.4c+h -Cmount.cpt -Bx500+1"Elev (m)"
gmt end show
```

На карту вынесены рельеф суши Чукотки и Аляски, населенные пункты, морская граница между Россией и США, обозначены Берингов пролив, Чукотское и Берингово моря. В южной части Берингова моря показан наиболее крупный из островов региона – остров Святого Лаврентия (США). Под картой приведены масштабная линейка и цветная шкала высот рельефа суши (рис. 11).

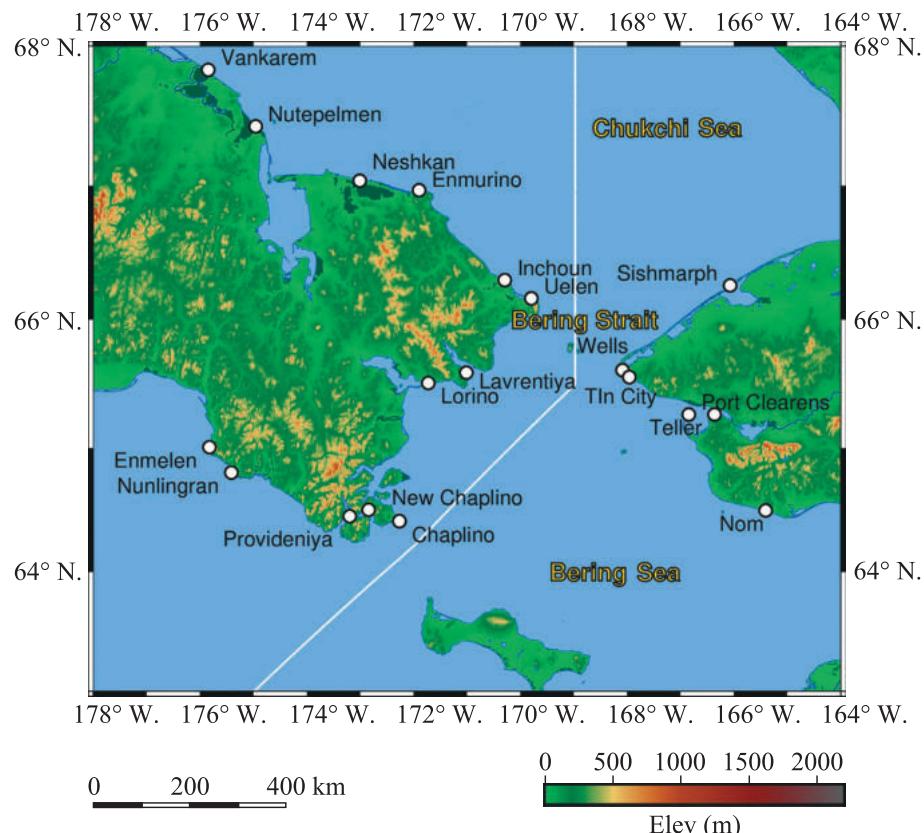


Рис. 11. Карта Берингова пролива

Fig. 11. The Bering Strait map

Создание анимаций

Компьютерная анимация – вид трехмерной мультипликации, создаваемый с помощью трехмерной компьютерной графики⁵ [8] для «оживления» отдельных элементов оформления (например, веб-страниц).

Воспроизведение анимации представляет собой последовательную смену отдельных рисунков-кадров с заданной частотой (обычно 24 кадра в секунду), воспринимаемую в виде «движущегося» изображения. При этом чаще всего оно состоит из сотен или тысяч отдельных рисунков (слайдов).

На создание анимации (тысячи отдельных рисунков) программный пакет *GMT* расходует много процессорного времени. В связи с этим требуется использование быстродействующих компьютеров, как правило, с многоядерными процессорами. В большинстве случаев они работают под Unix либо Unix-совместимыми операционными системами (FreeBSD, OpenBSD, Linux, Cygwin и др.). В итоге создание анимации под Windows с помощью пакета *GMT* является времязатратным.

Обычно в программном пакете *GMT* скрипты для создания анимаций написаны под Unix-совместимые операционные системы в оболочке Bash (Bourne again shell) – в определенном смысле одном из аналогов DOS. В принципе некоторые из скриптов можно переписать как bat-файлы и тестировать под Windows, при этом необходима небольшая модификация имеющихся bash-скриптов либо запуск их с использованием программы *Git Bash* (<https://git-scm.com/downloads/win>), инсталлированной под Windows. Информацию об имеющихся анимациях под *GMT* можно найти в C:\programs\GMT6\share\doc\examples, где приводится ряд примеров. На рис. 12 представлен кадр 747, сгенерированный в процессе построения анимации anim07.sh на ноутбуке (4-ядерный процессор) с помощью программы *Git Bash*. На нем наглядно отражены срединно-океанические разломы – границы литосферных плит в глобальном плане, рельеф суши и батиметрия океанов. Текст скрипта здесь не приводится, его можно найти в C:\programs\GMT6\share\doc\examples\anim07.sh.

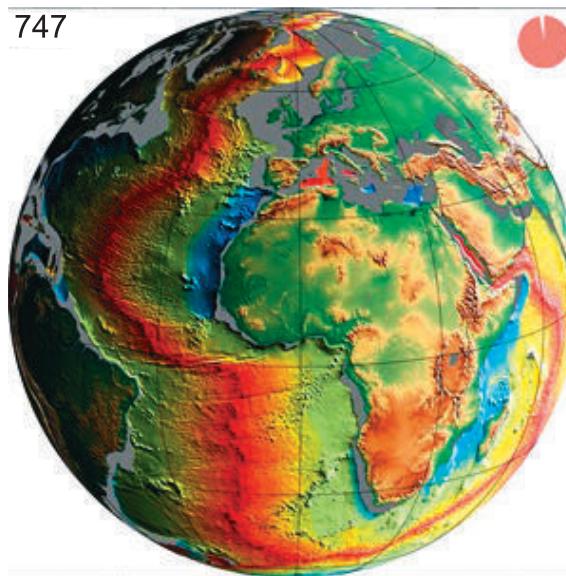


Рис. 12. Срединно-океанические рифты и рельеф земного шара.
Кадр 747 из анимации

Fig. 12. Mid-ocean rifts and the relief of the globe.
Frame 747 from the animation

Заключение

Свободно распространяемый в интернете программный пакет *GMT* является современным ГИС-продуктом, позволяющим создавать высококачественные графические построения (карты, схемы, диаграммы, профили и другие файлы). По качеству создаваемой графики он не уступает распространенным коммерческим ГИС-средствам. Кроме того, пакет *GMT* некритичен к объему оперативной памяти и свободному месту на жестком диске, что позволяет инсталлировать его на обычный ноутбук и дает возможность студентам, магистрантам и научным работникам свободно выполнять сложные графические построения.

⁵Zui V. I. Introduction to GMT... 49 p.

Несомненным достоинством программного пакета *GMT* является то, что в его составе при инсталляции устанавливаются дополнительные данные (границы государств, реки, каналы и береговая линия островов, озер, морей и океанов). Ряд баз исходных геолого-геофизических данных доступны с *GMT*-серверов через интернет. Построенная с помощью программного пакета *GMT* графика легко конвертируется в наиболее распространенные графические форматы. Сам же пакет *GMT* содержит ряд утилит, рассчитанных на обработку геолого-геофизической информации.

Современная обработка геологической информации требует регулярного привлечения компьютерных методов (построение карт, геологических моделей на основе объемных исходных данных, фильтрации последних, статистического анализа и др.). Приведенные в статье результаты использования программного пакета *GMT*, большинство из которых содержит геолого-геофизическую информацию, раскрывают лишь небольшую часть широких возможностей этого ГИС-средства.

Библиографические ссылки

1. Smith WHF, Wessel P. Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*. 1990;55(3):293–305. DOI: 10.1190/1.1442837.
2. Wessel P, Smith WHF. Free software helps map and display data. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*. 1991;72(41):441, 445–446. DOI: 10.1029/90EO00319.
3. Wessel P, Smith WHF. New version of the Generic Mapping Tools released. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*. 1995;76(33):329. DOI: 10.1029/95EO00198.
4. Wessel P, Smith WHF. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1996;101(B4):8741–8743. DOI: 10.1029/96JB00104.
5. Wessel P, Smith WHF. New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*. 1998;79(47):579. DOI: 10.1029/98EO00426.
6. Wessel P, Smith WHF. *The Generic Mapping Tools (GMT) version 4.5.18. Technical reference and cookbook*. [S. l.]: [s. n.]; 2018. XVII, 235 p.
7. *GMT 中文手册 v6.4 = GMT. Руководство на китайском языке. Версия 6.4* [Интернет]. [S. l.]: Китайское сообщество GMT; 2024 [прочитано 21 декабря 2024 г.]. 811 с. Доступно по: https://docs.gmt-china.org/6.4/GMT_docs.pdf.
8. Wessel P, Luis JF, Uieda L, Scharroo R, Wobbe F, Smith WHF, et al. The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019;20(11):5556–5564. DOI: 10.1029/2019GC008515.
9. Wessel P, Smith WHF. *The Generic Mapping Tools (GMT) version 4.5.18. A map-making tutorial* [Internet]. [S. l.]: [s. n.]; 2018 [cited 2024 June 30]. III, 25 p. Available from: https://www.soest.hawaii.edu/GMT/gmt/pdf/GMT_Tutorial.pdf.

Получена 30.06.2024 / исправлена 06.02.2025 / принята 06.03.2025.
Received 30.06.2024 / revised 06.02.2025 / accepted 06.03.2025.

АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ В БГУ РАБОТ INDICATIVE ABSTRACTS OF THE PAPERS DEPOSITED IN BSU

УДК 33:911.3:910.2(075.8)

Методы экономико-географических исследований : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 1-31 02 01 «География», 1-31 02 04 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность», 6-05-0532-01 «География», 6-05-0532-07 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность», 6-05-0532-09 «Страноведение и переводческая деятельность» / БГУ ; сост. А. П. Безрученок. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2024. 52 с. : табл. Библиогр.: с. 48–50. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/322734>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 05.12.2024, № 017805122024. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов специальностей 1-31 02 01 «География», 1-31 02 04 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность», 6-05-0532-01 «География», 6-05-0532-07 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность», 6-05-0532-09 «Страноведение и переводческая деятельность» факультета географии и геоинформатики БГУ. В содержании ЭУМК в соответствии с действующей учебной программой излагаются теоретические, методологические и прикладные основы проведения современных общественно-географических исследований. Рассматриваются следующие вопросы: алгоритм проведения исследования, методы исследования населения, отдельных видов экономической деятельности, городских процессов, транспорта, сферы услуг и др. В приложении представлены примеры вопросов и практических заданий по курсу.

УДК 911.5(075.8)

Счастная И. И. Ландшафтоведение : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 6-05-0532-01 «География», 6-05-0532-02 «Гидрометеорология», 6-05-0532-06 «Геоинформационные системы», 6-05-0532-05 «Космоаэрокартография и геодезия», 6-05-0521-03 «Геоэкология», 6-05-0532-07 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность», 6-05-0532-09 «Страноведение и переводческая деятельность» / И. И. Счастная ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2024. 108 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 105. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/322941>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 12.12.2024, № 018312122024. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся по специальностям 6-05-0532-01 «География», 6-05-0532-02 «Гидрометеорология», 6-05-0532-06 «Геоинформационные системы», 6-05-0532-05 «Космоаэрокартография и геодезия», 6-05-0521-03 «Геоэкология», 6-05-0532-07 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность», 6-05-0532-09 «Страноведение и переводческая деятельность». В ЭУМК содержатся пояснительная записка, аннотации учебных пособий по дисциплине, краткий курс лекций, тематика лабораторных и практических занятий, задания для управляемой самостоятельной работы студентов, перечень заданий в тестовой форме, вопросы для текущего и промежуточного контроля знаний, рекомендуемые пособия для изучения дисциплины.

УДК 91:51(075.8)

Карпиченко А. А. Математические методы в географии : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 6-05-0532-01 «География», 6-05-0521-03 «Геоэкология», 1-31 02 04 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность», 6-05-0532-07 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность», 6-05-0532-09 «Страноведение и переводческая деятельность» / А. А. Карпиченко ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2024. 58 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 58. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/323221>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 17.12.2024, № 019217122024. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся по специальностям 6-05-0532-01 «География», 6-05-0521-03 «Геоэкология», 1-31 02 04 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность», 6-05-0532-07 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность», 6-05-0532-09 «Страноведение и переводческая деятельность». Содержание ЭУМК посвящено методическим правилам применения математических методов в прикладных географических и геоэкологических исследованиях, оно способствует формированию у студентов навыков обработки результатов полевых и экспериментальных исследований и измерений, применения математического анализа и моделирования, оценки их достоверности.

УДК 502/504:002:004.9(075.8)

Методы обработки экологических данных : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 7-06-0521-02 «Прикладная геоэкология» / сост. Д. С. Воробьёв ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2024. 61 с. Библиогр.: с. 58–59. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/324176>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 08.01.2025, № 000108012025. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Методы обработки экологических данных» предназначен для студентов специальности 7-06-0521-02 «Прикладная геоэкология». В ЭУМК изложены научные основы обработки экологических данных, рассмотрены ключевые методы статистического анализа, вопросы пространственного анализа и моделирования экологических данных, использования геоинформационных технологий для обработки данных дистанционного зондирования Земли, а также основные направления экологического картографирования. Представлены тематика практических заданий, электронные ресурсы и вопросы для подготовки к аттестации. При организации образовательного процесса по изучению дисциплины используются практико-ориентированный подход, методы проектного и группового обучения.

УДК 502.1:55:378.147.091.313(075.8)

Научно-исследовательский семинар – 1 : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 7-06-0521-02 «Прикладная геоэкология», профилизация «Окружающая среда и устойчивое развитие» / БГУ ; сост. Н. В. Гагина. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2024. 35 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 33–35. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/324749>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 21.01.2025, № 000921012025. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся в магистратуре по специальности 7-06-0521-02 «Прикладная геоэкология» (профилизация «Окружающая среда и устойчивое развитие»). В ЭУМК изложены научные основы организации геоэкологических исследований, включая проблемное поле исследований, требования к постановке целей и задач диссертационного исследования, применения научных методов исследований, построения моделей, особенностей работы с научной литературой.

УДК 528.8(075.8)

Жумары П. В. Современные системы дистанционного зондирования Земли : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 6-05-0532-05 «Космоаэрокартография и геодезия» / П. В. Жумары ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2024. 184 с. : ил. Библиогр.: с. 179–181. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/325061>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 23.01.2025, № 001023012025. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) «Современные системы дистанционного зондирования Земли» предназначен для студентов специальности 6-05-0532-05 «Космоаэрокартография и геодезия». Содержание ЭУМК предполагает изучение устройства и базовых принципов работы технических средств дистанционного зондирования Земли, а также технологий получения данных с их помощью.

УДК 913(091)(075.8)

Приборович А. А. Компьютерная историческая география : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 6-05-0222-01 «История» / А. А. Приборович, О. Л. Липницкая ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2025. 79 с. : ил. Библиогр.: с. 75–77. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/325175>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 29.01.2025, № 001229012025. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Компьютерная историческая география» предназначен для студентов специальности 6-05-0222-01 «История». Содержание ЭУМК предполагает изучение вопросов согласно учебной программе по учебной дисциплине «Компьютерная историческая география». ЭУМК способствует формированию системы знаний по теоретическим и прикладным основам создания и использования компьютерных карт в геоинформационной системе «Mapinfo», овладению практическими навыками их применения в качестве инструмента для решения исследовательских задач в исторической науке. Структура ЭУМК включает теоретический, практический разделы, раздел контроля знаний и вспомогательный раздел.

УДК 631.6(075.8)

Мелиоративная география : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 1-31 02 01 «География (по направлениям)», 6-05-0532-01 «География» / БГУ ; сост.: И. А. Ефимова [и др.]. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2025. 88 с. : 10 рис., 10 табл. Библиогр.: с. 87–88. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/325538>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 05.02.2025, № 001505022025. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся по специальностям 1-31 02 01 «География (по направлениям)», 6-05-0532-01 «География». Содержание ЭУМК предполагает повышение эффективности управления образовательным процессом и самостоятельной работой студентов по освоению учебной дисциплины «Мелиоративная география» с помощью внедрения в образовательный процесс инновационных образовательных технологий, обеспечение качественной подготовки высококвалифицированных специалистов-географов.

УДК 556.55(075.8)

Лопух П. С. Общая и региональная лимнология : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 6-05-0532-02 «Гидрометеорология» / П. С. Лопух ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2025. 169 с. : 29 ил., 14 табл. Библиогр.: с. 154–157, 169. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/325926>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 12.02.2025, № 001912022025. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Общая и региональная лимнология» предназначен для студентов специальности 6-05-0532-02 «Гидрометеорология». В ЭУМК содержатся вопросы предмета и состава курса «Общая и региональная лимнология», история науки, общие вопросы комплексной лимнологической характеристики озер, региональные особенности озер Беларуси. Рассмотрены вопросы положения озер в природных ландшафтах, история развития в голоцене, генезис озерных котловин, морфологические и морфометрические особенности котловин, балансовые и гидродинамические особенности гидрологического режима, физические и гидрохимические особенности водной среды, основные группы гидробионтов и специфика их обитания в водной среде, процессы накопления и преобразования веществ в ложе, типы отложений, вопросы классификации озер и региональные озерно-речные системы, природно-ресурсный потенциал озер и специфика его использования.

УДК 33:911.3(075.8)

Зайцев В. М. **Введение в социально-экономическую географию** : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 1-31 02 04 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность», 6-05-0532-01 «География», 6-05-0532-07 «Геотехнологии туризма и экскурсионная деятельность» / В. М. Зайцев ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2024. 140 с. Библиогр.: с. 137–139. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/325984>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 14.02.2025, № 002114022025. Текст : электронный.

В электронном учебно-методическом комплексе представлены материалы по истории развития и динамике предмета и объекта исследования социально-экономической географии, основным географическим закономерностям современного состояния мировой экономики и социальной сферы, современным особенностям международного географического разделения труда и экономической интеграции, глобальным проблемам мирового развития.

УДК 33:911.3(100)(075.8)

Kalmakova A. G. **Geoeconomics of countries** : electron. educ. and methodol. complex with a creat. compon. for specialty 7-06-0321-01 «Journalism» / A. G. Kalmakova, N. M. Pisarchuk ; BSU. Electron. text data. Minsk : BSU, 2025. 75 p. Bibliogr.: p. 73. Available from: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/326795>. Screen title. Deposited in BSU 06.03.2025, No. 003606032025. Text : electronic.

The electronic educational and methodological complex for the academic discipline «Geoeconomics of countries» (physical and geographical part) is intended for students in English and facilitates the mastery of the discipline program by students. Includes sections: theoretical, practical, knowledge control and auxiliary. The sections consider issues of theory in the discipline, methods of conducting seminars, practical, controlled independent work, control of assimilation of the material and assessment of knowledge. Considerable attention is paid to the heuristic and practice-oriented component.

УДК 551.58(075.8) + 504.7:005.334(075.8)

Логинова Е. В. **Климатические риски и адаптация к изменению климата** : электрон. учеб.-метод. комплекс для специальности «гидрометеорология» / Е. В. Логинова ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2025. 291 с. : 55 рис., 40 табл. Библиогр.: с. 290. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/328057>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 07.04.2025, № 005307042025. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для магистрантов специальности «гидрометеорология» (профилизация «Климатические риски и управление водными ресурсами») дневной формы обучения. Содержание ЭУМК предполагает изучение следующих вопросов: климатических рисков и адаптации к изменению климата под влиянием естественных и антропогенных факторов, управления климатическими рисками.

УДК 631.4(075.8) + 624.131(075.8)

Ковальчик Н. В. **Почвоведение с основами грунтоведения** : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 6-05-0532-04 «Геология» / Н. В. Ковальчик, Е. А. Кухлевский ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2025. 102 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 101. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/329406>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 15.05.2025, № 006915052025. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся по специальности 6-05-0532-04 «Геология». Содержание ЭУМК предполагает повышение эффективности управления образовательным процессом и самостоятельной работой студентов по освоению учебной дисциплины «Почвоведение с основами грунтоведения» с помощью внедрения в образовательный процесс инновационных образовательных технологий, обеспечение качественной подготовки высококвалифицированных специалистов.

УДК 91:004.9(075.8)

Системы автоматизированного проектирования с основами BIM-технологий : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 6-05-0532-06 «Геоинформационные системы», 1-56 02 02 «Геоинформационные систе-

мы (по направлениям)» / БГУ ; сост.: А. С. Семенюк, С. С. Михайлов. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2025. 170 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 169. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/329418>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 16.05.2025, № 007016052025. Текст : электронный.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся по специальностям 6-05-0532-06 «Геоинформационные системы», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)». Содержание ЭУМК предполагает повышение эффективности управления образовательным процессом и самостоятельной работой студентов по освоению учебной дисциплины «Системы автоматизированного проектирования с основами BIM-технологий» с помощью внедрения в образовательный процесс инновационных образовательных технологий, обеспечение качественной подготовки высококвалифицированных специалистов.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОГРАФИЯ

<i>Гаркун Д. А., Титов А. Н.</i> Региональные различия в уровне развития медицинского туризма в Беларуси	3
<i>Овчарова Е. П., Алисевич С. В., Ковальчик Н. В.</i> Оценка трансформации пространственной структуры водосборов урбанизированной территории с применением гидрологического моделирования в ГИС на примере г. Минска	24
<i>Зайцева А. П., Шестаков Н. А., Топаз А. А., Кафтанчикова А. Б.</i> Картографическое моделирование зон затопления в ГИС «Панорама» на примере участка р. Припять	35
<i>Китаев Л. М., Титкова Т. Б., Алешина М. А.</i> Изменчивость характеристик экстремальности снежного покрова в условиях современного климата Сибири	47
<i>Шевелёва А. А., Гледко Ю. А.</i> Географические закономерности распределения гидрометеоров на территории Беларуси в условиях современного изменения климата	60
<i>Счастная И. И., Никифоренко В. В.</i> Оценка депонирования углекислого газа зелеными насаждениями урбокандаштов г. Могилёва и пути повышения его объема	75
<i>Аббасова А. А.</i> Географические особенности структуры и производства технических культур по высотным зонам в северо-западной части Азербайджана на примере Гянджа-Дашкесанского и Газах-Товузского экономических районов	89
<i>Данилович И. С., Тарасевич И. В.</i> Трансформация пространственно-временных закономерностей водного режима рек Беларуси в условиях изменяющегося климата	99

ГЕОЛОГИЯ

<i>Комаровский М. Е.</i> Структурно-генетические особенности ледниковых ложбин и впадин березинской генерации в Беларуси	108
<i>Зуй В. И.</i> ГИС-средства в геологии на основе программного пакета <i>GMT</i>	125
Аннотации депонированных в БГУ работ	141

CONTENTS

GEOGRAPHY

<i>Harkun D. A., Tsitou A. M.</i> Regional differences in the level of development of medical tourism in Belarus	3
<i>Aucharova A. P., Alisievich S. V., Kavalchyk N. V.</i> Assessment of the spatial structure transformation of catchments on the urban territory using hydrological modelling in GIS on the example of Minsk	24
<i>Zaitseva H. P., Shastakou M. A., Tapaz A. A., Kaftanchykava H. B.</i> Cartographic modelling of flood zones in GIS «Panorama» on the example of a section of the Pripyat River	35
<i>Kitaev L. M., Titkova T. B., Aleshina M. A.</i> Variability of snow cover extreme characteristics in the modern climate of Siberia	47
<i>Sheveleva A. A., Hledko Yu. A.</i> Geographical patterns of hydrometeor's distribution on the territory of Belarus in the context of modern climate change	60
<i>Shchasnaya I. I., Nikiforenko V. V.</i> Assessment of carbon dioxide sequestration by green spaces of urban landscapes of Mogilev and ways to increase its volume	75
<i>Abbasova A. A.</i> Geographical features of the structure and production of technical crops by altitude zones in the north-western part of Azerbaijan on the example of the Ganja-Dashkasan and Gazakh-Tovuz economic regions	89
<i>Danilovich I. S., Tarasevich I. V.</i> Transformation of spatio-temporal pattern of river regime in Belarus according to climate changes	99

GEOLOGY

<i>Komarovskiy M. E.</i> Structural and genetic features of glacial valleys and basins of the Berezina generation in Belarus	108
<i>Zui V. I.</i> GIS tools in geology based on <i>GMT</i> software package	125
Indicative abstracts of the papers deposited in BSU	141

Журнал включен Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь в Перечень научных изданий для опубликования результатов докторских 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.
№ 1. 2025

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 *O. A. Семенец, M. A. Подголина*
Технический редактор *B. V. Пишкова*
Корректор *L. A. Меркуль*

Подписано в печать 30.05.2025.
Тираж 25 экз.

© БГУ, 2025

Journal
of the Belarusian State University.
Geography and Geology.
No. 1. 2025

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 *O. A. Semenets, M. A. Podgolina*
Technical editor *V. V. Pishkova*
Proofreader *L. A. Merkul'*

Signed print 30.05.2025.
Edition 25 copies.

© BSU, 2025