



БЕЛОРУССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ГЕОГРАФИЯ ГЕОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

GEOGRAPHY and GEOLOGY

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

Выходит один раз в полугодие

1

2024

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

- Editor-in-chief** **ANTIPOVA E. A.**, doctor of science (geography), full professor; professor at the department of economic and social geography of the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus.
E-mail: antipova@bsu.by
- Deputy editor-in-chief** **KLEBANOVICH N. V.**, doctor of science (agricultural sciences), full professor; professor at the department of soil science and land information systems of the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus.
E-mail: n_klebanovich@inbox.ru
- Executive secretary** **HAHINA N. V.**, PhD (geography), docent; head of the department of geographical ecology of the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus.
E-mail: hahina@bsu.by
- Baltrūnas V.** Nature Research Centre, Vilnius, Lithuania.
Vitchenko A. N. Belarusian State University, Minsk, Belarus.
Donert K. European Centre of Excellence, EUROGEO, Salzburg, Germany.
Yelovicheva Ya. K. Belarusian State University, Minsk, Belarus.
Zui V. I. Belarusian State University, Minsk, Belarus.
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.
Mezentshev 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.

УДК 911.3:314(476) + 331.52:63

ГОРОДСКОЕ РАССЕЛЕНИЕ КИТАЯ В XXI в.: НАЦИОНАЛЬНАЯ СПЕЦИФИКА, ДИНАМИКА ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ФОРМЫ

Е. А. АНТИПОВА¹⁾, ЯН ЛЮ¹⁾

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

Аннотация. На основе официальной статистической информации о городах Китая за 2000–2020 гг. проведен географический анализ городского расселения в разрезе 337 городов пяти уровней в соответствии с классификацией деловой привлекательности городов *YiCai* и 19 городских агломераций. С использованием литературного, математико-статистического, сравнительно-географического, картографического методов, географической систематизации и ГИС-технологий рассчитаны показатели внутренней структуры городского расселения, включая плотность городского населения и зону влияния городов, выполнены вычисления по правилу «ранг – размер» и получен ряд новых результатов. Установлено, что отличительной особенностью китайских подходов к выделению города является отнесение к нему наряду с центральным городом прилегающих районов, включающих как сельскую местность, так и административно-территориальные единицы более низкого ранга. Анализ географии городов по высоте над уровнем моря и численности населения в разрезе классов городов по людности (мелкие, средние, крупные, особо крупные и сверхкрупные города) показал, что преобладает равнинный тип городского расселения и вычленяются восточный прибрежный крупноселенный меридиональный пояс городского расселения, восточный континентальный среднеселенный меридиональный пояс городского расселения, центральный мелкоселенный меридиональный пояс городского расселения и западный мелкоселенный меридиональный пояс рассредоточенного городского расселения. Исследование внутренней структуры городского расселения определило тенденции макрополизации,

Образец цитирования:

Антипова ЕА, Ян Лю. Городское расселение Китая в XXI в.: национальная специфика, динамика внутренней структуры и пространственные формы. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;1:3–20. EDN: UCWJYT

For citation:

Antipova EA, Yang Liu. Urban settlement of China in the 21st century: national specifics, internal structure dynamics, and spatial forms. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;1:3–20. Russian. EDN: UCWJYT

Авторы:

Екатерина Анатольевна Антипова – доктор географических наук, профессор; профессор кафедры экономической и социальной географии факультета географии и геоинформатики.

Ян Лю – младший научный сотрудник кафедры экономической и социальной географии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Ekaterina A. Antipova, doctor of science (geography), full professor; professor at the department of economic and social geography, faculty of geography and geoinformatics. antipovaekaterina@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0001-7862-5500>

Yang Liu, junior researcher at the department of economic and social geography, faculty of geography and geoinformatics. 1914391266@qq.com

увеличения средней плотности и положительную динамику роста плотности в двух классах городов – особо крупных и сверхкрупных. Путем расчетов по правилу «ранг – размер» для 5 крупнейших городов Китая по данным за 2000 и 2020 гг. установлено, что система городского расселения Китая является относительно сбалансированной, практически соответствуя закону Ципфа, но на нее во многом влияет государственная политика. Анализ 19 городских агломераций национального, регионального и субрегионального уровней, формирующихся в стране в соответствии с Национальным планом урбанизации нового типа (2014–2020), обнаружил существенные различия в численности населения и количестве входящих в них городов, что выступает основанием для их дальнейшего глубокого изучения в целях разработки дифференцированных дорожных карт развития городских агломераций.

Ключевые слова: Китай; городское расселение; критерии выделения города и городской агломерации; макрополиция; плотность населения; зона влияния города; городская агломерация; территориальная дифференциация.

URBAN SETTLEMENT OF CHINA IN THE 21st CENTURY: NATIONAL SPECIFICS, INTERNAL STRUCTURE DYNAMICS, AND SPATIAL FORMS

E. A. ANTIPOVA^a, YANG LIU^a

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

Corresponding author: E. A. Antipova (antipovaekaterina@gmail.com)

Abstract. The geographical analysis of urban settlement in the context of 337 cities of five levels according to the classification of business attractiveness of cities and 19 urban agglomerations was carried out based on official statistical information about Chinese cities *YiCai* for 2000–2020. Using the literary, mathematical-statistical, comparative-geographical, cartographic methods, geographic systematisation and GIS technologies, the authors calculated internal urban settlement, urban population density, urban influence zone, «rank – size» rule and obtained new results. It has been established that a distinctive feature of Chinese approaches to identifying a city is the inclusion of adjacent territories, including both rural areas and administrative-territorial units of a smaller rank, into its territory along with the core city. An analysis of the geographical location of cities by height above mean sea level and population in the context of five classes of population (small, medium, large, especially large, and extra-large cities) showed that the flat type of urban settlement predominates in nature, and eastern coastal large-settled meridional zone of urban settlement, the eastern continental medium-settled meridional zone of urban settlement, the central small-settled meridional zone of urban settlement, and the western small-settled meridional zone of dispersed urban settlement are distinguished. Analysis of the internal structure of urban settlement determined the trend of macropolitisation, the growth of the average population size of cities and the positive dynamics of population growth in two classes of cities, especially large and super-large cities. By using «rank – size» rule calculations for the 5 largest cities in China for 2000 and 2020, it is found that China's urban settlement is relatively balanced, almost in accordance with Zipf's law, but largely influenced by government policies. An analysis of 19 urban agglomerations at the national, regional and subregional levels, formed in the country in accordance with the National New Urbanisation Plan (2014–2020), revealed significant differences in the population size and number of cities included in them, which serves as a justification for their in-depth further study to develop differentiated roadmaps for their development.

Keywords: China; urban settlement; criteria for identifying city and urban agglomeration; macropolitisation; population density; city influence zone; urban agglomeration; territorial differentiation.

Введение

Города в XXI в. стали центрами деловой активности, экономического роста и развития мирового хозяйства, обеспечивая около 60 % глобального ВВП. Однако на них приходится также примерно 70 % выбросов углерода и более 60 % использования ресурсов. Быстрая урбанизация приводит к увеличению числа обитателей трущоб, перегруженности инфраструктуры и сферы услуг, ухудшению ситуации с загрязнением воздуха и незапланированному разрастанию городов. Усиливающаяся социально-экономическая дифференциация стран обуславливает различия в городском расселении. При этом проблема сбалансированного развития городов имеет приоритет для всего мира и выступает одной из целей в области устойчивого развития¹. Китай является страной с интенсивной урбанизацией, в которой был осуществлен урбанизационный переход, а доля городского населения увеличилась с 11,8 % в 1950 г. до

¹Цели в области устойчивого развития. Цель 11: обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов [Электронный ресурс] // Организация Объединенных Наций. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/cities/> (дата обращения: 11.09.2023).

63,9 % в 2020 г. Государство вступило в стадию урбанизационной зрелости, и начиная с конца 1950-х гг. его правительством реализуются стратегии управления урбанизацией [1; 2]. На этом фоне в Китае сохраняются проблемы статистического учета городов, выделения подходов к классификации городов, отличающихся от городов экономически развитых стран, и последующего сопоставления процессов урбанизации с динамикой городского расселения. Китай демонстрирует сверхрост городов-мультимиллионеров, таких как Шанхай, Пекин или Гуанчжоу, – символов масштабной урбанизации. В то же время страна располагает уникально большим количеством городов, изобилием городских форм и процессов, которые обуславливают географический образ городского расселения.

Цель статьи – выявление особенностей внутренней структуры городского расселения Китая по классам людности и пространственной специфике распределения численности городского населения. Для реализации цели решались следующие задачи: определялись черты внутренней структуры городского расселения и оценивалась ее сбалансированность, изучалось географическое расположение городов в зависимости от высоты над уровнем моря, анализировалась доля городского населения в городах с учетом подходов к выделению городских территорий в Китае, систематизировались города по плотности населения и зоне влияния. Объектом исследования выступили 337 городов пяти уровней по классификации деловой привлекательности городов *YiCai*², а его предметом – сдвиги во внутренней структуре городского расселения за 2000–2020 гг. с вычленением его доминирующих пространственных форм. Информационную базу составили официальные данные статистических ежегодников городов Китая³ и Национального плана урбанизации Китая нового типа (2014–2020)⁴.

Современное состояние исследований городского расселения Китая

Урбанизация и городское расселение – одна из наиболее динамичных предметных областей научных исследований. Этот факт связан с тем, что в современном мировом хозяйстве некоторые города по функциям выходят за национальные границы и выступают проводниками международного географического разделения труда. Кроме того, в науке с позиций теории городского расселения с учетом различий в подходах к определению понятий «город», «городская агломерация», выделению стадий пространственного развития городов нет единых взглядов, а методология находится на этапе совершенствования. Анализ литературы позволил выявить несколько наиболее активно обсуждаемых направлений исследований городского расселения: теорию и практику трансформации сельско-городского континуума, концепцию городской агломерации, критерии ее идентификации, вопросы пространственного развития городских агломераций, концепцию новой урбанизации.

Урбанизационный переход и масштабные долгосрочные миграции населения из села в город обусловили изменение связей между деревней и городом в социально-экономическом развитии государства. Эта ситуация привела к формированию разнообразных функций сельско-городского континуума. Размер и доступность центрального города влияют на уровень благосостояния внутри его и близлежащих сельских районов, а также на их экономические перспективы. Граница между сельскими и городскими территориями рассматривается как место обмена и социально-экономического взаимодействия [3]. Сельско-городская интеграция выступает глобальной проблемой, которая сопряжена с преодолением неравенства, бедности, экономическим ростом и достижением других целей в области устойчивого развития. Существующие исследования оценивают масштабы этой интеграции специальным индексом и признают приоритет влияния на нее географических факторов на примере Китая. В стране создается структура сельско-городской интеграции, включая рост региональной экономики, развитие сельских районов, укрепление связи между городом и деревней и уменьшение разрыва между ними [4]. Оценивая трансформацию города и села в современном мире, ученые основываются на концепциях дерева трансформации, закона трансформации, порога трансформации и продукта слияния [5].

Развитие концепции городской агломерации происходит в рамках становления научных представлений о новых формах городского расселения – городах-регионах [6] и интегрированных городских кластерах [7]. Китайские исследователи дополняют перечень параметров количественной оценки городских агломераций, который включает классические показатели и их пороговые значения, экономическими показателями, такими как ВВП на душу населения (выше 3 тыс. долл. США, или выше 21 тыс. юаней),

²Slater M. China city tiers – an overview [Electronic resource] // China Checkup. URL: <https://www.chinacheckup.com/blog/china-city-tiers> (date of access: 21.08.2023).

³Статистический ежегодник городов Китая за 2001 г. // Статистические ежегодники : сайт. URL: <https://www.zgtjnj.org/navibooklist-N2006010420-1.html> (дата обращения: 23.03.2023) (на кит.); Статистический ежегодник городов Китая за 2011 г. // Там же. URL: <https://www.zgtjnj.org/navibooklist-N2012020070-1.html> (дата обращения: 23.03.2023) (на кит.); 中国城市统计年鉴2021 = China city statistical yearbook 2021 / Natl. Bureau of Statist. of China. Beijing : China Statist. Press, 2021. 395 p.

⁴Национальный план урбанизации Китая нового типа (2014–2020) // Правительство Китая : сайт. URL: https://www.gov.cn/zhengce/2014-03/16/content_2640075.htm (дата обращения: 23.03.2023) (на кит.).

плотность экономического пространства (691 тыс. долл. США на 1 км², или 5 млн юаней на 1 км²) и структура экономики (более 30 % экспорта) [8]. Обосновывается также, что территориям, находящимся внутри городской агломерации, необходимо иметь общую историческую, культурную и когнитивную идентичность, схожие природные ландшафты. Городские агломерации должны быть связаны крупными автомагистралями со значительными грузовыми и сервисными потоками [9].

Динамика пространства городского расселения Китая включает четыре стадии развития городской агломерации: 1) стадию расширения города до городского района; 2) стадию расширения городского района до городского пояса; 3) стадию расширения городского пояса до большого городского пояса; 4) стадию объединения мегалополисов [9]. Очевидно, что каждая стадия расширения позволяет городским агломерациям становиться более влиятельными региональными, национальными и в конечном итоге международными центрами роста.

Концепция новой урбанизации формируется преимущественно в Китае и основывается на трансформационных динамичных процессах, происходящих в сельско-городском континууме, пространстве собственно городских агломераций, а также на особенностях их экономического развития в условиях необходимости устойчивого роста и интеграции в международное географическое разделение труда. Городские агломерации Китая превращаются в глобальные экономические центры, а тренд урбанизации страны в XXI в. описывается не классической S-кривой Нортема, а J-кривой [10]. Наступила эра Китая, что объясняется влиянием феноменального увеличения численности городского населения, роста городов и повышения концентрации экономической активности в ряде городов страны на мировые процессы урбанизации. Осознание того, что городские агломерации способствуют экономическому росту, побуждает китайское правительство инициировать исследования в этой области [11; 12]. Государство предложило построить иерархическую систему с 5 крупными городскими агломерациями национального уровня, 9 средними городскими агломерациями регионального уровня и 6 малыми городскими агломерациями субрегионального уровня. В связи с этим был разработан и утвержден Национальный план урбанизации нового типа (2014–2020), призванный всесторонне скоординировать развитие городов с предполагаемыми изменениями в экономической и социальной сферах⁵.

Методика исследования

Исследование состояло из нескольких этапов. На первом этапе была собрана статистическая информация о площади и численности населения 337 городов пяти уровней в соответствии с классификацией деловой привлекательности городов *YiCai*⁶ за 2000, 2010 и 2020 гг. При обработке данных учитывалась национальная специфика Китая относительно подходов к определению понятия «город». Официально в стране городами (市 «ши») именуется административно-территориальные единицы разных уровней, состоящие из центрального города и района, площадь которого обычно во много раз превышает площадь собственно городской застройки. Внутри данной территории могут находиться подчиненные единицы – уезды, волости и другие города более низкого ранга. Такие административно-территориальные единицы не являются городами в прямом смысле. По этим причинам население городов как таковых трудно оценить: в статистических сборниках приводится численность населения всего района, подчиненного городскому муниципалитету, который по площади и численности населения нередко превосходит его урбанизированную часть.

В настоящий момент в стране с учетом трехуровневого административно-территориального деления сложилась следующая система городов⁷. Существуют города первого уровня (провинции) – города центрального подчинения, наделенные полномочиями провинций (Пекин, Шанхай, Тяньцзинь, Чунцин); города второго уровня (префектуры), состоящие из городов двух уровней подчинения – городов уровня субпровинций (15 городов) и городов уровня префектур (278 городов); города третьего уровня (уезды) (388 городов), включающие города двух уровней подчинения – города уровня субпрефектур и города уровня уездов. Отдельно выделяются города уровня волостей, к которым относятся городские поселки.

⁵Национальный план урбанизации Китая нового типа (2014–2020) // Правительство Китая : сайт. URL: https://www.gov.cn/zhengce/2014-03/16/content_2640075.htm (дата обращения: 23.03.2023) (на кит.); План 13-й пятилетки национального экономического и социального развития Китая // Там же. URL: https://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm (дата обращения: 30.05.2023) (на кит.).

⁶Опубликован список новых городов первого уровня в 2023 г.! Чэнду занимает первое место, Куньмин возвращается, Циндао поднимается! (Прилагается полный список городов пяти уровней.) [Электронный ресурс] // Sohu. URL: https://www.sohu.com/a/680912173_121124305 (дата обращения: 15.07.2023) (на кит.).

⁷Административно-территориальное деление Китая // Правительство Китая : сайт. URL: http://www.gov.cn/guoqing/2005-09/13/content_5043917.htm (дата обращения: 15.09.2022) (на кит.).

Значения статистических показателей были размещены в базе данных *Excel* и экспортированы в программный пакет *ArcGIS* для их дальнейшего пространственно-временного анализа и картографирования полученных результатов. Кроме того, собирались информация о распределении городов Китая по высоте над уровнем моря и сведения о городских агломерациях.

На втором этапе с использованием статистико-математического метода, а также метода группировки были рассчитаны показатели, необходимые для анализа внутренней структуры городского расселения Китая по классам людности: к малым относятся города с численностью населения менее 0,5 млн человек, к средним – города с численностью населения от 0,5 до 1,0 млн человек, к крупным – города с численностью населения от 1,0 до 5,0 млн человек, к особо крупным – города с численностью населения от 5,0 до 10,0 млн человек, а к сверхкрупным – города с численностью населения более 10,0 млн человек⁸. В перечень таких показателей включены: высота городов над уровнем моря, численность и доля населения городов каждого класса, количество и доля городов каждого класса, доля городского населения в городе с учетом подходов к определению городских территорий в Китае, плотность городского населения, средняя людность городов каждого класса, ранговый индекс Ципфа, а также коэффициент зоны влияния города, который рассчитывался по формуле

$$L_i = \sqrt[3]{\frac{P_i}{4}},$$

где L_i – зона влияния города i , км; P_i – численность населения города i , чел.⁹

На третьем этапе полученные результаты были систематизированы в виде сводных таблиц для изучения особенностей распределения городов по высоте над уровнем моря и внутренней структуры городского расселения Китая, выделения меридиональных поясов городского расселения. На четвертом этапе анализировались структура и география 19 городских агломераций.

Результаты и их обсуждение

По данным переписи населения 2020 г., в административно-территориальном делении Китая представлено 685 городов. Из них 337 городов (49,2 %), которые являются объектом настоящего исследования, составляют города пяти уровней по классификации деловой привлекательности городов *YiCai*. Они считаются основным каркасом городского расселения Китая, располагаются преимущественно в восточной части территории страны, выступают своеобразными ориентирами экономического роста и поэтому часто используются при анализе демографического и социально-экономического развития государства.

Китай представляет собой страну с чрезвычайно разнообразными природными условиями, обладающую большими горными массивами, площадь которых достигает порядка $\frac{2}{3}$ от общей площади государства. Из них горные районы составляют около 33 %, нагорья – 26 %, впадины – почти 19 %, равнины – примерно 12 %, возвышенности – приблизительно 10 %. Природно-географический фактор был определяющим (по Ягельскому) как в размещении населения Китая, так и в его городском расселении. Анализ территории страны по высоте над уровнем моря с учетом условного разделения местности в зависимости от рельефа на три ареала показал, что 64,7 % провинций относятся к равнинному ареалу, 29,4 % провинций – к плато и среднегорному ареалу, а 5,9 % провинций – к высокогорному ареалу.

Географическое распределение городов Китая по высоте над уровнем моря соответствует разделению провинций на ареалы: 62,0 % городов пяти уровней расположены в равнинной части – на востоке страны, 33,5 % городов – на плато и среднегорьях, 4,5 % городов – на высокогорьях, а именно в Тибетском автономном районе (АР) и провинции Цинхай (рис. 1, табл. 1). Такое распределение городов позволяет сделать вывод о преобладании равнинного характера городского расселения Китая, что является первой тенденцией данного процесса. Существенные различия в размещении городов по высоте над уровнем моря выступают основанием для территориально-дифференцированных мер разработки направлений развития инфраструктуры и логистики в городских агломерациях в соответствии с планом 13-й пятилетки национального экономического и социального развития Китая.

Во внутренней структуре городского расселения Китая представлено пять классов городов по численности населения. По состоянию на 2000 г. в стране доминировали два класса городов – особо крупные (28,9 %) и крупные (62,4 %). За 20 лет внутренняя структура городского расселения Китая осталась относительно устойчивой: особо крупные (26,2 %) и крупные (59,6 %) города продолжили преобладать, однако возросла доля средних (с 3,0 до 4,9 %) и сверхкрупных (с 3,0 до 7,1 %) городов.

⁸Бажанов П. Изменены правила классификации городов в Китае [Электронный ресурс] // CNLegal.ru – блог о законодательстве КНР. URL: https://cnlegal.ru/uncategorized/china_cities_classification/ (дата обращения: 15.09.2022).

⁹Пивоваров Ю. Л. Основы геоурбанистики: урбанизация и городские системы : учеб. пособие. М. : Владос, 1999. 231 с.

Таблица 1

Распределение городов Китая по высоте над уровнем моря

Table 1

Distribution of Chinese cities by height above mean sea level

Тип провинций в зависимости от рельефа	Названия провинций	Провинции		Города	
		Количество, ед.	Доля, %	Количество, ед.	Доля, %
Высокогорные провинции (выше 4000 м)	Тибетский АР, Цинхай	2	5,9	15	4,5
Провинции, расположенные на плато, и среднегорные провинции (4000–500 м)	Синьцзян-Уйгурский АР, Ганьсу, АР Внутренняя Монголия, Нинся-Хуэйский АР, Шэньси, Шаньси, Сычуань, Чунцин, Гуйчжоу, Юньнань	10	29,4	113	33,5
Равнинные провинции (менее 500 м)	Хэйлунцзян, Цзилинь, Ляонин, Пекин, Тяньцзинь, Хэбэй, Шаньдун, Хэнань, Аньхой, Цзянсу, Шанхай, Хубэй, Хунань, Цзянси, Чжэцзян, Фуцзянь, Гуанси-Чжуанский АР, Гуандун, Хайнань, Тайвань, Гонконг, Макао	22	64,7	209	62,0

Примечание. Разработано на основе данных об административно-территориальном делении Китая.

Распределение численности населения по классам городов повторяет количественную структуру городов: наибольшее количество жителей сосредоточено в крупных, особо крупных и сверхкрупных городах (табл. 2). Данный период свидетельствует об активном индустриальном развитии страны, когда крупные города выступают центрами притяжения мигрантов, местами приложения труда. Поэтому второй тенденцией городского расселения Китая является макрополизация – преобладание крупных городов и концентрация в них населения (рис. 2).

Таблица 2

Внутренняя структура городского расселения Китая в 2000, 2010 и 2020 гг.

Table 2

The internal structure of urban settlement in China in 2000, 2010 and 2020

Классы городов по численности населения	Доля городов каждого класса во внутренней структуре городского расселения, %			Доля населения городов каждого класса от общей численности городского населения, %		
	2000 г.	2010 г.	2020 г.	2000 г.	2010 г.	2020 г.
Малые города (менее 0,5 млн чел.)	2,7	1,1	2,2	0,2	0,1	0,2
Средние города (0,5–1,0 млн чел.)	3,0	2,5	4,9	0,6	0,4	0,8
Крупные города (1,0–5,0 млн чел.)	62,4	60,4	59,6	43,9	38,9	37,0
Особо крупные города (5,0–10,0 млн чел.)	28,9	32,5	26,2	45,4	49,4	39,1
Сверхкрупные города (более 10,0 млн чел.)	3,0	3,5	7,1	9,7	11,2	22,9

Примечание. Разработано на основе данных статистических ежегодников городов Китая.

Известно, что 55 % городского населения страны проживает в городах с численностью населения свыше 5 млн человек и 99 % городского населения – в городах с численностью населения более 1 млн человек (рис. 3). Географически города концентрируются на востоке Китая. Самые крупные по численности населения города сосредоточены в прибрежной зоне, что свидетельствует о тенденции маринизации городского расселения. Картографирование территории по средней плотности позволило выделить восточный

прибрежный крупноселенный меридиональный пояс городского расселения, восточный континентальный среднеселенный меридиональный пояс городского расселения, центральный мелкоселенный меридиональный пояс городского расселения и западный мелкоселенный меридиональный пояс рассредоточенного городского расселения.

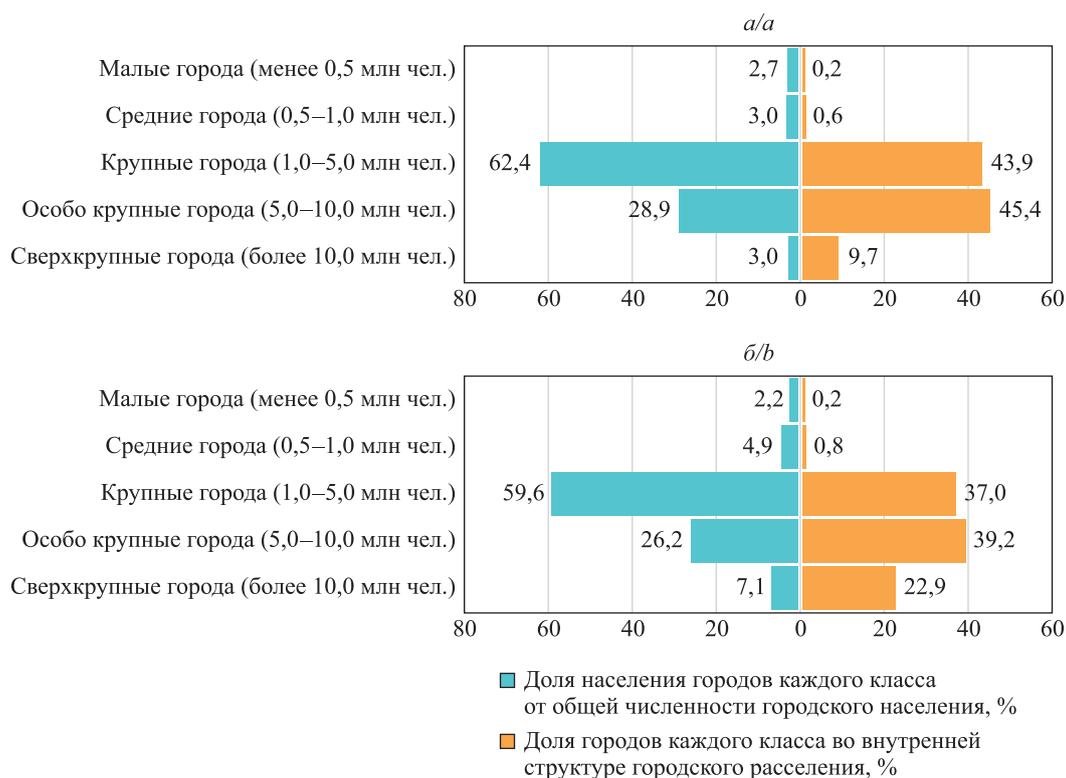


Рис. 2. Внутренняя структура городского расселения Китая:
 а – в 2000 г.; б – в 2020 г. (урбанистические пирамиды)
 (разработано на основе данных статистических ежегодников городов Китая)

Fig. 2. Internal structure of urban settlement in China:
 а – in 2000; б – in 2020 (urbanistic pyramids)
 (developed based on data from Chinese city statistical yearbooks)

Численность населения самых крупных городов Китая превышает 10 млн человек, что сопоставимо с численностью населения отдельных государств мира (например, Азербайджана, Греции, Кубы, Португалии, Чада и др.). По данным переписи населения 2020 г., крупнейшими городами в стране являлись Чунцин, Шанхай, Пекин, Чэнду и Баодин (табл. 3). Чунцин, Шанхай и Пекин на протяжении 20 лет составляли топ-3 городов Китая по численности населения. Однако они различаются темпами роста. В этом отношении Шанхай и Пекин демонстрируют феноменально высокие значения данного показателя: за 2000–2020 гг. численность населения Шанхая ежегодно увеличивалась на 4,8 %, а численность населения Пекина – на 4,4 %.

Отличительные особенности китайских подходов к идентификации понятия «город» не позволяют однозначно относиться к выделению крупнейших городов в стране. Так, Чунцин, численность населения которого еще в 2000 г. превысила 30 млн человек, является муниципалитетом центрального подчинения, наделенным полномочиями провинции, и входит в число городов нового первого уровня. Однако основная часть населения этой крупнейшей по площади административно-территориальной единицы из 4 городов указанной категории проживает вне урбанизированной зоны. По китайским критериям Баодин также считается городом и принадлежит к городам второго уровня, но в сущности он представляет собой городской округ, в который включено несколько административно-территориальных единиц – 5 районов, 4 городских уезда и 15 уездов.

Как отмечалось ранее, национальной спецификой выделения города является отнесение к нему прилегающих районов, в том числе сельской местности или административно-территориальных единиц более низкого ранга. Данный подход обуславливает различия в уровне урбанизированности городов, что отличает города Китая от городов экономически развитых стран. В ходе исследования были проведены расчеты доли городского населения 337 городов и в зависимости от этого определены три класса городов (табл. 4).

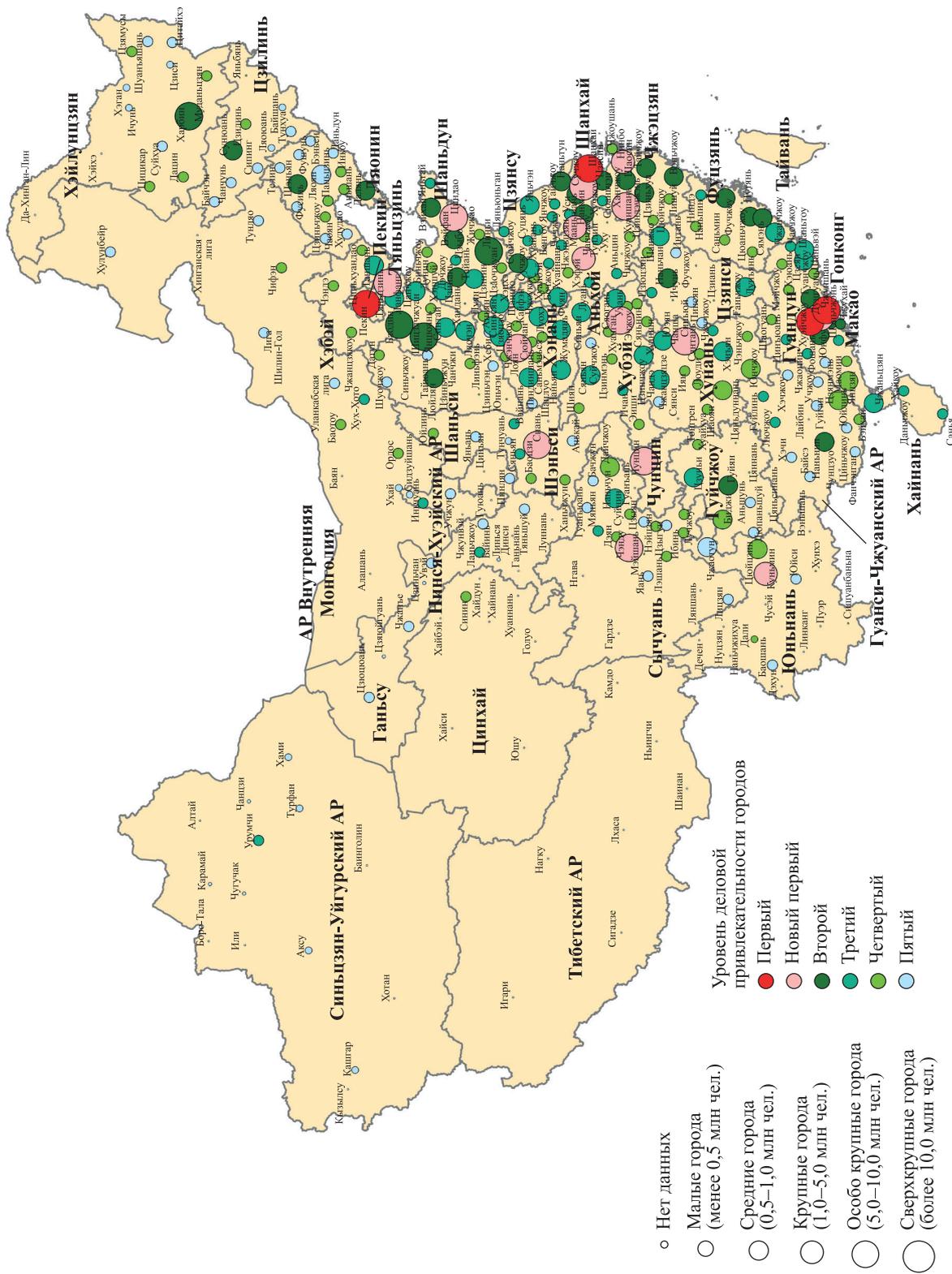


Рис. 3. Распределение городов Китая по численности населения в 2020 г. в соответствии с классификацией деловой привлекательности городов YiCai

Fig. 3. Distribution of Chinese cities by population in 2020 according to the classification of business attractiveness of cities YiCai

Таблица 3

Крупнейшие города Китая по численности населения в 2000, 2010 и 2020 гг.

Table 3

Largest Chinese cities by population in 2000, 2010 and 2020

2000 г.		2010 г.		2020 г.	
Город	Численность населения, млн чел.	Город	Численность населения, млн чел.	Город	Численность населения, млн чел.
Чунцин	30,9	Чунцин	33,0	Чунцин	32,1
Шанхай	13,2	Шанхай	14,1	Шанхай	24,9
Пекин	11,1	Чэнду	14,1	Пекин	21,9
Баодин	10,6	Пекин	12,6	Чэнду	21,0
Чжоукоу	10,4	Баодин	11,6	Баодин	11,6

Примечание. Разработано на основе данных статистических ежегодников городов Китая.

Таблица 4

Распределение городов Китая по доле городского населения в 2000, 2010 и 2020 гг.

Table 4

Distribution of Chinese cities by the urban population share in 2000, 2010 and 2020

Классы городов по доле городского населения	Доля, %		
	2000 г.	2010 г.	2020 г.
Города с долей городского населения менее 50 %	89,8	62,6	18,7
Города с долей городского населения 50–75 %	8,7	30,9	64,7
Города с долей городского населения более 75 %	1,5	6,5	16,6

Примечание. Разработано на основе данных статистических ежегодников городов Китая.

Первый класс формируют города с долей городского населения менее 50 %, большую часть структуры которых занимает сельскохозяйственное население. В 2000 г. насчитывалось 238 таких городов. За 20 лет произошли кардинальные сдвиги как в процессе урбанизации, так и в степени урбанизированности городов и количество наименее урбанизированных городов сократилось в 4,4 раза – с 89,8 до 18,7 %. Географически города с долей городского населения менее 50 % (например, Линканг (35,1 %), Чжаотун (39,5 %), Хайдун (40,4 %)) приурочены преимущественно к западным и горным центрально-южным районам страны, Тибетскому АР. Ко второму классу отнесены города с долей городского населения 50–75 %. За 2000–2020 гг. их удельный вес возрос почти в 7,5 раза – с 8,7 до 64,7 %, и в настоящее время такие города преобладают. Они размещены по всей стране в связи с интенсивной урбанизацией в XXI в. Чрезвычайно важное значение придается городам третьего класса с долей городского населения более 75 %. В 2000 г. насчитывалось только 4 таких города (Ухай (95,4 %) в АР Внутренняя Монголия, Карамай (83,1 %) в Синьцзян-Уйгурском АР, Ичунь (85,1 %) в провинции Хэйлуцзян, Цзяюйгуань (94,4 %) в провинции Ганьсу), однако за 20 лет подходы к выделению городов, включая определение их площади, численности населения и административно-территориального статуса, были пересмотрены и удельный вес городов с долей городского населения более 75 % увеличился более чем в 15 раз – с 1,5 до 16,6 %. Сейчас в данный класс входит 48 городов (например, Пекин (87,6 %), Тяньцзинь (84,7 %), Шанхай (89,3 %) и др.). Следует отметить ключевую роль административного фактора в изменении структуры городов по степени урбанизированности. При этом третьей тенденцией городского расселения Китая выступает формирование неоднородных по природе сельско-городских континуумов на городских территориях.

Четвертой тенденцией городского расселения Китая является увеличение средней людности городов (на 8,5 %). В 2000 г. значение этого показателя составляло 4,8 млн человек, спустя 20 лет – 5,2 млн человек. Проведенные расчеты средней людности городов в разрезе классов городов по численности населения показали, что наибольший рост средней людности произошел в сверхкрупных и особо крупных

городах (на 13,3 и 6,2 % соответственно). К 2020 г. значение средней людности в особо крупных городах Китая приблизилось к 7 млн человек, а значение средней людности в сверхкрупных городах превысило 15 млн человек (табл. 5).

Таблица 5

Динамика средней людности городов Китая в 2000, 2010 и 2020 гг.

Table 5

Dynamics of the average population of Chinese cities in 2000, 2010 and 2020

Классы городов по численности населения	Средняя людность городов, млн чел.			Динамика средней людности городов, %
	2000 г.	2010 г.	2020 г.	
Малые города (менее 0,5 млн чел.)	0,30	0,38	0,33	10,0
Средние города (0,5–1,0 млн чел.)	0,86	0,80	0,73	–15,1
Крупные города (1,0–5,0 млн чел.)	2,95	2,89	2,91	–1,4
Особо крупные города (5,0–10,0 млн чел.)	6,58	6,81	6,99	6,2
Сверхкрупные города (более 10,0 млн чел.)	13,34	13,99	15,12	13,3

Примечание. Разработано на основе данных статистических ежегодников городов Китая.

Динамика средней людности городов в разрезе классов городов по численности населения различна. Положительная динамика свойственна малым городам, численность населения которых растет за счет миграции в них населения из сельской местности, а также особо крупным и сверхкрупным городам – своеобразным социально-экономическим магнитам, притягивающим трудовые ресурсы, инвестиции и др. Крупные города показывают незначительную отрицательную динамику, что в целом делает их самыми устойчивыми во внутренней структуре городского расселения. Наиболее масштабной отрицательной динамикой характеризуются средние города, которые занимают буферное положение. Средняя людность в городах этого класса сократилась на 15,4 %.

В анализе городского расселения важное место занимает плотность городского населения. Этот показатель играет ключевую роль при исследовании условий и качества жизни населения, степени загрязнения окружающей среды. В науке существует несколько методических подходов к оценке плотности городского населения. Первый подход заключается в понимании данного параметра как соотношения численности постоянного городского населения и площади города, второй подход – как соотношения численности постоянного городского населения и площади сплошной городской застройки¹⁰. Для определения зон сплошной городской застройки используются топографические карты и космические снимки, для выяснения численности их населения – статистические данные по минимально возможным административно-территориальным единицам. Применение спутниковых снимков позволяет установить максимально четкие фактические границы городских агломераций без включения в них сельских территорий. Из-за сложности соотнесения демографических данных и спутниковых изображений сведения о плотности городского населения следует воспринимать приблизительно. При этом средние величины плотности населения города или городской агломерации предполагают, что между реальными значениями плотности населения отдельных территорий, входящих в состав города или городской агломерации, могут наблюдаться серьезные различия¹¹.

Оценка плотности городского населения Китая с учетом данных о площади городов и численности городского населения за 2000–2020 гг. показала, что средняя плотность городского населения варьирует в пределах 420 человек на 1 км², она не претерпела существенных изменений и в настоящий момент оценивается как невысокая. За 20 лет во внутренней структуре городов произошел кардинальный сдвиг: в 3,5 раза увеличилось количество городов с чрезвычайно высокой плотностью городского населения (табл. 6). По данным переписи населения 2020 г., в Китае городом с самой высокой плотностью городского населения являлся Шанхай (3947,6 человека на 1 км²). Высокой плотностью городского населения характеризовались также Шэньчжэнь (2926,6 человека на 1 км²), Шаньтоу (2617,2 человека на 1 км²) и Гуанчжоу (2576,3 человека на 1 км²). Подобные расчеты нивелируют реальную плотность городского населения в зоне сплошной городской застройки.

¹⁰Demographia world urban areas (built up urban areas or world agglomerations). 19th annual edition. August 2023 [Electronic resource] // Demographia. URL: <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf> (date of access: 04.09.2023).

¹¹Ibid.

Таблица 6

Распределение городов Китая по плотности городского населения в 2000, 2010 и 2020 гг.

Table 6

Distribution of Chinese cities by urban population density in 2000, 2010 and 2020

Классы городов по плотности городского населения	Доля, %		
	2000 г.	2010 г.	2020 г.
Города с низкой плотностью городского населения (менее 300 чел. на 1 км ²)	44,4	44,4	50,2
Города со средней плотностью городского населения (300–500 чел. на 1 км ²)	20,5	19,7	17,1
Города с высокой плотностью городского населения (500–1000 чел. на 1 км ²)	33,2	31,7	25,7
Города с чрезвычайно высокой плотностью городского населения (более 1000 чел. на 1 км ²)	1,9	4,2	7,0

Примечание. Разработано на основе данных статистических ежегодников городов Китая.

Оценка плотности городского населения в зоне сплошной городской застройки показывает другие, более объективные результаты. Так, самыми густонаселенными городами в Китае являются Макао (23 263 человека на 1 км²), Гонконг (22 297 человек на 1 км²), Тунчэн (19 445 человек на 1 км²), Цаннань (10 412 человек на 1 км²), Шэньчжэнь (9834 человека на 1 км²), которые занимают 13, 18, 28, 150 и 165-е места в мире соответственно¹². Пятой тенденцией городского расселения Китая является рост плотности городского населения. Современные градостроители полагают, что города эффективнее функционируют при высокой плотности городского населения. Однако существуют другие факторы, такие как увеличение интенсивности пробок, когда не разрежается трафик и не сокращается количество парковочных мест. Города с высокой плотностью населения, как правило, отличаются большим удобством для пешеходов и имеют множество возможностей для транспортировки. Вместе с тем без разумного планирования города могут стать относительно неустойчивыми¹³.

Основу территориальной структуры города образует его опорный каркас как совокупность центрального города и радиальных транспортных магистралей. Он показывает направление развития городской агломерации и обеспечивает взаимодействие ее составляющих. Реальные границы городской агломерации определяются методом изохрон на основе оценки транспортной доступности центра агломерации, а количество и размеры опоясывающих его ближних и дальних городов-спутников зависят от сформированности системы городского расселения. Другой подход к установлению границ городских агломераций заключается в расчете зоны влияния города.

По зоне влияния 337 городов Китая были разделены на три класса (табл. 7). В период с 2000 по 2020 г. данный показатель отличался устойчивостью. Свыше 80 % городов характеризовались зоной влияния более 75 км. Сократилась доля городов с зоной влияния менее 50 км, увеличился практически в 2 раза удельный вес городов с зоной влияния 50–75 км. В 2020 г. выделялись 7 городов со сверхвысокой зоной влияния – более 150 км. В их число входят Чунцин (200,2 км), Шанхай (183,9 км), Пекин (176,2 км), Чэнду (173,7 км), Гуанчжоу (167,3 км), Шэньчжэнь (163,9 км) и Тяньцзинь (151,4 км).

Таблица 7

Распределение городов Китая по зоне влияния в 2000, 2010 и 2020 гг.

Table 7

Distribution of Chinese cities by influence zone in 2000, 2010 and 2020

Классы городов по зоне влияния	Доля, %		
	2000 г.	2010 г.	2020 г.
Города с зоной влияния менее 50 км	3,6	1,4	2,3
Города с зоной влияния 50–75 км	8,3	12,5	15,1
Города с зоной влияния более 75 км	88,1	86,0	82,6

Примечание. Разработано на основе данных статистических ежегодников городов Китая.

¹²Demographia world urban areas (built up urban areas or world agglomerations). 19th annual edition. August 2023 [Electronic resource] // Demographia. URL: <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf> (date of access: 04.09.2023).

¹³Berggren C. Urban density and sustainability [Electronic resource] // Smart Cities Dive. URL: <https://www.smartcitiesdive.com/ex/sustainablecitiescollective/urban-density-and-sustainability/241696/> (date of access: 04.09.2023).

Система городского расселения воздействует на социально-экономическое развитие страны. Поэтому в данном исследовании методом анализа в соответствии с законом Ципфа оценивается ее сформированность. Согласно правилу, если территория представляет собой целостный экономический район, численность населения города, входящего в состав городской агломерации, рассчитывается по формуле

$$N_r = \frac{N_1}{r},$$

где N_r – численность населения города ранга r ; N_1 – численность населения крупнейшего города территории, т. е. города ранга 1; r – ранг города.

Отклонения в системе распределения городов от идеальной схемы могут быть связаны с историей развития экономики страны и формирования ее пространства (колониальным статусом, объединением и распадом государств), природными условиями (рельефом, климатом), а также с ролью некоторых городов в глобальном и региональном расселении. По мере становления экономики, вовлечения в хозяйственный оборот удаленных районов и появления региональных полюсов роста система городского расселения начинает приближаться к идеальной схеме. Существует ряд работ, посвященных исследованию действия закона Ципфа в отношении городов Китая [13]. Углубленный анализ городского расселения Китая способствует пониманию модели городского развития и формулированию конкретных политических рекомендаций в этой области. Результаты, полученные методом дистанционного зондирования Земли с использованием данных о городском населении Китая за 1990–2010 гг., показали, что система городского расселения была относительно сбалансированной, практически соответствуя закону Ципфа [13].

На рис. 4 представлены результаты расчетов по правилу «ранг – размер» для 5 крупнейших городов Китая за 2000 и 2020 гг. Реальная кривая Ципфа, построенная по данным за 2020 г., располагается выше идеальной кривой. Такой тип городского расселения характеризуется высокой плотностью населения, насыщенностью страны городами, что свойственно государствам с длительной историей развития экономики. Это утверждение подкрепляется выводами, сделанными выше, и доказывает тезисы, выведенные ранее китайскими учеными для других периодов. В целом дискуссия о применимости закона Ципфа к материковой части территории Китая имеет большое значение, а на изменение городского расселения в стране во многом влияет политика [14].

Городское расселение Китая в XXI в. развивается очень динамично. Эксперты полагают, что тренды глобальной урбанизации напрямую связаны с урбанизацией Китая. Ядрами в каркасе городского расселения страны выступают городские агломерации. Китайские ученые сформулировали собственное определение понятия «городская агломерация», несколько отличающееся от классического представления о данном пространственном образовании. Так, по их мнению, городские агломерации – упорядоченная городская система, возникшая в ходе индустриализации и градоцентричного регионального развития. Города, входящие в состав городской агломерации, упорядочены в соответствии с четкой иерархией и выполняемыми ими функциями [7]. Качественно новый смысл вложили в определение понятия «городская агломерация» Чуанлинь Фанг и его коллеги, подразумевая под ним высокоинтегрированные группы городов и новую экономическую единицу международного географического разделения труда [9; 15]. Формирование городской агломерации означает для Китая высокий экономический и модернизационный уровень региона, который может принести огромную выгоду за счет эффекта масштаба.

В Китае территорию определяют как городскую агломерацию, если на ней имеется не менее 3 крупных городов с численностью населения от 20 млн человек (и в одном из них – ядре – проживает более 5 млн человек), ВВП на душу населения равняется свыше 10 тыс. долл. США, или около 72 тыс. юаней, несельскохозяйственное население составляет более 50 %, несельскохозяйственные отрасли превышают 70 % ВВП (на средней и поздней стадиях индустриализации и урбанизации), доля ВВП центрального города превосходит 45 % от общего ВВП городской агломерации, степень зависимости от экспорта достигает более 30 %, плотность экономического пространства составляет более 2,5 млрд долл. США на 1 км², или 18 млрд юаней на 1 км², а также если четко подтверждаются получасовой, часовой и двухчасовой радиусы транспортных экономических поясов [11].

Китай инвестировал как в финансовые, так и академические круги общества, чтобы способствовать постепенному формированию и росту городских агломераций, их превращению в глобальные экономические центры. В настоящее время в соответствии с приоритетами плана 13-й пятилетки национального экономического и социального развития Китая складывается иерархическая система городских агломераций, состоящая из 5 крупных городских агломераций национального уровня, 8 средних городских агломераций регионального уровня и 6 малых городских агломераций субрегионального уровня (табл. 8, рис. 5) [16].

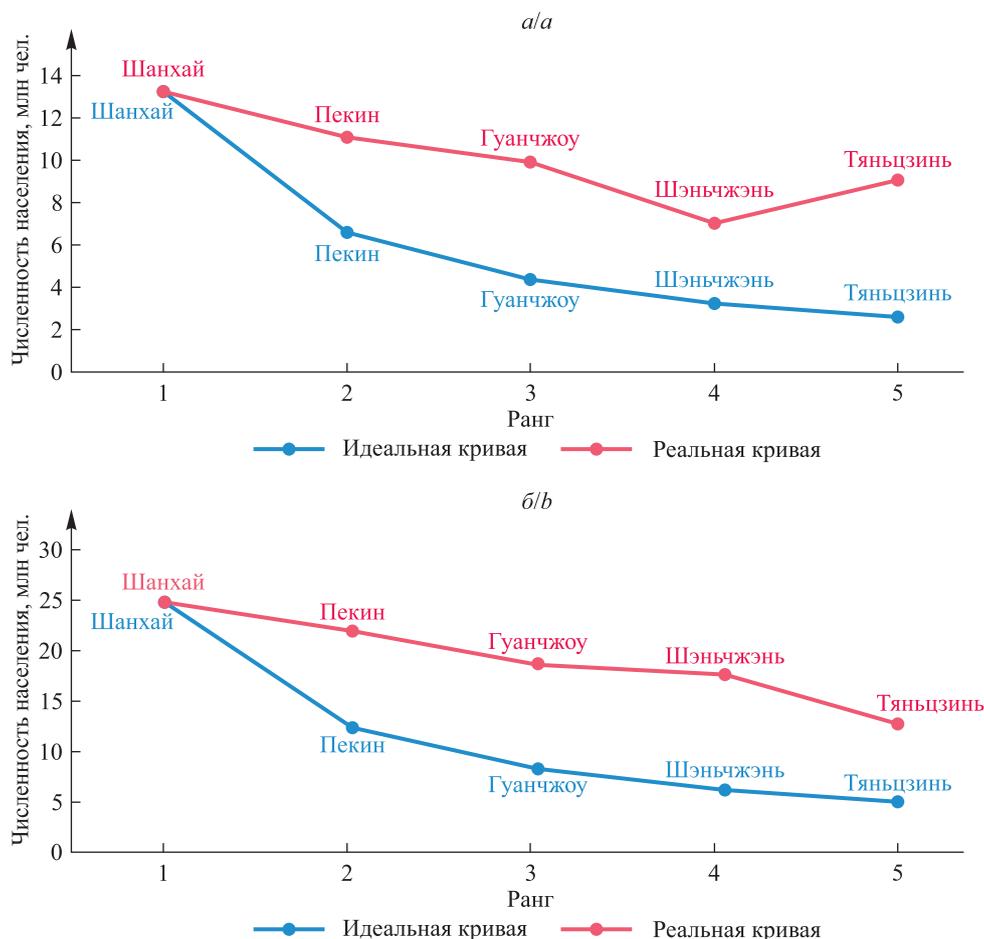


Рис. 4. Идеальная и реальная кривые Ципфа, построенные для крупнейших городов Китая:
а – по данным за 2000 г.; б – по данным за 2020 г.
(разработано на основе данных статистических ежегодников городов Китая)

Fig. 4. Ideal and real Zipf curve plotted for the largest Chinese cities:
а – according to data for 2000; б – according to data for 2020
(developed based on data from Chinese city statistical yearbooks)

Таблица 8

Городские агломерации Китая в 2020 г.

Table 8

Chinese urban agglomerations in 2020

Уровень	Название	Количество городов, ед.	Тип	Города-ядра	Численность населения, млн чел.
Крупные городские агломерации национального уровня	Дельта реки Янцзы	26	Полицентричный	Шанхай, Ханчжоу, Нанкин, Сучжоу	58,9
	Дельта Жемчужной реки	9	»	Шэньчжэнь, Гуанчжоу	36,4
	Чэнду – Чунцин	16	Моноцентричный	Чунцин	32,1
	Пекин – Тяньцзинь – Хэбэй	13	»	Пекин	21,9
	Среднее течение реки Янцзы	28	»	Ухань	12,3

Окончание табл. 8
 Ending of the table 8

Уровень	Название	Количество городов, ед.	Тип	Города-ядра	Численность населения, млн чел.
Средние городские агломерации регионального уровня	Западное побережье пролива	11	Полицентричный	Сямэнь, Фучжоу, Ганьчжоу, Вэньчжоу	32,1
	Полуостров Шаньдун	16	»	Циндао, Цзинань	19,4
	Харбин – Чанчунь	11	»	Чанчунь, Харбин	19,1
	Центральный и южный Ляонин	12	»	Шэньян, Далянь	16,5
	Равнина Гуаньчжун	10	Моноцентричный	Сиань	13,0
	Центральные равнины	13	»	Чжэнчжоу	12,6
	Залив Бейбу	11	»	Наньнин	8,6
	Северный склон гор Тянь-Шаня	6	»	Урумчи	4,1
Малые городские агломерации субрегионального уровня	Центральный Гуйчжоу	6	Полицентричный	Гуйян, Цзуньи	12,6
	Центральный Юньнань	5	Моноцентричный	Куньмин	8,5
	Хух-Хото – Баотоу – Ордос – Юйлинь	4	Полицентричный	Баотоу, Юйлинь	6,3
	Цзиньчжун	6	Моноцентричный	Тайюань	5,3
	Ланьчжоу – Синин	9	»	Ланьчжоу	4,4
	Нинся вдоль Желтой реки	4	Полицентричный	Иньчуань, Чжунвэй	3,9

Примечание. Разработано на основе данных публикации [16].

Крупные городские агломерации национального уровня находятся в центре внимания Национального плана урбанизации нового типа (2014–2020), средние городские агломерации регионального уровня требуют постоянного развития, а малые городские агломерации субрегионального уровня – тщательного планирования и руководства для эффективного управления и будущего роста. За последние 5 лет новая пространственная структура урбанизации и план роста городских агломераций обсуждались в различных научных и правительственных документах.

Будучи первой по величине экономикой в мире и самой населенной страной, Китай с его стратегией активного продвижения и развития городских агломераций дает четкий сигнал о том, что последние, вероятно, станут жизнеспособными элементами пространственной организации городов и основой городского развития страны.

Преобладающее количество городских агломераций сосредоточено на востоке страны и вдоль ее восточного побережья. Они представляют национальный и региональный уровни. Городские агломерации Китая различаются по ряду показателей, главные из которых – количество входящих в них городов, число городов-ядер и численность населения. Крупнейшими по количеству входящих в них городов являются городские агломерации национального уровня «Среднее течение реки Янцзы» (28 городов), «Дельта реки Янцзы» (26 городов), «Чэнду – Чунцин» (16 городов) и городская агломерация регионального уровня «Полуостров Шаньдун» (16 городов). По количеству городов-ядер в стране наблюдается относительный паритет между числом моноцентричных и полицентричных городских агломераций.

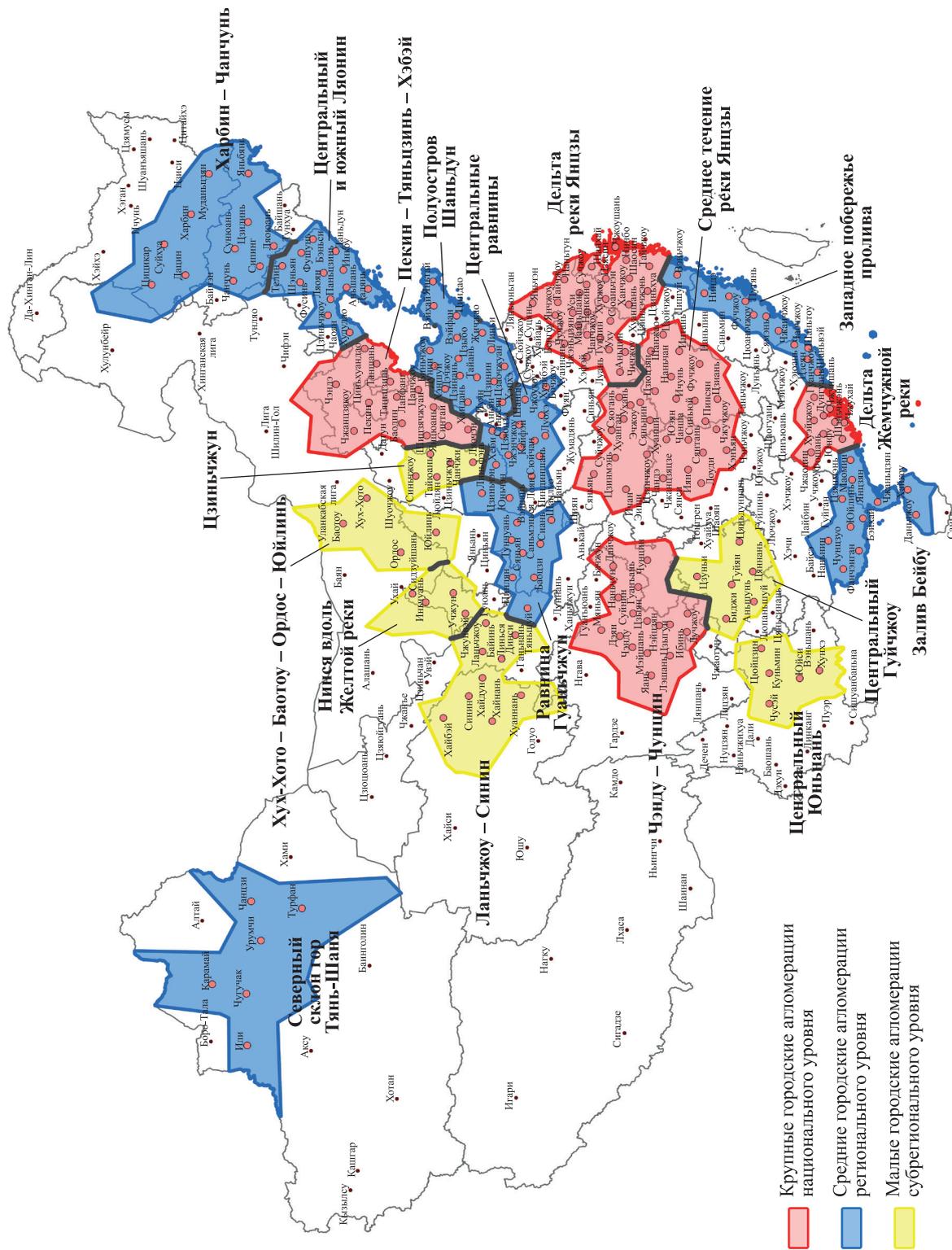


Рис. 5. Распределение городских агломераций Китая в 2020 г. (разработано на основе данных публикации [16])
 Fig. 5. Distribution of Chinese urban agglomerations in 2020 (developed based on data from publication [16])

Следует отметить, что городские агломерации Китая значительно разнятся по численности населения. Между самой крупной городской агломерацией «Дельта реки Янцзы» (58,9 млн человек) и самой малой городской агломерацией «Нинся вдоль Желтой реки» (3,9 млн человек) существует разрыв почти в 15 раз. Наибольшей численностью населения отличаются крупные городские агломерации национального уровня и некоторые малые городские агломерации регионального уровня. В целом различия по численности населения и количеству городов, входящих в состав городских агломераций, свидетельствуют о стадийности их формирования и разных государственных механизмах развития. В связи с этим актуальность приобретают экономико-географические исследования городских агломераций Китая, направленные на комплексный анализ демографо-социально-экономических характеристик и особенностей их пространственно-функционального развития.

Выводы

Географический анализ городского расселения Китая за 2000–2020 гг. в разрезе 337 городов пяти уровней в соответствии с классификацией деловой привлекательности городов *YiCai* и 19 городских агломераций позволил получить следующие результаты. Во-первых, отличительной особенностью китайских подходов к выделению города является отнесение к нему наряду с центральным городом прилегающих районов, включающих как сельскую местность, так и административно-территориальные единицы более низкого ранга. Во-вторых, в зависимости от расположения городов по высоте над уровнем моря в Китае преобладает равнинный тип городского расселения и выделяются восточный прибрежный крупноселенный меридиональный пояс городского расселения, восточный континентальный среднеселенный меридиональный пояс городского расселения, центральный мелкоселенный меридиональный пояс городского расселения и западный мелкоселенный меридиональный пояс рассредоточенного городского расселения. В-третьих, внутренняя структура городского расселения в разрезе пяти классов городов по людности характеризуется макрополизацией и ростом средней людности городов. Динамика средней людности городов в разрезе классов городов по численности населения различна. Положительная динамика свойственна малым, особо крупным и сверхкрупным городам. Крупные города показывают незначительную отрицательную динамику, которая в целом делает их наиболее устойчивыми во внутренней структуре городского расселения. Наиболее масштабной отрицательной динамикой характеризуются средние города. В-четвертых, в Китае происходит рост плотности городского населения. В ряде городов плотность населения в зоне сплошной застройки превышает 10 тыс. человек на 1 км², поэтому рост этого показателя не должен создавать риски для устойчивого развития города. В-пятых, зоны влияния городов Китая дифференцированы по классам, данный показатель увеличивается. Более 80 % городов Китая имеют зону влияния более 75 км, а отдельные города характеризуются зоной влияния более 150 км. В-шестых, в Китае сформировались национальные представления о городской агломерации как об упорядоченной городской системе, возникшей в ходе индустриализации и градоцентричного регионального развития. Городские агломерации представляют собой высокоинтегрированные группы городов и новую экономическую единицу международного географического разделения труда. Среди 19 городских агломераций, формирующихся в соответствии с Национальным планом урбанизации нового типа (2014–2020), выделяются крупные городские агломерации национального уровня, средние городские агломерации регионального уровня и малые городские агломерации субрегионального уровня. По количеству городов-ядер в стране наблюдается относительный паритет между числом моноцентричных и полицентричных городских агломераций. Регионами роста агломераций являются восточная и центральная части Китая. В-седьмых, система городского расселения Китая относительно сбалансированна, она практически соответствует закону Ципфа, на нее во многом влияет государственная политика. Существенные различия в численности населения и количестве городов, входящих в состав городских агломераций, выступают основанием для их дальнейшего глубокого изучения в целях разработки дифференцированных дорожных карт развития.

Библиографические ссылки

1. Антипова ЕА, Ли Чэнь. Территориальная дифференциация демографического старения населения Китая в XXI в. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2023;1:3–18. DOI: 10.33581/2521-6740-2023-1-3-18.
2. Антипова ЕА, Ян Лю. Систематизация научных взглядов в Китае на изучение урбанизации. *Региональные исследования*. 2023;2:79–89. DOI: 10.5922/1994-5280-2023-2-7.
3. Cattaneo A, Adukia A, Brown DL, Christiaensen L, Evans DK, Haakenstad A, et al. Economic and social development along the urban-rural continuum: new opportunities to inform policy. *World Development*. 2022;157:105941. DOI: 10.1016/j.worlddev.2022.105941.
4. Wei Pan, Jing Wang, Yurui Li, Shuting Chen, Zhi Lu. Spatial pattern of urban-rural integration in China and the impact of geography. *Geography and Sustainability*. 2023;4(4):404–413. DOI: 10.1016/j.geosus.2023.08.001.

5. Yansui Liu. *Urban-rural transformation geography*. Singapore: Springer Singapore; 2021. Geographical basis and theoretical analysis of urban-rural transformation; p. 67–116 (Sustainable development goals series). DOI: 10.1007/978-981-16-4835-9_3.
6. Soong Chiatai. Research method on regional economic-geographic foundation of city development. *Acta Geographica Sinica*. 1980;35(4):277–287. DOI: 10.11821/xb198004001.
7. Cui Gonghao. *Study on China's urban and township development*. Beijing: Chinese Construction Industry Press; 1992. 162 p.
8. Fang Chuanglin, Guan Xingliang. Comprehensive measurement and spatial distinction of input-output efficiency of urban agglomerations in China. *Acta Geographica Sinica*. 2011;66(8):1011–1022. DOI: 10.11821/xb201108001.
9. Chuanglin Fang, Danlin Yu. Urban agglomeration: an evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*. 2017;162:126–136. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.02.014.
10. Chen Yanguang. On the urbanization curves: types, stages, and research methods. *Scientia Geographica Sinica*. 2012;32(1):12–17. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.01.12.
11. Chuanglin Fang, Danlin Yu. *China's new urbanization: developmental paths, blueprints and patterns*. Beijing: Science Press; 2016. 344 p. (Springer geography series). Co-published by the «Springer». DOI: 10.1007/978-3-662-49448-6.
12. Chuanglin Fang, Danlin Yu. *China's urban agglomerations*. Beijing: Science Press; 2020. 265 p. (Springer geography series). Co-published by the «Springer».
13. Yizhen Wu, Mingyue Jiang, Zhijian Chang, Yuanqing Li, Kaifang Shi. Does China's urban development satisfy Zipf's law? A multiscale perspective from the NPP-VIIRS nighttime light data. *International Journal of Environment Research and Public Health*. 2020;17(4):1460. DOI: 10.3390/ijerph17041460.
14. Sun Xiangdong, Yuan Ouyang, Xu Zhao, Yin Yanhui, Liu Qian, Wu Ling. Did Zipf's law hold for Chinese cities and why? Evidence from multi-source data. *Land Use Policy*. 2021;106:105460. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105460.
15. Fang Chuanglin, Song Jitao, Zhang Qiang, Li Ming. The formation, development and spatial heterogeneity patterns for the structures system of urban agglomerations in China. *Acta Geographica Sinica*. 2005;60(5):827–840. DOI: 10.11821/xb200505014.
16. 段志成. 中国城市群环境能力分类与演化研究. 技术与企业发展. 2021;10:13–16 = Дуань Чжичэн. Исследование классификации и эволюции экологических возможностей китайских городских агломераций. *Технологии и развитие предпринимательства*. 2021;10:13–16.

References

1. Antipova EA, Li Chen. Territorial differentiation of China's demographic ageing in the 21st century. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2023;1:3–18. Russian. DOI: 10.33581/2521-6740-2023-1-3-18.
2. Antipova EA, Yang Liu. Systematizing views on urbanization studies in China. *Regional'nye issledovaniya*. 2023;2:79–89. Russian. DOI: 10.5922/1994-5280-2023-2-7.
3. Cattaneo A, Adukia A, Brown DL, Christiaensen L, Evans DK, Haakenstad A, et al. Economic and social development along the urban-rural continuum: new opportunities to inform policy. *World Development*. 2022;157:105941. DOI: 10.1016/j.worlddev.2022.105941.
4. Wei Pan, Jing Wang, Yurui Li, Shuting Chen, Zhi Lu. Spatial pattern of urban-rural integration in China and the impact of geography. *Geography and Sustainability*. 2023;4(4):404–413. DOI: 10.1016/j.geosus.2023.08.001.
5. Yansui Liu. *Urban-rural transformation geography*. Singapore: Springer Singapore; 2021. Geographical basis and theoretical analysis of urban-rural transformation; p. 67–116 (Sustainable development goals series). DOI: 10.1007/978-981-16-4835-9_3.
6. Soong Chiatai. Research method on regional economic-geographic foundation of city development. *Acta Geographica Sinica*. 1980;35(4):277–287. DOI: 10.11821/xb198004001.
7. Cui Gonghao. *Study on China's urban and township development*. Beijing: Chinese Construction Industry Press; 1992. 162 p.
8. Fang Chuanglin, Guan Xingliang. Comprehensive measurement and spatial distinction of input-output efficiency of urban agglomerations in China. *Acta Geographica Sinica*. 2011;66(8):1011–1022. DOI: 10.11821/xb201108001.
9. Chuanglin Fang, Danlin Yu. Urban agglomeration: an evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*. 2017;162:126–136. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.02.014.
10. Chen Yanguang. On the urbanization curves: types, stages, and research methods. *Scientia Geographica Sinica*. 2012;32(1):12–17. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.01.12.
11. Chuanglin Fang, Danlin Yu. *China's new urbanization developmental paths, blueprints and patterns*. Beijing: Science Press; 2016. 344 p. (Springer geography series). Co-published by the «Springer». DOI: 10.1007/978-3-662-49448-6.
12. Chuanglin Fang, Danlin Yu. *China's urban agglomerations*. Beijing: Science Press; 2020. 265 p. (Springer geography series). Co-published by the «Springer».
13. Yizhen Wu, Mingyue Jiang, Zhijian Chang, Yuanqing Li, Kaifang Shi. Does China's urban development satisfy Zipf's law? A multiscale perspective from the NPP-VIIRS nighttime light data. *International Journal of Environment Research and Public Health*. 2020;17(4):1460. DOI: 10.3390/ijerph17041460.
14. Sun Xiangdong, Yuan Ouyang, Xu Zhao, Yin Yanhui, Liu Qian, Wu Ling. Did Zipf's law hold for Chinese cities and why? Evidence from multi-source data. *Land Use Policy*. 2021;106:105460. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105460.
15. Fang Chuanglin, Song Jitao, Zhang Qiang, Li Ming. The formation, development and spatial heterogeneity patterns for the structures system of urban agglomerations in China. *Acta Geographica Sinica*. 2005;60(5):827–840. DOI: 10.11821/xb200505014.
16. Duan Zhicheng. [A study of the classification and evolution of environmental capabilities of Chinese urban agglomerations]. *Jishu yu qiye fazhan*. 2021;10:13–16. Chinese.

Получена 16.12.2023 / исправлена 11.02.2024 / принята 22.02.2024.
Received 16.12.2023 / revised 11.02.2024 / accepted 22.02.2024.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ И ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В РАЙОНЕ ХОТИСЛАВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕЛА И СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЕСКОВ

А. Н. ВИТЧЕНКО¹⁾, Д. А. ШПАКОВА²⁾

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

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

Аннотация. На основе данных мониторинга поверхностных и подземных вод, проводившегося в 2010–2021 гг. в районе Хотиславского месторождения мела и строительных песков, исследованы пространственно-временные тренды их главных гидрогеологических и гидрохимических характеристик. С использованием методов математической статистики, пространственно-временного анализа гидрогеологических и гидрохимических данных, географической систематизации, сравнительно-географического и картографического методов получен ряд новых научно-практических результатов. Тренды уровня поверхностных вод выше карьера и в компенсационном канале в течение исследуемого периода положительные. Они имеют выраженный подъем, что указывает на отсутствие существенных негативных явлений на этих участках водных объектов. Ниже карьера отмечается обратная тенденция, обусловленная последствиями ежегодного регулирования стока р. Риты с частичным опорожнением мелиоративных каналов. Анализ данных о загрязнении поверхностных вод в створах водомерных постов позволяет заключить, что состояние поверхностных вод р. Риты в фоновом створе соответствует общим тенденциям формирования качества речных вод в бассейне р. Мухавец, но отличается более высоким содержанием аммоний-ионов, общего железа, марганца и цинка. Изменения уровня грунтовых и напорных вод в 2010–2021 гг. в районе карьера определялись в основном сезонными вариациями климатических явлений. Его колебания в пунктах наблюдений синхронны. Они коррелируют с тенденциями фоновых изменений. Графоаналитическая интерпретация условий изменения качества грунтовых и напорных вод в районе карьера и анализ их солевого состава указывают на формирование этих вод преимущественно за счет природных факторов. Эксплуатация Хотиславского месторождения мела и строительных песков осуществляется в комплексе с эффективными защитными водоохранными мероприятиями. Наблюдения за колебаниями режима поверхностных и подземных вод с установленной частотой позволяют иметь достоверные данные об изменении их уровня и качества, контролировать воздействие карьера на окружающую среду.

Ключевые слова: гидрогеологическая и гидрохимическая ситуация; месторождение мела и строительных песков; мониторинг окружающей среды; поверхностные и подземные воды; водомерный пост; наблюдательная скважина; компенсационный канал.

Образец цитирования:

Витченко АН, Шпакова ДА. Пространственно-временные особенности гидрогеологической и гидрохимической ситуации в районе Хотиславского месторождения мела и строительных песков. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;1:21–36.
EDN: VAGHMI

For citation:

Vitchanka AN, Shpakova DA. Spatial-temporal features of hydrogeological and hydrochemical situation in the area of Khotislavskoye deposit of chalk and construction sands. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024; 1:21–36. Russian.
EDN: VAGHMI

Авторы:

Александр Николаевич Витченко – доктор географических наук, профессор; профессор кафедры географической экологии факультета географии и геоинформатики.
Дарья Александровна Шпакова – младший научный сотрудник отдела гидрологических исследований.

Authors:

Alexander N. Vitchanka, doctor of science (geography), full professor; professor at the department of geographical ecology, faculty of geography and geoinformatics.
dr.vitchenko@rambler.ru
<http://orcid.org/0000-0003-0409-6479>
Daria A. Shpakova, junior researcher at the department of hydroecological research.
darja.shpakova@mail.ru

SPATIAL-TEMPORAL FEATURES OF HYDROGEOLOGICAL AND HYDROCHEMICAL SITUATION IN THE AREA OF KHOTISLAVSKOYE DEPOSIT OF CHALK AND CONSTRUCTION SANDS

A. N. VITCHANKA^a, D. A. SHPAKOVA^b

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

^bCentral Research Institute for Comprehensive Use of Water Resources,
1 Slavinskaga Street, 2 building, Minsk 220086, Belarus

Corresponding author: A. N. Vitchanka (dr.vitchenko@rambler.ru)

Abstract. Based on surface and underground waters monitoring data conducted in 2010–2021 in the area of Khotislavskoye deposit of chalk and construction sands, an analysis of the spatial-temporal trends of their main hydrogeological and hydrochemical characteristics was carried out. Using the methods of mathematical statistics, spatial-temporal analysis of hydrogeological and hydrochemical data, geographic systematisation, comparative geographic and cartographic methods, a number of new scientific and practical results were obtained. Trends in the surface waters level above the quarry and in the compensation canal during the study period are positive and have a pronounced rise, which indicates the absence of significant negative phenomena in these areas of water bodies. Below the quarry, a reverse trend is observed, which is due to the consequences of the annual regulation of the flow Rita River with partial emptying of reclamation canals. Analysis of data on surface waters pollution at water metering stations allows to conclude that the nature of the state of the surface waters of the Rita River in the background section corresponds to the general trends in the formation of river water quality in the basin of the Mukhavets River, but has a higher background content of ammonium ions, total iron, manganese, and zinc. Changes in ground and pressure waters levels in 2010–2021 in the quarry area were mainly determined by seasonal variations in climatic phenomena. Its fluctuations at observation points are synchronous and correspond to the trends of background changes. Graphic-analytical interpretation of the conditions for changes in quality and analysis of the salt composition of ground and pressure waters in the quarry area indicate their formation mainly due to natural factors. The operation of the Khotislavskoye deposit of chalk and construction sands is carried out in conjunction with effective protective water protection measures. Observations of changes in the regime of surface and underground waters with a set frequency allow to have reliable data on changes in their level and quality, to monitor the impact of the quarry on the environment.

Keywords: hydrogeological and hydrochemical situation; deposits of chalk and construction sands; environmental monitoring; surface and underground waters; water metering station; observation well; compensation canal.

Введение

Эксплуатация месторождения мела и строительных песков влияет на поверхностные и подземные водные объекты, а также на системы местного водоснабжения населения. Изменение водного режима в районе месторождения является наиболее существенным фактором, оказывающим негативное воздействие на природную среду прилегающих к нему территорий. Уровень поверхностных и подземных вод имеет ключевое значение при планировании и обеспечении водоснабжения. Изучение уровня воды позволяет определить ее объемы, доступные для использования, и оценить устойчивость водных объектов в долгосрочной перспективе. Анализ гидрологических циклов, потоков и особенностей взаимодействия между поверхностными и подземными водами помогает установить места размещения водозаборных скважин и запланировать инфраструктуру водоснабжения. Исследование химического состава поверхностных и подземных вод лежит в основе эффективного управления водными ресурсами, способствует выяснению потребностей в обработке и очистке воды, созданию мер по защите и восстановлению водных экосистем, а также прогнозированию возможных проблем, связанных с изменением химического состава воды. Мониторинг поверхностных и подземных вод позволяет определить качество воды, включая содержание в ней различных веществ, таких как минералы, тяжелые металлы, органические соединения и другие загрязнители, выявить степень воздействия антропогенной деятельности, климатических изменений и иных факторов на водные экосистемы и предпринять необходимые меры по устранению или смягчению их негативных последствий.

Проблема пространственно-временной оценки гидрогеологической и гидрохимической ситуации, а также прогнозирования режима поверхностных и подземных вод вблизи месторождения полезных ископаемых изучена недостаточно. Обзор зарубежной и отечественной литературы показывает, что особое внимание при пространственно-временной оценке гидроэкологической ситуации уделяется гидрохимическому состоянию водных объектов. Так, работы [1–3] посвящены в основном исследованию

формирования состава поверхностных вод при хозяйственной деятельности по различным химическим показателям, мониторингу их геоэкологической защищенности по геохимическому признаку, разработке методов прогнозирования химического состава этих вод. В статье [4] выполнен сравнительный анализ загрязнения подземных вод исходя из концентрации в них загрязняющих ингредиентов – нитратов и аммонийного азота, определено состояние подземных вод в соответствии с суммарным показателем загрязнения. В публикации [5] очерчен методический подход к оценке гидроэкологического состояния бассейна малой реки, предложен алгоритм расчета интегральных показателей, характеризующих состояние водосбора. Работы [1–5] являются хорошей основой для описания качества воды поверхностных и подземных водных объектов, однако математические расчеты невозможно применить к нашим исследованиям, так как они базируются на ряде массивов специализированных данных. Применительно к Хотиславскому месторождению мела и строительных песков имеются только ежегодные сведения о химическом состоянии поверхностных и подземных вод в пунктах наблюдений, которых недостаточно для комплексных математических расчетов. В диссертации М. Кереза оценивается загрязнение рек бассейна р. Чу различными химическими элементами, рассматриваются динамика и пространственные закономерности природного и антропогенного загрязнения речных вод, проводится районирование территории по степени их загрязнения¹. В работе [6] изучены главные источники формирования химического состава речных вод Восточного Донбасса, осуществлен мониторинг их качества и обрисовано влияние реструктуризации угольной промышленности на современную гидроэкологическую ситуацию. Качество вод измерялось с помощью индекса загрязненности вод и удельного комбинаторного индекса загрязненности вод. В публикации [7] исследованы химические показатели качества воды водоема Косичи, образованного в результате разработки песчаного карьера, приведены гидроморфологические характеристики карьера, установлен уровень экологического состояния этого водоема на основе расчета индекса загрязненности вод. В статье [8] качество водных объектов бассейна р. Малый Салгир также оценивалось исходя из индекса загрязненности вод.

Режим подземных вод рассматривается в работе [9], в которой приведены общие положения их экологического состояния. В материале [10] изучены закономерности пространственно-временных колебаний уровня грунтовых вод (УГВ). Для оценки изменений УГВ выполнен комплексный анализ статистической структуры временных рядов данных за годовые и месячные интервалы. Для выявления циклов колебаний УГВ и специфики их трансформации использовался метод спектрально-временного анализа. В статье [11] поднята проблема, связанная с влиянием подземных вод на наземные и подземные горные выработки во время эксплуатации и рекультивации месторождений, однако основное внимание уделяется теоретическим и практическим аспектам применения методов инженерной сейсморазведки в целях изучения гидрогеологического режима горных выработок. В монографии [12] описано математическое обеспечение, предназначенное для региональной оценки сокращения речного стока исходя из аналитических зависимостей, а также для экологической оценки последствий эксплуатации подземных вод. В публикации [13] предложена математическая модель измерения уровня подземных вод месторождения цементного сырья. В исследованиях [9–13] при математическом моделировании гидроэкологических процессов используются сложные системы уравнений, требующие больших массивов данных. В работах [14–16] приведены альтернативные, более простые статистические методы прогнозирования режима поверхностных и подземных вод, такие как регрессионный анализ, анализ трендов и экстраполяция данных. При дальнейшей эксплуатации Хотиславского месторождения мела и строительных песков для контроля состояния поверхностных и подземных вод и прогнозирования возможного изменения их режима и качества необходима пространственно-временная оценка гидрогеологической и гидрохимической экологической ситуации в районе месторождения, которая позволит повысить эффективность управления водными ресурсами и осуществления природоохранных мероприятий.

Материалы и методы исследования

Хотиславское месторождение мела и строительных песков расположено в Малоритском районе Брестской области, в южной части бассейна р. Мухавец. Оно разведано на общей площади около 120 га. Балансовые запасы мела и строительных песков (полезных ископаемых промышленной категории, доступных к открытой разработке) составляют 116,8 млн т и 93,3 млн м³ соответственно. Техничко-экономические расчеты отработки месторождения выполнены в 1991 г. Для достижения экологически безопасной эксплуатации месторождения было принято решение о его поэтапной разработке, чтобы на начальных этапах освоения отточить технологию применения природоохранных мероприятий и оценить их эффективность. В настоящее время освоение месторождения осуществляется по проекту второй очереди. По состоянию на

¹Керез М. Современное состояние и оценка гидроэкологической ситуации бассейна реки Чу : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.36. Бишкек, 2009. 26 с.

декабрь 2021 г. общая площадь карьера по вскрытому песку составила 28,6 га, средняя глубина отработки по мелу – около 17 м. Добыча полезных ископаемых производится под прикрытием карьерного водоотлива. В декабре 2021 г. общий объем водоотлива достиг 5125,6 тыс. м³ (или 14,04 тыс. м³ в сутки). Общий объем карьерного водоотлива в 2018 г. (до начала добычи мела) равнялся 4601,2 тыс. м³ (или 12,6 тыс. м³ в сутки), а в 2021 г. – 4730,8 тыс. м³ (или 13,36 тыс. м³ в сутки). Следовательно, прирост объемов карьерного водоотлива в 2021 г. составил 5,1 %.

В исследовании использованы данные мониторинга поверхностных и подземных вод, проводившегося в 2010–2021 гг. в районе Хотиславского месторождения мела и строительных песков². Мониторинг поверхностных вод на прилегающей к карьере территории предполагал комплекс гидрометрических наблюдений в контрольных створах поверхностных водных объектов, в том числе наблюдения за уровнем воды в р. Рите и компенсационном канале, отбор и химический анализ проб воды из р. Риты и отводящего канала. Гидрометрические наблюдения осуществлялись на водомерных постах (ВП): ВП-1, расположенном на компенсационном канале; ВП-2 (контрольном фоновом створе выше карьера), размещенном на р. Рите в створе открытого шлюза-регулятора мелиоративной системы «Вир» на пересечении автодороги д. Сушитница – д. Отчин; ВП-3 (контрольном створе ниже карьера), находящемся на р. Рите в створе открытого шлюза-регулятора мелиоративной системы «Сушитница» на пересечении р. Риты с автодорогой д. Хотислав – д. Сушитница (рис. 1).

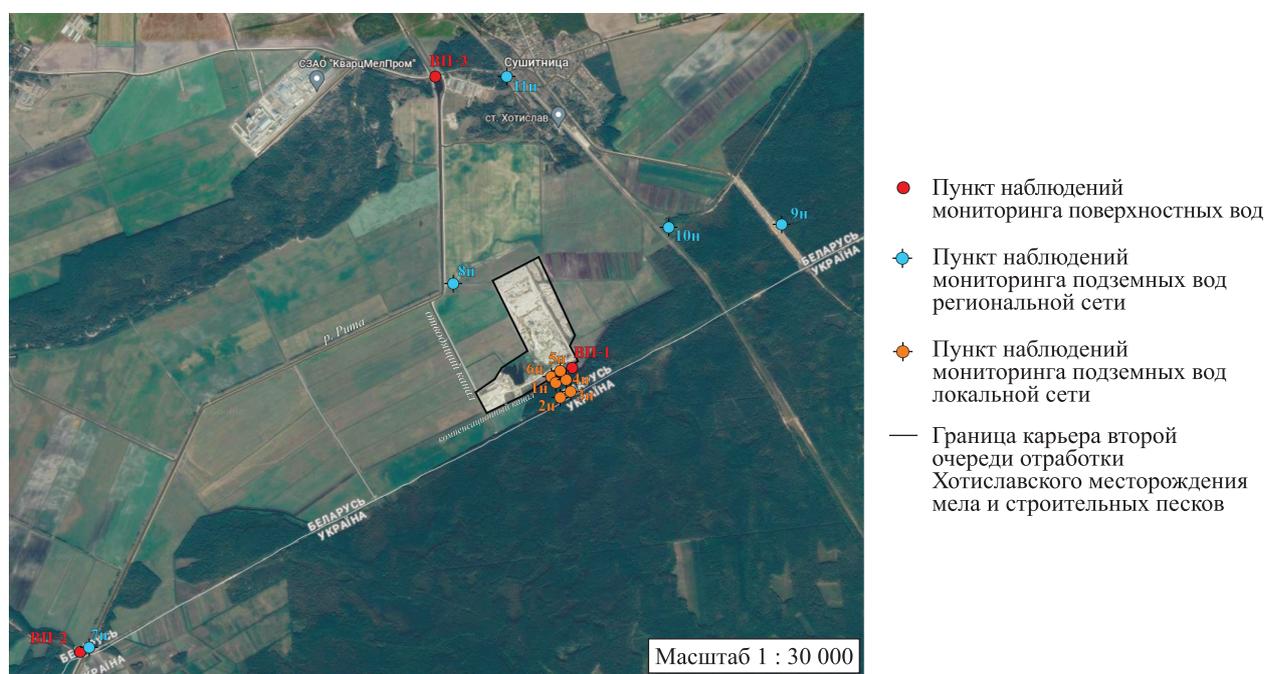


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений мониторинга поверхностных и подземных вод в районе карьера второй очереди отработки Хотиславского месторождения мела и строительных песков

Fig. 1. Layout of observation points for monitoring surface and underground waters in the area of the quarry of the second stage of development of the Khotislavskoye deposit of chalk and construction sands

В районе Хотиславского месторождения мела и строительных песков р. Рита является водоприемником дренажного стока мелиоративных систем «Вир», «Сушитница» и «Гутянская». Регулирование стока осуществляется водоподпорными гидротехническими сооружениями (тип открытых шлюзов-регуляторов) на всем протяжении русла реки. Компенсационный и отводящий каналы расположены к югу и юго-западу от карьера на расстоянии около 100 м. По ним происходит отведение карьерных и очищенных сточных вод от системы обогащения полезных ископаемых в р. Рите. Сеть пунктов наблюдений мониторинга подземных вод в пределах зоны возможного воздействия, прилегающей к белорусскому участку месторождения, состоит из двух частей – локальной и региональной. Локальная сеть размещена между карьером второй очереди отработки месторождения и государственной границей Беларуси и Украины и предназначена для наблюдений за эффективностью применения водоохраных мероприятий по локализации возможного снижения уровней подземных вод на данном участке. Здесь на безнапорном водоносном горизонте грунтовых вод оборудованы четыре наблюдательные скважины

²Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nsmos.by/> (дата обращения: 24.01.2024).

глубиной 13–15 м (контрольные скважины 1н, 4н, 5н, фоновая скважина 2н), на напорном водоносном горизонте верхнемеловых отложений – две наблюдательные скважины глубиной 30 м (фоновая скважина 3н, контрольная скважина 6н). Региональная сеть распределена по периферии карьера на удалении 0,6–4,2 км от него и предусмотрена для наблюдений за состоянием грунтовых вод, которые формируются в пределах территории, не подверженной воздействию второй очереди отработки Хотиславского месторождения мела и строительных песков. Она включает контрольные наблюдательные скважины 7н–10н, оборудованные на безнапорном водоносном горизонте грунтовых вод глубиной 13–15 м, и шахтный колодец 11н, который находится в д. Сушитнице по адресу ул. Железнодорожная, 7.

Мониторинг состояния подземных вод в зоне возможного воздействия проведен за период с 2010 по 2021 г. в сравнении с фоновыми характеристиками и региональными особенностями их естественного формирования в бассейнах рек Риты и Мухавец³, принятыми в качестве контрольных. Измерения УГВ осуществлялись 1 раз в 10 дней в пунктах наблюдений локальной сети и 1 раз в месяц в пунктах наблюдений региональной сети. Отбор и химический анализ проб подземных вод выполнялись ежегодно в пунктах наблюдений локальной и региональной сетей. При проведении исследований и обработке полученных данных были использованы методы гидрогеологического и гидрохимического анализа и математической статистики.

Результаты и их обсуждение

В районе отработки Хотиславского месторождения мела и строительных песков расположен один компенсационный (инфильтрационный) канал. Механизм действия компенсационной системы основан на создании водами карьерного водоотлива, фильтрующимися через ложе каналов, подпора движению потока подземных вод за счет формирования купола подъема их уровней, снижения скоростей фильтрации и повышения УГВ в направлении водоразделов. Анализ режима поверхностных вод показывает, что в 2021 г. уровень воды в компенсационном канале определялся в основном сезонными климатическими явлениями. Максимальные уровни воды характерны для периода весеннего половодья, минимальные уровни воды – для периода с июня по сентябрь. Абсолютный максимум уровня воды за период наблюдений был зафиксирован 21 февраля 2017 г. и равнялся 157,96 м по Балтийской системе высот (далее – мБС), а абсолютный минимум уровня воды зарегистрирован 10 декабря 2012 г. и 20 сентября 2013 г. и достиг 156,54 мБС. График колебаний среднегодовых уровней воды в компенсационном канале по данным за 2011–2021 гг. приведен на рис. 2. Абсолютная амплитуда колебания уровня воды составила 1,42 м, среднемноголетняя амплитуда колебания уровня воды – 0,98 м. Для оценки закономерностей изменения режима уровня воды применен трендовый анализ. Линия тренда имеет выраженную положительную тенденцию. Характерные уровни воды в компенсационном канале за 2011–2021 гг. представлены в табл. 1.

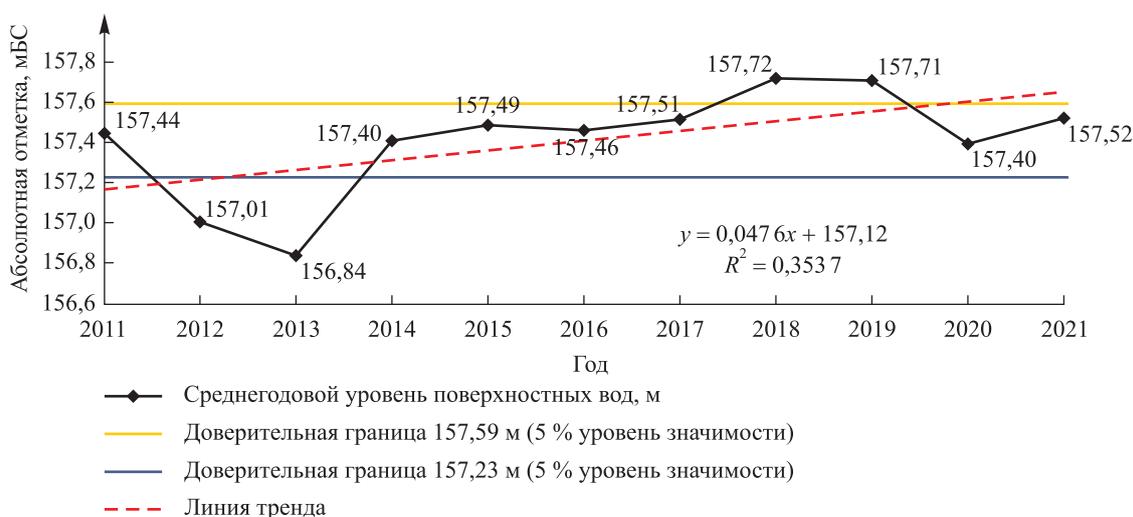


Рис. 2. График колебаний среднегодовых уровней воды в пункте наблюдений мониторинга поверхностных вод ВП-1 (компенсационном канале) по данным за 2011–2021 гг.

Fig. 2. Graph of fluctuations in average annual water levels at the observation point for monitoring surface waters «Water metering station – 1» (compensation canal) based on data for 2011–2021

³Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nsmos.by/> (дата обращения: 24.01.2024).

Таблица 1

Уровни воды в пункте наблюдений мониторинга
поверхностных вод ВП-1 (компенсационном канале)
относительно нуля графика (158,45 мБС) по данным за 2011–2021 гг.

Table 1

Water levels at the observation point for monitoring surface waters
«Water metering station – 1» (compensation canal) relative to the zero
of the graph (158.45 meters according to the Baltic height system) based on data for 2011–2021

Год	Максимальный уровень воды в период весеннего половодья		Минимальный уровень воды в период летне-осенней межени		Минимальный уровень воды в период зимней межени	
	Высота, м	Дата	Высота, м	Дата	Высота, м	Дата
2011	0,71	2 февраля	0,73	10 октября	0,71	30 декабря
2012	0,68	29 марта	1,26	20 сентября	1,40	10 декабря
2013	0,66	31 мая	1,40	20 сентября	1,86	31 декабря
2014	0,88	10 июня	1,01	10 октября	1,90	11 января
2015	0,88	30 апреля	1,12	31 августа	1,04	11 марта
2016	0,80	20 февраля	1,36	20 сентября	0,95	11 декабря
2017	0,58	31 марта	1,74	11 сентября	1,37	10 ноября
2018	0,67	20 февраля	0,84	11 июля	0,75	11 декабря
2019	0,70	21 мая	0,90	20 октября	1,03	20 декабря
2020	0,97	20 марта	1,23	10 июня	1,08	17 декабря
2021	0,86	19 марта	0,88	8 июня	1,10	21 января

Примечание. Диапазон максимальных уровней воды в период весеннего половодья составляет 0,58–0,97 м, диапазон минимальных уровней воды в период летне-осенней межени – 0,73–1,40 м, в период зимней межени – 0,71–1,90 м; сумма максимальных уровней воды в период весеннего половодья равняется 8,39 м, сумма минимальных уровней воды в период летне-осенней межени – 12,47 м, в период зимней межени – 13,19 м; среднее значение максимальных уровней воды в период весеннего половодья достигает 0,76 м, среднее значение минимальных уровней воды в период летне-осенней межени – 1,13 м, в период зимней межени – 1,20 м; среднемноголетний уровень воды составляет 157,40 мБС.

Уровень воды р. Риты в контрольном фоновом створе выше карьера в 2021 г. определялся мелиоративным регулированием и сезонными климатическими явлениями. В створе поста расположен шлюз-регулятор, затвор которого обеспечивал подпорный уровень воды в канале р. Риты, с установленным выпуском воды по руслу реки. Максимальные уровни воды характерны для периода весеннего половодья, минимальные уровни воды типичны в основном для периода с сентября по февраль. Абсолютный максимум уровня воды за период наблюдений был зафиксирован в апреле 2012 г. и равнялся 158,25 мБС, а абсолютный минимум уровня воды зарегистрирован 20 декабря 2019 г. и достиг 156,41 мБС. График колебаний среднегодовых уровней воды в контрольном фоновом створе выше карьера по данным за 2011–2021 гг. приведен на рис. 3. Абсолютная амплитуда колебания уровня воды составила 1,84 м, среднемноголетняя амплитуда колебания уровня воды – 0,75 м. Линия тренда имеет выраженный подъем. Характерные уровни воды в контрольном фоновом створе выше карьера за 2011–2021 гг. представлены в табл. 2.

В 2021 г. уровень воды р. Риты в контрольном створе ниже карьера изменялся в зависимости от сезонных климатических явлений и мелиоративного регулирования (в створе поста находится открытый шлюз-регулятор). В период весеннего половодья осуществлялся сброс воды с частичным опорожнением каналов прилегающей мелиоративной системы. Абсолютный максимум уровня воды за период наблюдений был зафиксирован 15 сентября 2014 г. и равнялся 156,69 мБС, а абсолютный минимум уровня воды зарегистрирован 28 мая 2018 г. и достиг 153,85 мБС. График колебаний среднегодовых уровней воды в контрольном створе ниже карьера по данным за 2011–2021 гг. приведен на рис. 4. Абсолютная амплитуда колебания уровня воды составила 2,84 м, среднемноголетняя амплитуда колебания уровня воды – 1,09 м. Линия тренда имеет выраженную отрицательную тенденцию. Характерные уровни воды в контрольном створе ниже карьера за 2011–2021 гг. представлены в табл. 3.



Рис. 3. График колебаний среднегодовых уровней воды в пункте наблюдений мониторинга поверхностных вод ВП-2 (контрольном фоновом створе выше карьера) по данным за 2011–2021 гг.

Fig. 3. Graph of fluctuations in average annual water levels at the observation point for monitoring surface waters «Water metering station – 2» (control background section above the quarry) based on data for 2011–2021

Таблица 2

**Уровни воды в пункте наблюдений мониторинга
поверхностных вод ВП-2 (контрольном фоновом створе выше карьера)
относительно нуля графика (160,80 МБС) по данным за 2011–2021 гг.**

Table 2

**Water levels at the observation point for monitoring surface waters
«Water metering station – 2» (control background section above the quarry)
relative to the zero of the graph (160.80 meters according to the Baltic height system)
based on data for 2011–2021**

Год	Максимальный уровень воды в период весеннего половодья		Минимальный уровень воды в период летне-осенней межени		Минимальный уровень воды в период зимней межени	
	Высота, м	Дата	Высота, м	Дата	Высота, м	Дата
2012	3,18	16 апреля	3,75	15 сентября	4,11	15 декабря
2013	3,04	15 мая	4,01	15 октября	3,87	15 ноября
2014	3,11	15 мая	3,81	15 октября	3,82	15 марта
2015	2,85	15 апреля	3,78	15 июня	3,86	15 февраля
2016	3,03	15 февраля	3,91	21 октября	3,25	3 ноября
2017	3,40	25 мая	4,02	10 августа	4,0	19 января
2018	3,09	21 марта	3,60	17 октября	3,90	20 декабря
2019	3,13	29 мая	3,45	20 сентября	4,39	20 декабря
2020	3,22	20 марта	3,35	20 октября	3,60	30 января
2021	3,10	19 марта	3,62	30 июля	3,75	10 декабря

Примечание. Диапазон максимальных уровней воды в период весеннего половодья составляет 2,85–3,40 м, диапазон минимальных уровней воды в период летне-осенней межени – 3,35–4,02 м, в период зимней межени – 3,25–4,39 м; сумма максимальных уровней воды в период весеннего половодья равняется 31,15 м, сумма минимальных уровней воды в период летне-осенней межени – 37,30 м, в период зимней межени – 38,55 м; среднее значение максимальных уровней воды в период весеннего половодья достигает 3,12 м, среднее значение минимальных уровней воды в период летне-осенней межени – 3,73 м, в период зимней межени – 3,86 м; среднемноголетний уровень воды составляет 157,23 МБС.



Рис. 4. График колебания среднегодовых уровней воды в пункте наблюдений мониторинга поверхностных вод ВП-3 (контрольном створе ниже карьера) по данным за 2011–2021 гг.

Fig. 4. Graph of fluctuations in average annual water levels at the observation point for monitoring surface waters «Water metering station – 3» (control section below the quarry) based on data for 2011–2021

Таблица 3

**Уровни воды в пункте наблюдений мониторинга
поверхностных вод ВП-3 (контрольном створе ниже карьера)
относительно нуля графика (159,10 МБС) по данным за 2011–2021 гг.**

Table 3

**Water levels at the observation point for monitoring surface waters
«Water metering station – 3» (control section below the quarry) relative to the zero
of the graph (159.10 meters according to the Baltic height system) based on data for 2011–2021**

Год	Максимальный уровень воды в период весеннего половодья		Минимальный уровень воды в период летне-осенней межени		Минимальный уровень воды в период зимней межени	
	Высота, м	Дата	Высота, м	Дата	Высота, м	Дата
2012	2,78	15 марта	3,01	15 сентября	4,0	15 декабря
2013	2,91	15 мая	3,34	15 июня	4,0	15 января
2014	2,68	15 мая	4,08	15 октября	4,08	15 декабря
2015	2,53	15 мая	3,10	15 сентября	3,75	15 декабря
2016	2,57	15 апреля	4,35	20 сентября	4,0	3 ноября
2017	3,26	23 марта	4,32	21 октября	4,20	4 декабря
2018	3,07	21 марта	5,25	28 мая	4,01	19 ноября
2019	3,05	20 апреля	3,8	20 июля	4,17	20 декабря
2020	3,68	20 марта	4,32	10 сентября	4,18	30 ноября
2021	3,95	19 марта	4,16	30 июня	4,16	21 января

Примечание. Диапазон максимальных уровней воды в период весеннего половодья составляет 2,53–3,95 м, диапазон минимальных уровней воды в период летне-осенней межени – 3,01–5,25 м, в период зимней межени – 3,75–4,18 м; сумма максимальных уровней воды в период весеннего половодья равняется 30,48 м, сумма минимальных уровней воды в период летне-осенней межени – 39,73 м, в период зимней межени – 40,55 м; среднее значение максимальных уровней воды в период весеннего половодья достигает 3,05 м, среднее значение минимальных уровней воды в период летне-осенней межени – 3,97 м, в период зимней межени – 4,06 м; среднее многолетнее значение уровней воды составляет 155,54 МБС.

Для мониторинга качества поверхностных вод в пределах зоны возможного воздействия отработки Хотиславского месторождения мела и строительных песков отбор проб осуществлялся из р. Риты в контрольных створах ВП-2 и ВП-3, а также из устья отводящего канала. Перечень контролируемых показателей каче-

ства воды водных объектов включал параметры концентрации основных загрязняющих ингредиентов в поверхностных водах, в том числе показатели содержания в воде взвешенных веществ, биогенных веществ, тяжелых металлов, биохимического потребления кислорода за 5 сут и бихроматной окисляемости.

Известно, что р. Рита принадлежит к бассейну р. Мухавец. В 2010–2020 гг. по химическому составу воды р. Мухавец относились к гидрокарбонатному классу кальциевой группы⁴. Концентрация гидрокарбонатов может составлять 51,0–310,5 мг/дм³, ионов кальция – 24–99 мг/дм³, минерализация воды – 186–395 мг/дм³. Загрязненные воды в бассейнах р. Мухавец и других притоков р. Западный Буг в 2020 г. характеризовались высоким среднегодовым содержанием на отдельных участках рек аммоний-ионов (0,44–0,76 мгN/дм³ (1,1–2,0 ед. предельно допустимой концентрации (ПДК))), нитрит-ионов (0,0097–0,0280 мгN/дм³ (1,2 ПДК)), общего железа (0,15–4,84 мг/дм³ (15,4 ПДК)), марганца (0,010–0,498 мг/дм³ (17,8 ПДК)) и цинка (0,0024–0,0470 мг/дм³ (3,9 ПДК)). Общей тенденцией содержания данных загрязняющих веществ в воде водотоков бассейна р. Мухавец к 2021 г. является небольшое, но стабильное снижение их концентраций⁵.

По данным мониторинга поверхностных вод, представленным в табл. 4, в 2010–2021 гг. качество воды р. Риты в контрольном фоновом створе выше карьера соответствовало региональным особенностям формирования поверхностных вод в бассейне р. Мухавец, в том числе по перечню приоритетных загрязняющих веществ: аммоний-ионов (0,608 мгN/дм³ (1,56 ПДК)), нитрит-ионов (0,082 мгN/дм³ (3,4 ПДК)), общего железа (1,3 мг/дм³ (4,1 ПДК)), марганца (0,076 мг/дм³ (2,7 ПДК)) и цинка (0,014 мг/дм³ (1,17 ПДК)). В компенсационном канале качество поверхностных вод, в сравнении с фоновыми показателями и региональными особенностями формирования поверхностных вод в бассейне р. Мухавец, характеризовалось повышенным содержанием загрязняющих веществ: аммоний-ионов (0,234 мгN/дм³ (0,6 ПДК)), нитрит-ионов (0,025 мгN/дм³ (1,04 ПДК)), общего железа (0,38 мг/дм³ (1,2 ПДК)), марганца (0,084 мг/дм³ (3,0 ПДК)) и цинка (0,029 мг/дм³ (2,4 ПДК)). При этом в 2021 г. превышение фоновых значений анализируемых показателей (более чем на 50 %) для других загрязняющих ингредиентов отмечалось только по сульфат-ионам (в 2,8 раза). В контрольном створе ниже карьера качество воды также отличалось повышенным содержанием приоритетных загрязняющих веществ: аммоний-ионов (0,64 мгN/дм³ (1,6 ПДК)), нитрит-ионов (0,086 мгN/дм³ (3,6 ПДК)), общего железа (1,3 мг/дм³ (4,1 ПДК)), марганца (0,087 мг/дм³ (3,1 ПДК)) и цинка (0,019 мг/дм³ (1,6 ПДК)). В отличие от контрольного фонового створа выше карьера в контрольном створе ниже карьера в 2021 г. превышение фоновых значений рассматриваемых показателей (более чем на 50 %) не установлено.

В бассейне р. Риты формируются грунтовые и напорные воды в основном гидрокарбонатного класса кальциево-магниевой группы. В пределах бассейнов рек Риты и Мухавец качество грунтовых вод нестабильно. В отдельные периоды наблюдаются превышения ПДК по содержанию аммоний-ионов (до 2,05 ПДК), нитрат-ионов (до 2,7 ПДК), общего железа (до 103–240 ПДК), марганца (до 1,8 ПДК) и по перманганатной окисляемости (до 1,9 ПДК). В 2020 г. состояние грунтовых и напорных вод на участке Масевичского гидрогеологического поста было удовлетворительным, превышение нормативов качества воды по контрольным показателям не отмечалось. Повышенное содержание загрязняющих компонентов в подземных водах в бассейнах рек Риты и Мухавец связано с наличием локальных источников загрязнения преимущественно сельскохозяйственного и бытового происхождения, а повышенное содержание железа и марганца является следствием региональных гидролого-гидрогеологических особенностей их речных бассейнов⁶.

В 2018–2020 гг. сезонный режим грунтовых вод в бассейне р. Риты характеризовался выраженными весенним половодьем и летне-осенней меженью. Сезонный режим напорных вод был аналогичен сезонному режиму грунтовых вод вследствие тесной гидрологической связи между водоносными горизонтами.

Диапазон изменений среднегодовых УГВ на участке Великоритского гидрогеологического поста (скв. 550) за 1995–2020 гг. составил 0,54–1,33 м, диапазон изменений среднегодовых уровней напорных вод на участке Великоритского гидрогеологического поста (скв. 546) за тот же период наблюдений – 0,43–1,36 м, а в бассейнах рек Риты и Мухавец – 0,4–0,8 м. В 2020 г. среднегодовая амплитуда колебаний УГВ в бассейнах рек Риты и Мухавец достигала 0,44 м, а среднегодовая амплитуда колебаний уровней напорных вод находилась в пределах 0,31 м. В 2020 г. в бассейнах рек Риты и Мухавец произошло общее понижение УГВ (в среднем на 0,2 м) и уровней напорных вод (на 0,11 м)⁷. Глубина залегания УГВ в пунктах наблюдений локальной сети мониторинга подземных вод в зоне возможного воздействия Хотиславского месторождения мела и строительных песков в значительной степени определяется вариациями сезонных климатических явлений.

⁴Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nsmos.by/> (дата обращения: 24.01.2024).

⁵Там же.

⁶Там же.

⁷Там же.

Качество поверхностных вод в пунктах наблюдений (ВП) по данным за 2010, 2016 и 2021 гг.

Table 4

The quality of surface waters at the observation points (water metering stations) based on data for 2010, 2016 and 2021

Показатели загрязнения	ПДК	ВП-1 (отводящий канал)		ВП-2 (контрольный фоновый створ выше карьера)			ВП-3 (контрольный створ ниже карьера)			
		2010 г.	2016 г.	2021 г.	2010 г.	2016 г.	2021 г.	2010 г.	2016 г.	2021 г.
pH	6,5–8,5	6,88	7,4	7,7	6,63	7,0	7,1	7,75	7,22	7,2
Минерализация (сухой остаток), мг/дм ³	1000	161	396	327	360	319	280	362	328	282
Взвешенные вещества, мг/дм ³	25	8,8	16,4	12,7	1,6	6,5	15,1	11,9	11,9	13,8
Биохимическое потребление кислорода за 5 сут, мгО ₂ /дм ³	6,0	1,47	3,0	1,6	1,17	3,0	2,3	3,0	3,0	2,2
Бихроматная окисляемость, мгО ₂ /дм ³	30	35,7	62,2	6,4	60,9	97,8	9,2	Н. с.	71,10	8,8
Аммоний-ион, мгN/дм ³	0,39	0,65	Н. о.	0,218	0,75	Н. о.	0,608	0,1	Н. о.	0,64
Нитрит-ион, мгN/дм ³	0,024	Менее 0,017	Менее 0,01	0,025	0,017	0,18	0,082	Менее 0,01	0,18	0,086
Нитрат-ион, мгN/дм ³	9,03	0,49	0,25	0,24	0,85	0,4	0,3	0,4	0,8	0,3
Хлорид-ион, мг/дм ³	300,0	10,0	15,4	20,3	23,3	21,6	20,1	23,5	22,3	20,2
Сульфат-ион, мг/дм ³	100,0	19,6	85,4	81,6	75,0	23,0	29,5	71,6	49,1	34,2
Нефтепродукты, мг/дм ³	0,05	0,021	Н. о.	0,013	0,01	Н. о.	0,018	Н. о.	Н. о.	0,012
Общее железо, мг/дм ³	0,315*	13,9	1,69	0,381	0,41	4,52	1,3	2,49	2,66	1,3
Марганец, мг/дм ³	0,028*	0,182	0,07	0,085	0,257	0,07	0,076	Н. с.	0,07	0,087
Медь, мг/дм ³	0,004*	0,0013	Н. о.	0,0037	Н. с.	Н. о.	0,0035	Н. с.	Н. о.	0,037
Цинк, мг/дм ³	0,012*	0,020	0,01	0,029	Менее 0,001	0,01	0,014	Н. с.	0,01	0,019
Свинец, мг/дм ³	0,014	Менее 0,001	Н. о.	Менее 0,005	Менее 0,001	Н. о.	Менее 0,005	Менее 0,001	Н. о.	Менее 0,005
Кадмий, мг/дм ³	0,005	Менее 0,001	Н. о.	Менее 0,0005	Менее 0,001	Н. о.	Менее 0,0005	Н. с.	Н. о.	Менее 0,0005
Хром, мг/дм ³	0,005	Н. о.	Н. о.	Менее 0,002	Н. о.	Н. о.	Менее 0,002	Н. о.	Н. о.	Менее 0,002

Примечания: 1. ПДК загрязняющих веществ в воде поверхностных водных объектов приводятся в соответствии с постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 30 марта 2015 г. № 13 «Об установлении нормативов качества воды поверхностных водных объектов»⁸. 2. Знаком * отмечены фоновые показатели в соответствии с упомянутым постановлением. 3. Н. с. – нет сведений; н. о. – содержание не установлено. 4. Полу жирным шрифтом выделены значения показателей загрязнения, превышающие ПДК.

⁸Об установлении нормативов качества воды поверхностных водных объектов : постановление М-ва природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 30 марта 2015 г. № 13 [Электронный ресурс] // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&ru=W21529808> (дата обращения: 24.01.2024).

Анализ графиков колебаний УГВ с 2011 по 2021 г. показывает, что максимальные значения УГВ характерны в основном для периода весеннего половодья (февраль – апрель), а его минимальные значения – для конца летне-осенней межени (июль – октябрь). В целях оценки изменения УГВ в пунктах наблюдений локальной сети мониторинга подземных вод, как и для измерения колебаний уровня поверхностных вод, применен трендовый анализ с использованием данных, полученных в течение 2011–2021 гг. Абсолютный максимум УГВ в скв. 2н был отмечен 20 февраля 2011 г. и составил 1,62 м (или 157,73 мБС), а абсолютный минимум УГВ зафиксирован 20 августа 2017 г. и достиг 3,26 м (или 156,09 мБС). Абсолютная амплитуда колебания УГВ в фоновой скважине за период наблюдений равнялась 1,64 м, среднемноголетняя амплитуда колебания УГВ – 0,68 м (рис. 5).



Рис. 5. График изменения среднегодовой глубины залегания грунтовых вод в фоновом пункте наблюдений локальной сети мониторинга подземных вод (скв. 2н) по данным за 2011–2021 гг.

Fig. 5. Graph of changes in the average annual depth of ground waters at the background observation point of the local underground waters monitoring network (well 2n) based on data for 2011–2021

Диапазон амплитуд колебаний УГВ за 2011–2021 гг. составил 0,25–1,37 м, что соответствует диапазону среднегодовых амплитуд колебаний УГВ на региональных гидрогеологических постах Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь (НСМОС) за 1995–2020 гг. (0,54–1,33 м)⁹. Среднемноголетняя амплитуда колебаний УГВ в фоновой скважине 2н достигла 0,68 м, что также близко к аналогичным показателям на региональных гидрогеологических постах НСМОС (0,79 м). Ход изменений УГВ в контрольных скважинах 1н, 4н и 5н в основном коррелирует с тенденциями изменения УГВ в фоновой скважине 2н. Среднемноголетние амплитуды колебаний УГВ в контрольных скважинах 1н, 4н и 5н за 2011–2021 гг. (0,62–0,71 м) также соответствуют фоновому значению (0,68 м) и региональным изменениям на гидрогеологических постах НСМОС (0,54–1,33 м). Тренды изменения УГВ в пунктах наблюдений локальной сети мониторинга подземных вод в 2011–2021 гг. положительные. Они имеют выраженный общий подъем, что указывает на формирование УГВ в 2021 г. выше среднемноголетних значений. В то же время в 2021 г. наблюдалось снижение среднегодового УГВ в пунктах наблюдений локальной сети мониторинга подземных вод, которое коррелирует с тенденциями, отмечающимися на участках региональных гидрогеологических постов НСМОС¹⁰ (табл. 5).

Как показали замеры УГВ в скважинах 1н, 2н, 4н и 5н, в 2011–2021 гг. уровень воды в компенсационном канале постоянно находился выше, чем глубина залегания грунтовых вод в этих скважинах. По состоянию на декабрь 2021 г. разность отметок напорных и грунтовых вод в смежных скважинах 5н и 6н, расположенных на расстоянии около 100 м от карьера, составила +0,26 м, а разность отметок этих вод у границы Беларуси и Украины в смежных скважинах 2н и 3н, размещенных на удалении около 200 м от карьера, достигла –0,8 м. В 2021 г. разность отметок напорных и грунтовых вод в пределах скважин 5н и 6н и скважин 2н и 3н равнялась +0,23 и –0,12 м соответственно. Анализ колебания УГВ в пунктах наблюдений

⁹Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nsmos.by/> (дата обращения: 24.01.2024).

¹⁰Там же.

региональной сети мониторинга подземных вод показал, что ход изменений УГВ в контрольных скважинах 7н–10н и шахтном колодце 11н в основном является синхронным. Максимальные уровни УГВ характерны для периода весеннего половодья (февраль – апрель, реже май), а минимальные уровни УГВ – для периода с августа по декабрь. Диапазоны изменения среднегодовых амплитуд колебаний УГВ в данных скважинах (см. табл. 5) близки по величине к диапазонам амплитуд колебаний УГВ в пунктах наблюдений локальной и региональной сетей мониторинга подземных вод НСМОС¹¹. В то же время линии трендов изменений УГВ в пунктах наблюдений региональной сети мониторинга подземных вод в 2021 г. являются нисходящими, что обусловлено формированием УГВ на данных участках ниже среднемноголетних значений (см. табл. 5).

Первые от поверхности напорные воды в районе Хотиславского месторождения мела и строительных песков относятся к водоносному карбонатному горизонту верхнемеловых отложений, залегающих на глубине от 15–18 м. Фоновым пунктом наблюдений, относительно которого выполнен анализ, является скв. 3н. Данные локального мониторинга показали, что колебания уровня напорных вод в пунктах наблюдений по данным за 2011–2021 гг. в пределах зоны возможного воздействия карьера закономерно повторяли колебания УГВ, т. е. определялись сезонными климатическими явлениями. Максимальные значения уровня напорных вод также характерны для периода весеннего половодья (февраль – апрель), а его минимальные значения – для конца летне-осенней межени (август – декабрь). Ход изменений уровня напорных вод в наблюдательных скважинах 3н и 6н соответствует тенденциям изменения УГВ в фоновой скважине 2н в частности и в пунктах наблюдений локальной сети мониторинга поверхностных вод в целом.

Линии трендов уровня напорных вод в пунктах наблюдений в течение 2011–2021 гг. являются положительными, что указывает на формирование пьезометрического уровня напорных вод в районе карьера в среднем за 2021 г. выше среднемноголетних значений. Тенденция роста глубины залегания уровня напорных вод в 2021 г. также соответствует общим закономерностям формирования напорных вод на гидрогеологических постах НСМОС. Среднемноголетняя амплитуда колебаний уровня напорных вод в скважинах 3н и 6н за период 2011–2021 гг. составила 0,64 м, что соответствует региональным изменениям диапазона среднегодовой амплитуды колебания уровня напорных вод в бассейнах рек Риты и Мухавец (0,5–0,8 м за 1995–2020 гг.)¹².

Для анализа изменения качества подземных вод в 2021 г. определены приоритетные загрязняющие вещества по рН, минерализации, содержанию биогенных веществ азотной группы, хлорид-ионов, сульфат-ионов, нефтепродуктов, общего железа, марганца и некоторых тяжелых металлов. В 2021 г. в районе карьера качество подземных вод оценено по данным всех пунктов наблюдений локальной и региональной сетей мониторинга подземных вод. Так, в 2010–2021 гг. качество грунтовых вод в фоновой скважине 2н не соответствовало допустимым нормативам качества по показателям содержания общего железа (1,21 мг/дм³ (4 ПДК)) и марганца (0,012 8 мг/дм³ (1,3 ПДК)).

В контрольных пунктах наблюдений локальной сети мониторинга подземных вод по состоянию на 2021 г. в скв. 1н наблюдалось превышение фоновых показателей качества грунтовых вод (более чем на 50 %) по минерализации (в 2,2 раза), содержанию сульфат-ионов (в 15,9 раза), общего железа (в 7,4 раза), марганца (в 1,8 раза), меди (в 1,5 раза) и нефтепродуктов (в 3,3 раза), в скв. 4н – по концентрации меди (в 3,3 раза), в скв. 5н – по содержанию аммоний-ионов (в 16,6 раза), общего железа (в 5,9 раза), марганца (в 2,3 раза), меди (в 4 раза) и нефтепродуктов (в 1,7 раза). Кроме того, в фоновой скважине 2н были превышены нормативы качества грунтовых вод по концентрации общего железа (0,97–2,24 мг/дм³ (3,2–7,4 ПДК)) и марганца (0,013 8–0,022 5 мг/дм³ (1,4–2,3 ПДК)), а в скв. 5н – по рН воды (8,9 ед. (1,05 ПДК)).

На участках региональной сети в 2010–2021 гг. качество грунтовых вод соответствовало региональным особенностям формирования подземных вод в бассейне р. Мухавец, в том числе по сходному перечню приоритетных загрязняющих веществ. В этом отношении были превышены нормативы качества по содержанию общего железа (0,661–6,030 мг/дм³ (2,2–20,1 ПДК)) и рН воды (8,7 ед. (1,03 ПДК)) в скв. 8н и концентрации марганца (0,115 мг/дм³ (1,15 ПДК)) в скв. 7н.

В контрольных пунктах наблюдений региональной сети для грунтовых вод в 2021 г. наблюдалось превышение фоновых показателей скв. 2н (более чем на 50 %): в скв. 7н – по минерализации (в 2,5 раза), содержанию аммоний-ионов (в 9,8 раза), меди (в 2,5 раза) и нефтепродуктов (в 3,5 раза), в скв. 8н – по концентрации аммоний-ионов (в 13,6 раза), общего железа (в 5 раз) и нефтепродуктов (в 1,6 раза), в скв. 9н – по содержанию меди (в 1,8 раза), в скв. 10н – по минерализации (в 1,6 раза), концентрации аммоний-ионов (в 4,3 раза), меди (в 4,3 раза) и нефтепродуктов (в 2,3 раза), в шахтном колодце 11н – по минерализации (в 2,5 раза), содержанию аммоний-ионов (в 20,2 раза), нитрат-ионов (в 34,5 раза), сульфат-ионов (в 5,3 раза) и меди (в 2,1 раза). Содержание других показателей соответствовало фоновым значениям либо оставалось близким к ним.

¹¹Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nsmos.by/> (дата обращения: 24.01.2024).

¹²Там же.

Статистические характеристики режима грунтовых вод
в пунктах наблюдений (наблюдательных скважинах)
по данным за 2011–2021 гг.

Table 5

Statistical characteristics of the ground waters regime
at the observation points (observation wells)
based on data for 2011–2021

Параметры	Год	Наблюдательная скважина									
		1н	2н	4н	5н	7н	8н	9н	10н	11н	
Диапазон изменения среднегодового УГВ, м	–	1,59–2,69	2,28–2,91	1,83–2,86	2,44–3,18	2,07–2,74	2,73–3,28	2,15–2,67	0,83–1,25	2,03–2,70	
	–	1,78–2,36	2,37–2,68	2,04–2,50	2,68–3,02	2,18–2,44	2,78–2,99	2,24–2,44	0,93–1,10	2,21–2,47	
Референсный диапазон среднегодового УГВ 5 % значимости, м	–	157,20	157,17	157,01	155,99	157,75	156,22	157,44	157,38	156,91	
	2011	1,51	1,37	1,86	1,26	1,48	1,35	0,96	0,84	0,98	
Среднемесячный УГВ, мБС	2012	0,63	0,25	0,68	0,40	0,87	1,07	0,57	0,21	0,77	
	2013	0,79	0,89	0,78	0,73	0,75	0,53	1,05	0,83	1,05	
Годовая амплитуда колебаний УГВ, м	2014	0,86	0,69	0,86	0,83	0,99	0,84	0,52	0,44	1,01	
	2015	0,30	0,46	0,36	0,39	0,87	0,75	0,69	0,72	0,67	
Среднегодичная амплитуда колебаний УГВ, м	2016	0,74	0,79	0,67	0,63	0,70	0,55	0,97	0,51	0,47	
	2017	0,76	0,93	0,80	0,86	0,67	0,66	1,05	0,68	0,77	
Среднеквартальная амплитуда колебаний УГВ, м	2018	0,29	0,38	0,36	0,44	0,41	0,62	0,71	0,61	0,47	
	2019	0,36	0,67	0,44	0,37	0,97	0,70	0,45	0,94	1,02	
Среднемесячная амплитуда колебаний УГВ, м	2020	0,19	0,59	0,24	0,22	0,32	0,29	0,37	0,36	0,40	
	2021	1,46	0,45	1,15	0,63	0,35	0,24	0,23	0,17	0,37	
Среднемесячная амплитуда колебаний УГВ, м	–	0,74	0,68	0,75	0,61	0,76	0,69	0,69	0,57	0,73	

Напорные воды верхнемеловых отложений в районе карьера на участках наблюдательных скважин 3н (фоновой) и 6н (контрольной) характеризовались близкими параметрами контролируемых показателей грунтовых вод. Превышение фоновых значений в 2021 г. более чем на 50 % по содержанию общего железа (в 1,9 раза) и рН (в 1,54 раза) зафиксировано в скв. 6н. Превышение допустимых нормативов качества напорных вод в 2021 г. в скважинах установлено только по содержанию общего железа (11,1–21,3 ПДК) и рН (1,07 ПДК). Диапазоны изменения концентраций контролируемых компонентов в напорных водах являются близкими по величине и остаются в рамках диапазонов их содержания, наблюдавшегося в контрольных региональных пунктах наблюдений НСМОС¹³.

Заключение

Анализ данных мониторинга поверхностных вод в пределах зоны возможного воздействия отработки второй очереди Хотиславского месторождения мела и строительных песков за 2011–2021 гг. показывает, что гидрологический режим р. Риты в контрольных створах выше и ниже карьера находился в зависимости от климатических изменений, но был в значительной степени зарегулированным и определялся режимом эксплуатации подпорных гидротехнических сооружений мелиоративных систем «Вир» и «Сушитница». Зависимость от климатических изменений и подъем уровня воды в компенсационном канале выражены в гораздо меньшей степени, чем в р. Рите. Режим наполнения канала поддерживается за счет отведения дренажных карьерных вод. Тренды уровня поверхностных вод в компенсационном канале и выше карьера в течение 2011–2021 гг. положительные. Они имеют сильный подъем, что указывает на отсутствие существенных негативных явлений на данных участках водных объектов. Тренд уровня поверхностных вод ниже карьера отрицательный. Данный факт обусловлен последствиями ежегодного регулирования стока р. Риты с частичным опорожнением мелиоративных каналов. Анализ данных о загрязнении поверхностных вод в створах водомерных постов за 2010–2021 гг. позволяет заключить, что состояние поверхностных вод р. Риты в фоновом створе соответствует общим тенденциям формирования качества речных вод в бассейне р. Мухавец, но отличается более высоким фоновым содержанием аммоний-ионов, общего железа, марганца и цинка. В 2021 г. пределы изменения показателей качества вод р. Риты в контрольном створе ниже карьера в основном соответствовали или были ниже их значений в фоновом створе, превышение нормативов качества воды наблюдалось по сходному перечню показателей. Учитывая характер закономерностей загрязнения воды в отводящем канале, являющихся однотипными, но менее выраженными, чем в фоновом и контрольном (ниже карьера) пунктах наблюдений, можно заключить, что формирование качества воды в р. Рите в 2021 г. не зависело от воздействия отработки карьера. Река Рита в районе месторождения выступает водоприемником стока мелиоративных систем «Вир», «Сушитница», «Гутянская», поэтому источником загрязнения ее вод в 2010–2021 гг. в контрольных створах водомерных постов является прежде всего дренажный сток из этих мелиоративных систем.

Изменения уровня грунтовых и напорных вод в 2010–2021 гг. в районе карьера в основном определялись сезонными вариациями климатических явлений. Его колебания в пунктах наблюдений синхронные. Они соответствуют тенденциям фоновых изменений. Максимальный уровень подземных вод характерен для периода весенних половодий, а их минимальный уровень – для периодов летне-осенней и зимней межени. Данные локального мониторинга подземных вод в районе Хотиславского месторождения мела и строительных песков за 2021 г. коррелируют с данными региональных пунктов наблюдений за состоянием подземных вод НСМОС в бассейне р. Риты¹⁴. Специфика формирования солевого состава грунтовых и напорных вод на участках пунктов наблюдений локальной и региональной сетей соответствует региональным особенностям формирования подземных вод в бассейне р. Мухавец, принятым в качестве контрольных. Диапазоны изменения концентраций анализируемых веществ в грунтовых и напорных водах скважин близки по величине, они остаются в рамках диапазонов регионального (контрольного) содержания. В 2021 г. грунтовые воды в районе карьера характеризовались повышенной минерализацией и содержанием (с превышением фоновых значений) таких веществ, как аммоний-ионы, сульфат-ионы, общее железо, марганец, медь и цинк, в отдельных контрольных скважинах, а также нитрат-ионов в шахтном колодце. Все скважины, на участках которых допущено превышение фоновых показателей, расположены в пределах пониженных и переувлажненных форм рельефа.

С использованием полученных данных проведена графоаналитическая интерпретация условий изменения качества грунтовых вод. Анализ показывает наличие синхронности основных тенденций содержания загрязняющих веществ в грунтовых водах, выше и ниже карьера (на участках пунктов на-

¹³Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nsmos.by/> (дата обращения: 24.01.2024).

¹⁴Там же.

блюдений локальной сети мониторинга), а также на дальних подступах к нему (на участках региональной сети). При этом основная тенденция минерализации отрицательная, а период содержания сульфатов нейтральный и отрицательный, что указывает на отсутствие на данных участках источника загрязнения, способного оказать комплексное воздействие на качество грунтовых вод. Концентрация аммоний-ионов, которые (наряду с общим железом и марганцем) являются приоритетными загрязняющими веществами, в районе карьера уменьшается. Такая тенденция изменения содержания аммоний-ионов, особенно на фоне снижения среднегодовой глубины залегания УГВ на данных участках, указывает на наличие однотипных нетехногенных источников негативного воздействия на режим УГВ. Соответствие диапазонов изменения концентраций веществ и солевого состава грунтовых и напорных вод контрольному региональному содержанию¹⁵ свидетельствует о формировании их качества в районе карьера и зоне возможного воздействия преимущественно за счет природных факторов.

По состоянию на декабрь 2021 г. эксплуатация Хотиславского месторождения мела и строительных песков осуществляется в комплексе с эффективными защитными водоохранными мероприятиями. Компенсационный канал обеспечивает стабилизацию УГВ в районе карьера и прилегающей к нему территории. Наблюдения за изменением режима поверхностных и подземных вод с установленной частотой позволяют иметь достоверные данные об изменении их уровня и качества, осуществлять контроль за воздействием карьера на окружающую среду.

Библиографические ссылки

1. Марченко НВ, Козак МФ. Эколого-биологическая оценка воздействия загрязнения воды рек Нижней Волги. *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки*. 2006;3:87–93.
2. Гоман АВ. Геоэкологическое состояние верхней части подземной гидросферы Астраханского Прикаспия. *Южно-Российский вестник геологии, географии и глобальной энергии*. 2005;3:217–223. EDN: KFPVTT.
3. Романенко ВД, Афанасьев СА, Васенко АГ, Осадчий ВИ, Андрейченко ЮИ, Набиванец ЮБ. *Идентификация и оценка источников загрязнения водных объектов («горячих точек») в бассейне Днепра на территории Украины*. Галяпа АА, редактор. Киев: Полиграфконсалтинг; 2004. 282 с.
4. Белозеров ДА, Хованская МА. Пространственно-временная оценка уровней загрязнения подземных вод соединениями азота в зоне влияния предприятия по производству минеральных удобрений. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2015;1:118–124. EDN: TRZODL.
5. Минуллина АА, Мустакимова ИВ, Мавляудинова ГС. Расчет различных показателей состояния бассейна малой реки (на примере реки Степной Зай). *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010;12(1–4):963–966. EDN: NDXXVUJ.
6. Закруткин ВЕ, Иваник ВМ, Гибков ЕВ, Скларов ВВ. Оценка влияния ликвидируемых шахт Восточного Донбасса на гидрохимический состав малых рек бассейна Северского Донца. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2010;3:84–87. EDN: MSLTNV.
7. Климец ЕС, Видыш ТД. Гидроэкологическое состояние карьерного водоема Косичи как антропогенного водного объекта. В: Шалобьга НН, редактор. *Сборник конкурсных научных работ студентов и магистрантов. Часть 1, Проблемы водохозяйственного строительства и охраны окружающей среды*. Брест: Брестский государственный технический университет; 2020. с. 27–31.
8. Волкова НЕ, Иванютин НМ, Подовалова СВ. Оценка гидроэкологического состояния водных объектов бассейна реки Малый Салгир. *Вестник Московского университета. Серия 5, География*. 2021;3:27–36. EDN: CPLLJV.
9. Вартанян ГС, Гродзенский ВД, Плотникова РИ. *Подземные воды России: проблемы изучения, использования, охраны и освоения*. Москва: Геоинформмарк; 1996. 95 с.
10. Волчек АА, Шешко НН. Изменения уровня режима грунтовых вод территории Национального парка «Беловежская пушча». В: Журавков МА, редактор. *Актуальные вопросы инженерной геологии, гидрогеологии и рационального недропользования. Материалы IX Университетских геологических чтений; 3 апреля 2015 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Издательский центр БГУ; 2015. с. 15–17.
11. Романов ВВ, Мальский КС. Анализ возможностей изучения гидрогеологического режима карьеров и подземных горных выработок инженерной сейсморазведкой. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;6:74–78. EDN: UOIZEX.
12. Гриневский СО. *Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод*. Москва: Инфра-М; 2016. 151 с.
13. Седых ИА. Прогнозирование уровня подземных вод месторождения цементного сырья на основе динамических окрестностных моделей. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2018;18(3):326–332. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-3-326-332.
14. Зекцер ИС. *Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод*. Москва: Научный мир; 2012. 374 с.
15. Черепанский ММ. *Теоретические основы гидрогеологических прогнозов влияния подземных вод на речной сток*. Москва: НИИ-природа; 2005. 260 с.
16. Корнеев ВН, Дубенок СА, Музыкин ВП, Булак ИА. Прогноз речного стока и гидродинамического режима подземных вод для территорий бассейна реки Припять с нарушенным гидрологическим и гидродинамическим режимом. *Природные ресурсы*. 2022;1:25–37.

¹⁵Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nsmos.by/> (дата обращения: 24.01.2024).

References

1. Marchenko NV, Kozak MF. [Ecological and biological assessment of the impact of water pollution in the Lower Volga rivers]. *Bulletin of the MSRU. Series: Natural Sciences*. 2006;3:87–93. Russian.
2. Goman AV. [Geoecological state of the upper part of the underground hydrosphere of the Astrakhan Caspian Sea]. *Yuzhno-Rossiiskii vestnik geologii, geografii i global'noi energii*. 2005;3:217–223. Russian. EDN: KFPVTT.
3. Romanenko VD, Afanas'ev SA, Vasenko AG, Osadchii VI, Andreichenko YuI, Nabivanets YuB. *Identifikatsiya i otsenka istochnikov zagryazneniya vodnykh ob'ektov («goryachikh tochek») v basseine Dnepra na territorii Ukrainy* [Identification and assessment of sources of pollution of water bodies in the Dnieper basin on the territory of Ukraine]. Galyapa AA, editor. Kyiv: Poligrafkonsalting; 2004. 282 p. Russian.
4. Belozеров DA, Hovanskaya MA. Spatial-temporal evaluation levels of groundwater pollution with nitrogen compounds in the zone of enterprises for the production of mineral fertilizer. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2015;1:118–124. Russian. EDN: TRZODL.
5. Minullina AA, Mustakimova IV, Mavlyautdinova GS. Calculation of various parameters of the small river basin condition (on the example of River Stepnoy Zay). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2010;12(1–4):963–966. Russian. EDN: NDXVUJ.
6. Zakrutkin VE, Ivanik VM, Gibkov EV, Sklyarov VV. Influence estimation of liquidated mines of East Donbass on a hydrochemical compound of the small rivers of Seversky Donets Pool. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2010;3:84–87. Russian. EDN: MSLTNV.
7. Klimets ES, Vidysh TD. [Hydroecological state of the Kosichi quarry reservoir as an anthropogenic water body]. In: Shalobyta NN, editor. *Sbornik konkursnykh nauchnykh robot studentov i magistrantov. Chast' 1, Problemy vodokhozyaistvennogo stroitel'stva i okhrany okruzhayushchei sredy* [Collection of competitive scientific works of students and undergraduates. Part 1, Problems of water management construction and environmental protection]. Brest: Brest State Technical University; 2020. p. 27–31. Russian.
8. Volkova NE, Ivanyutin NM, Podovalova SV. Assessment of the hydroecological state of water bodies in the Maly Salgir River basin. *Lomonosov Geography Journal*. 2021;3:27–36. Russian. EDN: CPLLJV.
9. Vartanyan GS, Grodzenskii VD, Plotnikova RI. *Podzemnye vody Rossii: problemy izucheniya, ispol'zovaniya, okhrany i osvoeniya* [Groundwater in Russia: problems of study, use, protection and development]. Moscow: Geoinformmark; 1996. 95 p. Russian.
10. Volchek AA, Sheshko NN. [Changes in the level regime of groundwater in the territory of the Belovezhskaya Pushcha National Park]. In: Zhuravkov MA, editor. *Aktual'nye voprosy inzhenernoi geologii, gidrogeologii i ratsional'nogo nedropol'zovaniya. Materialy IX Universitetskikh geologicheskikh chtenii; 3 aprelya 2015 g.; Minsk, Belarus'* [Current issues of engineering geology, hydrogeology and rational use of subsoil. Proceedings of the 9th University geological readings; 2015 April 3; Minsk, Belarus]. Minsk: Izdatel'skii tsentr BGU; 2015. p. 15–17. Russian.
11. Romanov VV, Mal'skiy KS. Analysis of possibilities to study the hydrogeological regime of open pits and underground mining engineering seismic. *Mining information and analytical bulletin*. 2015;6:74–78. Russian. EDN: UOIZEX.
12. Grinevskii SO. *Gidrogeodinamicheskoe modelirovanie vzaimodeistviya podzemnykh i poverkhnostnykh vod* [Hydrogeodynamic modelling of the interaction of groundwater and surface water]. Moscow: Infra-M; 2016. 151 p. Russian.
13. Sedykh IA. Forecasting the groundwater level of cement raw materials deposit based on dynamic neighborhood models. *Vestnik of Don State Technical University*. 2018;18(3):326–332. Russian. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-3-326-332.
14. Zektser IS. *Podzemnyi stok i resursy presnykh podzemnykh vod* [Groundwater flow and fresh groundwater resources]. Moscow: Nauchnyi mir; 2012. 374 p. Russian.
15. Cherepanskiy MM. *Teoreticheskie osnovy gidrogeologicheskikh prognozov vliyaniya podzemnykh vod na rechnoi stok* [Theoretical foundations of hydrogeological forecasts of the influence of groundwater on river flow]. Moscow: NIA-priroda; 2005. 260 p. Russian.
16. Korneev VN, Dubenok SA, Muzykin VP, Bulak IA. Forecast of river runoff and hydrodynamic regime of groundwater for the territories of the Pripjat River basin with disturbed hydrological and hydrodynamic regime. *Natural Resources*. 2022;1:25–37. Russian.

Получена 10.12.2023 / исправлена 25.01.2024 / принята 29.02.2024.
Received 10.12.2023 / revised 25.01.2024 / accepted 29.02.2024.

ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ В ПЛАНЕТАРНОМ РАКУРСЕ

В. Б. КАДАЦКИЙ¹⁾¹⁾Независимый исследователь, г. Минск, Беларусь

Аннотация. На основе систематизации научных материалов, идей авторитетных ученых и современных данных рассматриваются причины уникальности природы Земли в сравнении с мирами планет земной группы (Меркурия, Венеры и Марса), которые имеют сходный генезис из единого источника, располагаются недалеко (по космическим меркам) друг от друга и от Солнца и получают от него достаточное количество энергии. К ним следует отнести и Луну, так как после своего образования, являясь спутником Земли, она развивалась как самостоятельное космическое тело. Кроме того, Луна наиболее изучена среди соседей, что важно для общепланетарного понимания роли живых организмов. Исходя из этого, ранее существовало мнение, согласно которому внутренние планеты должны быть во всем похожи на Землю, включая наличие кислородной атмосферы, поверхностной воды и живых организмов. Дальнейшие научные исследования изменили эти представления. Выполненный сравнительный анализ природной обстановки внутренних планет и Луны (рельефа, вод, атмосферы) показывает, что почти все они по своим внешним характеристикам во многом похожи между собой, но резко отличаются от Земли. Главной причиной, объясняющей этот феномен, является наличие живых организмов, которые в процессе жизнедеятельности перестраивают исходную обстановку в оптимальную для себя среду обитания – биосферу. Здесь живые организмы выступают основным биогеохимическим фактором, поглощая солнечную радиацию, обеспечивая малый биотический и большой геологический круговороты вещества и энергии, поступление кислорода в атмосферу. Утверждается, что при этом происходят эволюция живого, накопление биогенных осадков, контроль соотношений солености и кислотности вод и, по-видимому, поддержка неугасающей геологической активности. Установленные факты позволяют выдвинуть гипотезу, согласно которой все основные отличия Земли от своих соседей не являются случайными, а выступают в биосфере как закономерности, сформированные в процессе эволюции живых организмов.

Ключевые слова: Солнечная система; биосфера; живые организмы; живое; внутренние планеты; биогеохимические циклы; малый биотический круговорот вещества и энергии; большой геологический круговорот вещества и энергии.

LIVING ORGANISMS FROM A PLANETARY PERSPECTIVE

V. B. KADATSKY^a^aIndependent researcher, Minsk, Belarus

Abstract. The article, based on the systematisation scientific materials, ideas of authoritative scientists and modern data, examines the reasons for the unique nature of the Earth in comparison with the worlds of the terrestrial planets (Mercury, Venus and Mars). These neighbouring planets have a similar genesis from a single source, are located close (by cosmic standards) to each other and from the Sun, and receive a sufficient amount of energy from it. The Moon should also be included among them, since after its formation, being a satellite of the Earth, it developed as an independent cosmic body. In addition, the Moon is the most studied among its neighbours, which is important for a planetary understanding

Образец цитирования:

Кадацкий ВБ. Живые организмы в планетарном ракурсе. Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2024;1:37–44.
EDN: RCNKMQ

For citation:

Kadatsky VB. Living organisms from a planetary perspective. Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology. 2024;1:37–44. Russian.
EDN: RCNKMQ

Автор:

Валерий Борисович Кадацкий – доктор географических наук, профессор; независимый исследователь.

Author:

Valery B. Kadatsky, doctor of science (geography), full professor; independent researcher.
v.kadatsky@tut.by

of the role of living organisms. Based on this, there was previously an opinion that the inner planets should be similar to the Earth in everything, including the presence of an oxygen atmosphere, surface water and living organisms. Subsequent studies have largely changed these ideas. A comparative analysis of the natural environment of the inner planets and the Moon (relief, water, atmosphere) shows that almost all of them are largely similar in their external characteristics, but differ sharply from the Earth. The main reason explaining this phenomenon is the presence of living organisms, which, in the process of life activity, reconstruct the original environment into an optimal habitat for themselves – the biosphere. Here living things act as the main biogeochemical factor, absorbing solar radiation, providing small biotic and large geological cycles of matter and energy, and the supply of oxygen to the atmosphere. At the same time, the evolution of living things occurs, the accumulation of biogenic sediments, the control of the ratio of salinity and acidity of waters and, apparently, maintains unabated geological activity. Established facts allow us to put forward the hypothesis that all the main differences between Earth and its neighbours are not accidental, but appear in the biosphere as patterns formed in the process of evolution of living organisms.

Keywords: Solar system; biosphere; living organisms; living things; inner planets; biochemical cycles; small biotic cycle of matter and energy; large geological cycle of matter and energy.

Введение

Внутренние планеты Солнечной системы (Меркурий, Венера, Земля и Марс), как известно, имеют подобный генезис, обладают сходным строением, получают от Солнца достаточное количество энергии, и они должны быть во многом идентичны. При этом почти все внутренние планеты, включая Луну, по своим природным характеристикам действительно похожи между собой, но они резко отличаются от Земли.

Основная цель работы – сравнение свойств биосферы Земли, формирование которых связано с функционированием живых организмов (живого) на протяжении миллиардов лет, с особенностями миров других планет земной группы.

Материалы и методы исследования

В работе рассматриваются основные природные особенности Земли и ближайших к ней планет с точки зрения основных структурных сфер (литосферы, гидросферы и атмосферы) для выяснения их генезиса и специфики функционирования. Данный метод имеет ключевое значение для анализа реального мира, однако при его применении возникают спорные моменты, вызванные различиями во мнениях авторитетных ученых. Поэтому автор настоящей статьи стремится следовать наиболее целесообразным объяснениям, выработанным философами и учеными всех времен. Кроме того, необходимо, чтобы полученные при таком анализе результаты можно было проверить независимыми способами. Наконец, используемые факты и сделанные с их помощью выводы должны логично встраиваться в существующую теорию познания мира.

Живые организмы тесно связаны с термином «биосфера», который имеет неоднозначные толкования. В трактовке А. А. Григорьева под биосферой понимается только совокупность живых организмов (растений, животных, грибов, микроорганизмов, бактерий и др.), наряду с атмосферой, гидросферой и литосферой она составляет географическую оболочку планеты [1]. При этом настойчиво подчеркивается, что природные условия Земли наиболее благоприятны для развития биосферы. Некоторые последователи такого представления считают, что географическая оболочка планеты существовала до появления биосферы и она останется после прекращения ее функционирования [2].

Принципиально иную точку зрения высказал В. И. Вернадский в учении о биосфере, в котором обосновано, что биосфера – это область планеты, заселенная живыми организмами и находящаяся под их воздействием, т. е. живые организмы активно влияют на окружающую среду, изменяя ее в своих интересах [3; 4]. Иными словами, биосфера охватывает тропосферу, воды планеты и верхнюю часть литосферы – все, что освоено живыми организмами [5]. Автор настоящей статьи придерживается этого учения [6].

Часто обе дефиниции термина «биосфера» произвольно смешиваются, что порождает недопонимание между их приверженцами. В связи с этим уместно сослаться на философское замечание Р. Декарта: «Определяйте значения слов, и вы избавите мир от половины заблуждений».

В вопросах истории возникновения и эволюции тех или иных объектов научные факты соседствуют с многочисленными дискуссионными предположениями, догадками и заключениями¹. Эта ситуация неизбежно возникает при исследовании сложных проблем, причем они решаются различными путями, как посредством изучения деталей, так и с помощью обобщения известного материала с учетом новых фактов. В данной статье методом от противного сравниваются особенности биосферы Земли с изучаемыми, предполагаемыми и спорными явлениями соседних с ней планет.

¹Яблоков А. В., Юсупов А. Г. Эволюционное учение : учеб. пособие. М. : Высш. школа, 1998. 335 с.

Результаты и их обсуждение

Солнечная система образовалась примерно 4,5–4,6 млрд лет назад, что составляет около трети возраста Вселенной. Из восьми планет, ныне вращающихся вокруг Солнца, ближайшими к нему являются Меркурий, Венера, Земля и Марс. Их называют внутренними планетами или планетами земной группы, а Меркурий, Венеру и Марс – ближайшими соседями Земли. К ним можно отнести также Луну, которая, хотя и выступает спутником Земли, после своего образования развивалась как самостоятельный объект. Кроме того, Луна наиболее изучена среди ближайших соседей Земли, что важно для общепланетарного понимания.

Внешние планеты, в число которых входят Сатурн, Юпитер, Уран и Нептун, именуют газовыми гигантами. Они имеют многочисленных спутники, размещаются далеко от центральной звезды (на удалении 780–4500 млн км от нее) и находятся в других природных условиях, непригодных для органической жизни [7].

Внутренние планеты при гипотетическом разрезе обладают сходным строением, в котором выделяются три основных структурные части. По аналогии с Землей внутри у них имеется двуслойное металлическое ядро, по-видимому железоникелевое. Центральная часть ядра твердая, а его внешняя часть жидкая. Средняя область (мантия) состоит из смеси расплавленных пород – магмы. Наружная оболочка (литосфера) представлена снизу вязким слоем верхней мантии и перекрывающей ее твердой силикатной корой. Кора плотная, каменная. Она разломана на отдельные блоки (плиты), которые могут перемещаться (дрейфовать) по пластичной поверхности мантии.

В период формирования Солнечной системы внутренние планеты рождались путем аккреции газов, ледяных тел и минеральных обломков из единого протопланетного облака. Данный процесс происходил примерно в одно и то же время. Порой масса соударяющихся тел была огромной, что вело к переходу кинетической энергии столкновений в теплоту и ее мощному потоку по направлению от поверхности к ядру. Этой энергии хватало и для развития активного вулканизма, так как для всех внутренних планет характерны древние изверженные породы. Также считалось, что внутренние планеты из-за подобного генезиса, небольших размеров и относительно близкого расположения друг к другу и Солнцу должны быть похожи на Землю, включая наличие у них атмосферы, воды и живых организмов. Однако дальнейшие исследования во многом изменили эти представления.

Живые организмы и литосфера. В отличие от литосферы Меркурия, Венеры и Марса поверхностный слой земной коры освоен живыми организмами, причем его нижняя граница очень неровная. Эта особенность вызвана тем, что нижняя граница поверхностного слоя земной коры фиксирует различные пределы распространения жизни. На континентах живые организмы могут проникать на глубину до 6–7 км и, по-видимому, еще больше, а в океане находятся ниже слоя донных осадков. Условно пределы распространения жизни ограничиваются изотермой 100 °С, приближение к которой вызывает гибель большинства живых клеток.

На поверхности земной коры влияние живых организмов проявляется прежде всего в наличии рыхлого почвенного слоя (педосферы). Его генезис обусловлен, помимо климата, деятельностью разнообразных существ (микроорганизмов, насекомых, червей, грибов, млекопитающих-землероев, а также растений). Они разрушают поверхностные каменные породы, «перелопачивают» грунты, разлагают отмершие органические материалы, высвобождают исходные химические элементы и создают органический субстрат (гумус) – вещество, необходимое для формирования новых пищевых сетей. Следующие поколения живых организмов, сменяя друг друга, участвуют в этом процессе, продолжительность которого составляет десятки лет. Он называется малым биотическим круговоротом вещества и энергии.

Одновременно в биосфере имеет место большой геологический круговорот вещества и энергии, условно начинающийся в педосфере и несколько ниже, в зоне гипергенеза. Здесь под воздействием прямой и опосредованной солнечной энергии, живых организмов, газов атмосферы, воды и ее растворов образуются специфические биогеохимические условия, способствующие процессам выветривания, денудации и дифференциации окружающих пород. Местами в них скапливаются остатки биоты, из чего формируются каустобиолиты. Кроме того, в осадочной толще содержатся и иные органогенные породы (известняки, мел, кремнезем, диатомит и др.). На больших глубинах они преобразуются, вовлекаются в дрейф литосферных плит, что за миллионы лет приводит к перестройке рельефа, возникновению океанических впадин, новых границ материков, образованию срединно-океанических хребтов и иных геологических структур².

Параллельно часть расплавленных пород, газов, водяных паров по разломным зонам и вулканическим путем возвращаются в пределы биосферы, завершая большой геологический круговорот вещества

²Хаин В. Е., Рябухин А. Г. История и методология геологических наук : учебник. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1997. 317 с.

и энергии. Его продолжительность может составлять тысячи и даже миллионы лет. На Земле насчитывается свыше 1 тыс. действующих вулканов (включая подводные). На протяжении приблизительно 4 млрд лет они сменяют друг друга и в зависимости от количества выбрасываемого пепла и газов вызывают глобальные похолодания или потепления.

Вращающееся ядро участвует в теплообмене с мантией и возбуждает механизм генерации магнитного поля планеты. Оно окружает Землю и создает особое пространство, называемое магнитосферой, которое предотвращает опасный для живых организмов поток ионизированных частиц (солнечного ветра), испускаемых солнечной короной, и галактических излучений. В связи с этим ученые высказывают идею о том, что жизнь на Земле возможна, пока ее недра не остыли и не утратили магнитосферу. Однако, по мнению автора настоящей статьи, данный вывод преждевременен, поскольку он не учитывает роль биосферного подхода к исследованию активности недр Земли.

Отсутствие живых организмов на соседних планетах. С середины XX в. усилилось изучение соседей Земли вначале с помощью пролетных зондов, а затем с использованием десантированных аппаратов и планетоходов. Также было осуществлено шесть межпланетных экспедиций астронавтов на Луну. Выяснилось, что, если не учитывать земных живых организмов и акваторий, рельеф внутренних планет во многом идентичен. Он включает скальные образования, потухшие вулканы (самые грандиозные из них находятся на Марсе), обширные лавовые равнины и плато, крутые уступы, а также многочисленные кратеры. На больших площадях грунты Луны разбиты в результате падения метеоритов, длившегося миллионы лет. Космическое выветривание измельчило их, превратив в пылеватопесчаные наслоения. За ними закрепился термин «реголит», который, возможно, распространится на подобные образования других планет.

Как свидетельствуют многочисленные фотоснимки, внеземные ландшафты абсолютно пустынные. На Меркурии, Венере, Марсе и Луне отсутствует жидкая поверхностная вода, хотя на Марсе сохранились следы речных потоков и водоемов. Важно, что если во внеземных отложениях не обнаружатся следы биогенных пород, то это явится дополнительным свидетельством их вечной безжизненности. У соседних с Землей планет нет почвенно-растительного покрова, и, следовательно, там не происходит малый биотический круговорот вещества и энергии. Вероятно, по этой же причине нет и большого геологического круговорота вещества и энергии.

При сравнении внутренней динамики планет неясно, по каким причинам у соседей Земли ослабли внутренние источники энергии. Случившееся привело к сокращению количества тепла, поступающего через границу между ядром и мантией, утрате геомагнетизма, исчезновению магнитосферы и затуханию вулканизма. Считается, что раньше всего эти явления произошли на Луне и Меркурии из-за их относительно небольшой массы. После утраты геомагнетизма они оказались без защиты от космических излучений. В результате поверхностная вода испарилась и ее пары вместе с газами атмосферы были выметены в космос. На протяжении последних миллионов лет сходные процессы действуют на Марсе и, возможно, затрагивают Венеру.

В настоящее время главным источником энергии для планет Солнечной системы, кроме внутриядерной энергии, остается Солнце. Следовательно, Земле достаточно его энергии для сохранения внутренней активности, а также для действия геомагнетизма, формирования магнитосферы и продолжения вулканизма в отличие от других четырех планет.

Напрашивается одно логическое объяснение этому явлению: только малый биотический и большой геологический круговороты вещества и энергии способны восполнить нехватку требуемой энергии. Иными словами, сравнение внутренней активности Меркурия, Венеры, Марса и Луны позволяет допустить, что, пока на Земле существует жизнь, она будет геологически активной.

Воды внутренних планет. Причины появления воды (льда) на планетах земной группы во многом остаются неясными, и, как всегда, в подобных случаях на этот счет возникают различные гипотезы. Поскольку строительный материал поступал на них из единого протопланетного облака в одно и то же время, вопрос усложняется: почему именно Земля обладает таким большим объемом жидкой воды, формирующей ее поверхностную оболочку (гидросферу)? Ранее одна из точек зрения сводилась к мнению о том, что данный факт – счастливая случайность. Имеется иная веская гипотеза, согласно которой вода в виде льда появилась на планетах земной группы благодаря кометам, после того как их поверхности остыли. В соответствии с еще одной идеей вода – результат дегазации недр молодых планет с последующей миграцией пара к их поверхности и его конденсацией, что способствовало образованию океана.

Другая часть вопроса сводится к следующему: если все внутренние планеты на этапе своего создания имели воду, то почему через миллиарды лет она в свободном состоянии продолжает сохраняться только на одной из них? Изучение этой проблемы представляет исключительный интерес, поскольку само наличие воды – важная часть уникальности земной природы. Вместе с тем с биосферных позиций можно объяснить некоторые аспекты этой проблемы.

Гидросфера Земли включает все поверхностные и подземные воды, постоянный и временный лед и снег, а также водяные пары. Основная часть объема воды на планете (более 97 %) приходится на Мировой океан (с морями, заливами и проливами). Пресные воды суши размещаются в реках, озерах, болотах, подземных источниках, ледниках, снежном покрове и вечной мерзлоте.

Перечисленные резервуары безостановочно обмениваются своими водами, создавая круговорот воды в природе (гидрологический цикл). Данный процесс является важным элементом глобального переноса вещества и энергии [8]. Геологическое изучение древнейших пород свидетельствует о том, что гидросфера сформировалась приблизительно 4 млрд лет назад. Примерно в это же время в водных отложениях появились примитивные существа – первые планктонные микроорганизмы (одноклеточные безъядерные бактерии, археи, прокариоты). Они размножались простым делением, впитывали воду поверхностью тела, питались органическими материалами, создаваемыми фотосинтетическими реакциями, и обитали только в водной среде под защитой от солнечного ветра и других негативных внешних факторов.

В свою очередь, живые организмы оказывали целенаправленное воздействие на воду. По оценкам биологов, в процессе фотосинтеза синезеленые водоросли с момента своего появления расщепляли воду на элементы. Выделяющийся при этом свободный кислород поступал в атмосферу, обеспечивая дыхание почти всех видов живых организмов.

Соленость океанской воды – это важный химический показатель, характеризующий состав растворенных в ней веществ. Он влияет на плотность воды, температуру ее замерзания и, следовательно, на глобальный климат. Показатель солености очень устойчив, его значение достигает примерно 35 г/л (35 ‰). Такой уровень солености установился еще в начале палеозойской эры (более 500 млн лет назад) и несущественно колебался в отдельные геологические периоды. В это же время бурно развивались водные организмы – от безъядерных прокариот до крупных ядерных эукариот (так называемый большой биологический взрыв). Параллельно появились скелетные живые организмы, и гидробионты приобрели такую же сложность, как и современные виды, что свидетельствует о становлении экологической устойчивости океана.

Некоторые специалисты считают соленость земной воды наследием первичного океана. По мнению других ученых, соли постоянно поступают из трещин и разломов в тектонических зонах дна, а также возникают в результате вулканических извержений (включая подводные). Согласно другой гипотезе они выщелачиваются из почв и горных пород под влиянием различных видов континентального стока.

Иногда соленость прибрежных морей и отделившихся замкнутых водоемов может повышаться в связи с сильным испарением. Однако такие отклонения от устоявшихся значений недолговечны, поскольку сгущение растворов ведет к осаждению и образованию различных соляных месторождений. Встречаются ситуации, когда в окраинных морях соленость воды понижается из-за притока речных вод. Но главное заключается в том, что никаких изменений в солености пелагической зоны океана не происходит.

Существует еще один важный фактор, влияющий на концентрацию в воде растворенных солей. Эта роль принадлежит водным организмам. Со временем они сменяются новыми поколениями гидробионтов, извлекающими из воды вещества, необходимые для формирования скелетов, зубов, раковин, панцирей, хитиновых покровов и т. д. После их отмирания нерастворимые фрагменты оказываются в осадке. Причем такой сценарий продолжается миллионы лет, а суммарная концентрация солей остается стабильной.

Вода – универсальный растворитель, она может быть кислой, нейтральной или щелочной, и показателем этой способности выступает pH. В чистой природной воде значение pH равняется 7 и свидетельствует о ее нейтральности, такую среду предпочитают живые организмы. В морской воде в связи с наличием в ней солей среднее значение pH в доиндустриальную эпоху составляло примерно 8,2. Сейчас выбросы техногенного углекислого газа в атмосферу и его частичное растворение в воде ведут к уменьшению pH океана до 8,1 (около 28 % снижения этого показателя). Некоторые гидробиологи, прогнозируя такую тенденцию, опасаются, что она провоцирует растворение карбонатов в раковинах моллюсков, панцирях крабов, коралловых полипов, потерю рыбами сенсорных свойств и др. Однако начавшиеся углубленные исследования этой темы показали следующее: существует еще много противоречий и эффект данной угрозы может быть ничтожен.

Природные воды содержат 99,73–99,76 % легкого изотопа водорода, или протия (^1H). Остальной водород представлен дейтерием (D, ^2H). В незначительном количестве встречаются ядра радиоактивного изотопа водорода трития (T, ^3H) с периодом полураспада 12,32 года. Массовые числа этих изотопов равны 1, 2 и 3 соответственно. Другой компонент воды принадлежит изотопам кислорода, в основном легкому изотопу ^{16}O с ничтожной примесью изотопа ^{17}O и тяжелого изотопа ^{18}O [9].

Противоя легкая вода (H_2O) оптимальна для всех живых организмов в отличие от дейтериевой воды (D_2O), которая оказывает на них угнетающее воздействие. Радиоактивная тритиевая вода (T_2O) имеет только научную значимость.

Анализом того, имеется ли вода на соседних планетах, занимаются многие ученые, поскольку не исключено, что ответ на этот вопрос поможет выяснить причины ее появления на Земле и механизм формирования гидросферы. Однако недавние исследования показывают, что все соседние планеты отличаются от Земли полным отсутствием жидкой поверхностной воды. Помимо этого, представление о том, что вода (лед) доставлялась на внутренние планеты во время их формирования кометами, критикуется рядом ученых. Кометная вода содержит примерно в 2–3 раза больше дейтерия, чем земная, поэтому их следует считать водами разных типов.

В некоторых подповерхностных породах Марса и Луны встречается вечная мерзлота, которая могла бы служить источником воды. Кроме того, в рельефе Марса сохранились следы, похожие на русла древних потоков и акваторий. Отношение количества дейтерия к количеству протия в парах его атмосферы существенно выше, чем на Земле. Данный факт свидетельствует о том, что на Марсе была вода, а при ее испарении происходило расщепление молекул и протий улетучивался из атмосферы быстрее, чем дейтерий, доля которого возрастала.

На Марсе и Луне, а также на Меркурии на дне глубоких ударных кратеров, никогда не освещаемых Солнцем, находится водяной лед. По-видимому, он прибыл на эти планеты несколько миллионов лет назад и сохранился. В газовой оболочке Венеры обнаружены ничтожные пары воды, но еще предстоит выяснить, была ли у нее на поверхности жидкая вода.

Атмосфера Земли. Земная тропосфера, ограниченная сверху озоновым слоем, содержит около 75 % всей массы атмосферы и полностью входит в биосферу. Биосферная значимость озона, образующегося при распаде молекулярного кислорода (O_2) под воздействием космических излучений, хорошо известна.

Современный усредненный химический состав тропосферы представлен в основном смесью двух элементарных газов – азота (78 %) и кислорода (21 %). В небольших количествах в атмосфере содержатся и другие примеси: инертные газы, водяной пар, двуокись углерода, метан, водород, а также аэрозольные и пылевые частицы. Сейчас выяснено, что газовая оболочка Земли в своем вещественном составе претерпела изменения.

Ранняя атмосфера Земли, как считается, из-за постоянного вулканизма и дегазации недр состояла из углекислого газа (CO_2), сероводорода (H_2S), аммиака (NH_3), метана (CH_4), водяного пара (H_2O) и ряда примесей [10; 11]. Хотя газы O_2 и O_3 не присутствовали в воздушной среде, она была пригодной для первых анаэробных одноклеточных доядерных микроорганизмов (например, прокариот), которые использовали CO_2 для своей жизнедеятельности. Несколько позже в процессе эволюции микроорганизмы приобрели функцию фотосинтеза – разложения воды с выделением свободного кислорода. После отмирания в морской среде они включались в осадок, при этом кислород не тратился на утилизацию отходов.

Вначале кислород полностью расходовался в морских условиях, но по мере увеличения своего количества он стал окислять породы суши, а затем (приблизительно 3,0–0,5 млрд лет назад) начал накапливаться в воздушной среде. Здесь же следует отметить, что сохранность газовой оболочки Земли со времени образования планеты обязана окружающему магнитному полю (магнитосфере), которое возникает у космических тел благодаря сложным внутренним процессам. Магнитосфера выступает защитным экраном, огораживающим планету от различных внешних излучений, включая солнечный ветер – быстрый поток ионизированных частиц от солнечной короны.

Кроме того, воздушная среда приобрела необходимую мощность и плотность, защищая биосферу от метеоритов. При вторжении в атмосферу Земли они разрушаются и сгорают в ней, за исключением массивных объектов, иногда прорывающихся к поверхности планеты.

Живые организмы (и древние, и современные) способны длительно функционировать в диапазоне температур от 0 °С до примерно 100 °С. Но наиболее комфортные средние температуры для них находятся в пределах от 5–10 до 30–35 °С, что в основном и наблюдается в биосфере.

Для сравнения изложенной ситуации рассмотрим атмосферные условия соседних планет.

Атмосферы соседних планет. Знания об атмосфере внутренних планет в настоящее время претерпели принципиальные изменения. В. И. Вернадский в своей последней прижизненной работе с учетом имевшихся на тот момент скудных астрономических сведений о составе атмосфер соседних планет отмечал, что живые организмы присутствуют на Марсе и Венере [12]. С развитием космических исследований эти представления кардинально изменились. В последние два-три десятилетия было установлено, что Меркурий и Луна обладают сильно разреженными газовыми оболочками. У Меркурия эта газовая оболочка сравнивается с техническим вакуумом, а у Луны характеризуется еще меньшей плотностью. У специалистов нет единого мнения даже о том, считать ли их атмосферами. Оболочечные газы обеих планет пополняются за счет внутренних процессов, в результате облучения солнечным ветром или из-за воздействия метеоритов. Параллельно солнечный ветер выметает часть газов в космос, не позволяя им накапливаться.

Погодные наблюдения показывают, что днем на Меркурии температура может достигать +473 °С, а ночью опускаться до –173 °С. На Луне эти же показатели равняются +127 и –173 °С соответственно, а на дне глубоких кратеров у полюсов, никогда не освещаемых Солнцем, могут составлять почти –250 °С.

Атмосфера Венеры совершенно иная. Вулканические газы, скопившиеся в зоне притяжения планеты, образовали газовую оболочку, которая более чем в 90 раз плотнее земной атмосферы. Хотя у Венеры слабое магнитное поле (на порядок меньше земного), ее плотная атмосфера вынуждает солнечный ветер обгибать планету. Эту оболочку способны преодолеть только единичные крупные метеориты, оставляющие на поверхности Венеры ударные кратеры большого диаметра. В атмосфере доминируют CO₂ (96,5 %) и N₂ (3,5 %), а в ее верхних слоях содержатся облака из капель серной кислоты и сернистого газа. Такой газовый состав и относительная близость Венеры к Солнцу привели к формированию сильного парникового эффекта, в результате чего нижние слои атмосферы имеют постоянную температуру, превышающую 450 °С. Несмотря на то что Венера считается «сестрой» Земли, особенности их климата разительно отличаются друг от друга [13].

Плотность разреженной атмосферы Марса составляет менее 1 % плотности земной атмосферы, поэтому в ней сгорают только микрометеориты. Химический состав атмосферы Марса является результатом древней вулканической активности и включает CO₂ (95 %), N₂ (2,8 %) и Ar (2 %). В настоящее время на Марсе находится несколько десантированных аппаратов, которые всесторонне его исследуют. Удаленность Марса от Солнца обуславливает его среднюю температуру около –60 °С, при этом летние дневные температуры в экваториальной области могут достигать 30 °С, а зимние ночные температуры на полюсах опускаться ниже –140 °С. Такие перепады даже в неплотной атмосфере способны породить сильные ветры, скорость которых превышает 100 м/с, что иногда вызывает продолжительные глобальные пыльные бури, не имеющие аналогов в биосфере. На примере Марса еще раз показано, насколько биосфера Земли не похожа на природные миры соседних с ней планет [14].

Заключение

Учение о биосфере В. И. Вернадского, подтвержденное его многочисленными последователями, обосновывает ведущую роль живых организмов в создании уникальной природы Земли, которая является для них оптимальной средой обитания. Это положение находит дополнительное подтверждение при сравнении биосферы с природными мирами планет земного типа.

Считается, что внутренние планеты возникли в одно и то же время, развивались сходным образом, вышли из единого протопланетного облака, и они должны быть похожи по своим природным особенностям. Однако, как сейчас выяснено, природа Земли радикально отличается от природы соседних с ней планет по всем характеристикам.

Затухание вулканизма на соседних планетах связывается с нехваткой внутренней энергии, прежде всего ядерной. Несомненно, это сказывается на отсутствии геомагнетизма и магнитосферы, что открывает пути для космических облучений поверхности. Земля в силу действия малого биотического и большого геологического круговоротов вещества и энергии, происходящих благодаря функционированию живых организмов, имеет каналы передачи солнечной и органической энергии в глубокие горизонты коры. Данный факт способствует геологической активности недр планеты, сопровождаемой мощным геомагнетизмом и, соответственно, наличием магнитосферы, что логично подтверждает причины отличий.

Генезис уникальной гидросферы Земли неясен, но на других планетах уже миллионы или, возможно, даже миллиарды лет ее нет. Исходя из, по-видимому, единственного предположения, можно заключить, что ее наличие обязано живым организмам, которые, влияя на климат, способствуют сохранению воды. Более того, основные показатели гидросферы (соленость, кислотность, изотопный состав) благодаря живым организмам находятся в оптимальных для гидробионтов значениях.

Атмосфера на соседних планетах либо отсутствует, либо содержит древние вулканические газы, не испытывавшие эволюции по причине отсутствия фотосинтезирующих живых организмов. Между тем атмосфера Земли является следствием развития живых организмов, удовлетворяющих свои потребности, причем в отличие от температурных параметров газовых оболочек других планет температурные параметры атмосферы Земли варьируют в значениях, благоприятных для живых организмов.

Сравнительный анализ природы Земли и соседних с ней планет позволяет сделать вывод о том, что живых организмов на Меркурии, Венере, Марсе и Луне нет и, по-видимому, никогда не было. Все биогеохимические изменения в биосфере происходят при участии живых организмов или в созданной ими среде.

Библиографические ссылки

1. Григорьев АА. *Развитие теоретических проблем физической географии (1917–1934 гг.)*. Москва: Наука; 1965. 246 с.
2. Преображенский ВС. Географическая оболочка, ноосфера, география. *Известия Академии наук СССР. Серия географическая*. 1988;4:27–37.

3. Вернадский ВИ. *Химическое строение биосферы Земли и ее окружения*. Москва: Наука; 2001. 374 с.
4. Вернадский ВИ. *Живое вещество*. Москва: Наука; 1978. 358 с.
5. Вассоевич НБ. Учение о биосфере (1802 – 1876 – 1926). *Известия Академии наук СССР. Серия геологическая*. 1977;1:5–13.
6. Кадацкий ВБ. *Биосфера как система*. Минск: Беларуская навука; 1997. 151 с.
7. Вайнберг С. *Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной*. Берков АВ, переводчик. Москва: Энергоиздат; 1981. 209 с.
8. Виноградов АП. *Введение в геохимию океанов*. Москва: Наука; 1980. 192 с.
9. Ферронский ВИ, Поляков ВА. *Изотопия гидросферы Земли*. Москва: Научный мир; 2009. 632 с.
10. Бudyko МИ, Ронов АБ, Яншин АЛ. *История атмосферы*. Ленинград: Гидрометеоздат; 1985. 208 с.
11. Войткевич ГВ. *Происхождение и химическая эволюция Земли*. Москва: Наука; 1973. 168 с.
12. Вернадский ВИ. Несколько слов о ноосфере. *Успехи современной биологии*. 1944;18(2):113–120.
13. Кадацкий ВБ. *Климат как продукт биосферы*. Левков ЭА, редактор. Минск: Наука и техника; 1986. 110 с.
14. Кадацкий ВБ. Уроки биосферы. В: Ермаков ВВ, редактор. *Современные проблемы состояния и эволюции таксонов биосферы*. Москва: Институт геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского РАН; 2017. с. 28–34. EDN: QNPQBJ.

References

1. Grigor'ev AA. *Razvitie teoreticheskikh problem fizicheskoi geografii (1917–1934 gg.)* [Development of theoretical problems of physical geography (1917–1934)]. Moscow: Nauka; 1965. 246 p. Russian.
2. Preobrazhenskii VS. [Geographical envelope, noosphere, geography]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geograficheskaya*. 1988;4:27–37. Russian.
3. Vernadskii VI. *Khimicheskoe stroenie biosfery Zemli i ee okruzeniya* [Chemical structure of the Earth's biosphere and its environment]. Moscow: Nauka; 2001. 374 p. Russian.
4. Vernadskii VI. *Zhivoe veshchestvo* [Living matter]. Moscow: Nauka; 1978. 358 p. Russian.
5. Vassoevich NB. [The doctrine of the biosphere (1802 – 1876 – 1926)]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya*. 1977;1:5–13. Russian.
6. Kadatsky VB. *Biosfera kak sistema* [Biosphere as a system]. Minsk: Belaruskaja navuka; 1997. 151 p. Russian.
7. Weinberg S. *Pervye tri minuty. Sovremennyi vzglyad na proiskhozhdenie Vselennoi* [The first three minutes. A modern view of the origin of the Universe]. Berkov AV, translator. Moscow: Energoizdat; 1981. 209 p. Russian.
8. Vinogradov AP. *Vvedenie v geokhimiyu okeanov* [Introduction to oceanic geochemistry]. Moscow: Nauka; 1980. 192 p. Russian.
9. Ferronskii VI, Polyakov VA. *Isotopy of the Earth hydrosphere*. Moscow: Nauchnyi mir; 2009. 632 p. Russian.
10. Budyko MI, Ronov AB, Yanshin AL. *Istoriya atmosfery* [History of the atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. 208 p. Russian.
11. Voitkevich GV. *Proiskhozhdenie i khimicheskaya evolyutsiya Zemli* [Origin and chemical evolution of the Earth]. Moscow: Nauka; 1973. 168 p. Russian.
12. Vernadskii VI. [A few words about the noosphere]. *Uspexi sovremennoi biologii*. 1944;18(2):113–120. Russian.
13. Kadatsky VB. *Klimat kak produkt biosfery* [Climate as a product of the biosphere]. Levkov EA, editor. Minsk: Nauka i tekhnika; 1986. 110 p. Russian.
14. Kadatsky VB. [Lessons from the biosphere]. In: Ermakov VV, editor. *Sovremennye problemy sostoyaniya i evolyutsii taksonov biosfery* [Modern problems of the state and evolution of biosphere taxa]. Moscow: Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences; 2017. p. 28–34. Russian. EDN: QNPQBJ.

Получена 27.12.2023 / исправлена 28.02.2024 / принята 29.02.2024.
Received 27.12.2023 / revised 28.02.2024 / accepted 29.02.2024.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОЛЕБАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ РЕК БЕЛАРУСИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ

А. А. ВОЛЧЕК¹⁾, Д. А. ШПОКА¹⁾

¹⁾Брестский государственный технический университет,
ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования колебаний максимальных уровней воды рек Беларуси по данным 67 рек, в том числе крупных рек, за 1877–2020 гг. Установлено влияние природных и антропогенных факторов на основные статистические параметры временных рядов максимальных уровней воды рек Беларуси. Предложена методика прогнозирования максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья, которая рассмотрена на конкретном примере.

Ключевые слова: уровень воды; весеннее половодье; гидрологический створ; тренды; модели; прогнозные оценки.

PATTERNS OF FLUCTUATIONS IN THE MAXIMUM WATER LEVELS OF THE RIVERS OF BELARUS: CURRENT STATE AND FORECAST

A. A. VOLCHAK^a, D. A. SHPOKA^a

^aBrest State Technical University, 267 Maskowskaja Street, Brest 224017, Belarus
Corresponding author: A. A. Volchak (volchak@tut.by)

Abstract. The results of a study of fluctuations in maximum water levels based on data from 67 rivers of Belarus, including large rivers, for 1877–2020 are presented. The influence of natural and anthropogenic factors on the main statistical parameters of the time series of the maximum water levels of the rivers of Belarus has been established. A method for predicting the maximum water levels of the spring flood is proposed, which is considered on a specific example.

Keywords: water level; spring flood; hydrological range; trends; models; forecast estimates.

Образец цитирования:

Волчек АА, Шпока ДА. Закономерности колебания максимальных уровней воды рек Беларуси: современное состояние и прогноз. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;1:45–61.
EDN: SXQWRZ

For citation:

Volchak AA, Shpoka DA. Patterns of fluctuations in the maximum water levels of the rivers of Belarus: current state and forecast. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;1:45–61. Russian.
EDN: SXQWRZ

Авторы:

Александр Александрович Волчек – доктор географических наук, профессор; профессор кафедры природообустройства факультета инженерных систем и экологии.

Дарья Александровна Шпока – ведущий специалист по организации учебного процесса факультета инженерных систем и экологии.

Authors:

Alexander A. Volchak, doctor of science (geography), full professor; professor at the department of environmental engineering, faculty of engineering systems and ecology.
volchak@tut.by

Darya A. Shpoka, leading specialist in educational process organisation, faculty of engineering systems and ecology.
daryashpoka@rambler.ru

Введение

Уровенный режим рек является важной гидрологической характеристикой, необходимой для решения различных теоретических и практических задач в области гидрологии и водного хозяйства. Установление закономерностей пространственно-временных колебаний уровней воды рек позволяет разработать прогнозные модели их уровенного режима. Особое внимание следует уделять изучению максимальных уровней воды, формирующихся на реках Беларуси, как правило, в период весеннего половодья. Половодья выступают неотъемлемой составляющей гидрологического цикла речных экосистем. Проблемы возникают при превращении половодий в наводнения, при которых образуются максимальные уровни воды, происходят затопление и подтопление территорий, занятых промышленными предприятиями, жилыми застройками, сельскохозяйственными полями и угодьями, что приводит к экономическим ущербам и даже человеческим жертвам [1]. Поэтому разработка прогнозных моделей уровенного режима рек является актуальной задачей.

В настоящее время фундаментальных работ, в которых рассматривается уровенный режим рек Беларуси, насчитывается недостаточно для получения полной картины. Имеются отдельные исследования, касающиеся частных вопросов на примерах отдельных рек. Еще меньше работ посвящено моделированию и прогнозированию уровней воды рек страны [2–6].

Практические прогнозные расчеты максимальных уровней воды базируются на принятии гипотезы стационарности естественного процесса их многолетних колебаний, т. е. допустимости переноса режимных характеристик за прошлые годы на будущий период в неизменном виде. Данный подход хорошо зарекомендовал себя при проектировании и эксплуатации большого числа водохозяйственных объектов и гидротехнических сооружений. Однако при разработке методов прогнозирования уровенного режима рек статистическая концепция описания многолетних колебаний максимальных уровней воды в ее традиционной интерпретации не является перспективной. Этот факт связан с тем, что предел предсказуемости стохастических моделей максимальных уровней воды рек на основе марковской последовательности первого порядка равен 1–2 годам при обеспеченности прогноза менее 60 % [1; 7]. Кроме того, возрастающая антропогенная нагрузка, глобальные климатические изменения и другие факторы, несомненно, влияют на статистические параметры временных рядов максимальных уровней воды рек, которые требуют специальных исследований.

Следующим этапом развития концепции случайности применительно к анализу и прогнозу значений временных корреляций максимальных уровней воды рек может стать разработка многомерных эмпирико-статистических моделей множественной регрессии. При этом в многомерном пространстве вектора-предиктора за предшествующий период необходимо определить их пригодность для использования при разработке прогнозов с помощью уравнений множественной регрессии, линейной регрессии, кусочно-линейных уравнений, нейронных сетей и др. Сложными задачами представляются доказательство возможности распространения выявленных зависимостей на прогнозируемый период и прогноз самого вектора-предиктора [8; 9].

Цели настоящего исследования – установление закономерностей пространственно-временных колебаний максимальных уровней воды рек Беларуси, особенностей влияния на их режим природных и антропогенных факторов и разработка соответствующих прогнозных моделей.

Материалы и методы исследования

В основе исследования лежат материалы наблюдений Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды за максимальными уровнями воды рек Беларуси по данным 67 гидрологических створов, расположенных на реках страны, за 1877–2020 гг. Для оценки временной структуры максимальных уровней воды использовались данные крупных рек, имеющих длительный период наблюдений (144 года), а именно р. Березины в створе г. Бобруйска, р. Днепр в створах городов Орши и Речицы, р. Западной Двины в створе г. Витебска, р. Неман в створе г. Гродно, а также р. Припяти в створе г. Мозыря [10]. Пропуски в рядах наблюдений восстанавливались с помощью программного комплекса «Гидролог-2» общепринятыми методами гидрологической аналогии с применением данных рек-аналогов¹ [11; 12].

При невозможности подобрать реку-аналог пропуски восстанавливались по уравнению

$$H_{\max} = f(Q_{\max}),$$

где H_{\max} – максимальный уровень воды реки, см; Q_{\max} – максимальный расход воды реки, м³/с.

¹Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения : ТКП 45-3.04-168-2009(02250). Минск : Стройтех-норм, 2010. 55 с.

Искомое значение было получено по наблюдаемым величинам:

$$H_{\max}(t) = a_1 \ln(Q_{\max}(t)) + b_1, \quad (1)$$

где t – расчетный год; a_1, b_1 – эмпирические коэффициенты.

Многолетние колебания максимальных уровней воды в период весеннего половодья H рассматриваются как случайный процесс $H(t)$ с дискретным временем $t \in T$, принимающий целые значения. В частности, значения $t = 1, 2, \dots, k$ относятся к имеющемуся в распоряжении ряду наблюдений за k лет, значения $t = 0, k - 1, k - 2, \dots$ – к предыдущему периоду времени, значения $t = k + 1, k + 2, \dots$ – к следующему. Для описания процесса $H(t)$ задействованы функции математического ожидания $m(t) = M\{H(t)\}$, дисперсии $D(t) = D\{H(t)\}$, среднего квадратического отклонения $\sigma(t) = \sqrt{D(t)}$, распределения вероятностей $F(x, t) = P\{H(t) < x\}$, автокорреляционная функция $R(t, \tau) = \text{corr}\{H(t), H(t + \tau)\}$ и другие инструменты² [13].

Оценка однородности временных рядов максимальных уровней воды осуществлялась на основе генетического анализа условий формирования речного стока путем выявления причин, объясняющих неоднородность исходных данных наблюдений. Первичный анализ однородности гидрологических рядов выполнялся графическими методами, которые предусматривают построение суммарных (интегральных) кривых связи уровней и времени по формуле

$$\sum_{t=1}^T H_{\max} = f(t), \quad (2)$$

где $\sum_{t=1}^T H_{\max}$ – нарастающая сумма максимальных уровней воды во времени; T – период наблюдений³.

Статистическая однородность исследуемых временных рядов максимальных уровней воды рек в период весеннего половодья оценивалась с помощью параметрических тестов, в частности различия в средних значениях измерялись t -критерием Стьюдента, а различия в характере колебаний уровня режима – F -критерием Фишера по формулам

$$t_{\text{кр}} = \frac{\bar{H}_{\max_1} - \bar{H}_{\max_2}}{\sqrt{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}},$$

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2},$$

где $\bar{H}_{\max_1}, \bar{H}_{\max_2}$ – выборочные средние значения максимальных уровней воды; σ_1^2, σ_2^2 – выборочные дисперсии; n_1, n_2 – объемы выборок⁴ [13; 14].

Полученные значения t -критерия Стьюдента и F -критерия Фишера сравнивались с их критическими величинами при заданном уровне значимости ($\alpha = 5\%$). При $t_{\text{кр}} > t_{\text{кр}, \alpha}$ принимается гипотеза статистического различия двух выборочных средних значений, при $F > F_{\alpha}$ – гипотеза статистического различия в колебаниях рассматриваемых рядов.

Тенденция колебаний максимальных уровней воды оценивалась с использованием линейных трендов по уравнению

$$H_{\max}(t) = H_{\max}(0) \pm \Delta H_{\max} t, \quad (3)$$

где $H_{\max}(0)$ – максимальный уровень воды реки в начальный момент времени, см; $\pm \Delta H_{\max}$ – средний градиент скорости изменения максимального уровня воды за год, см [9; 10].

Измерение степени влияния различных факторов на уровеньный режим рек осуществлялось сравнительными методами за отдельные периоды. Для этого исходные временные ряды максимальных уровней воды разбиты на следующие интервалы: период до 1965 г. (отсутствие массовых мелиораций, минимальное антропогенное воздействие и условно-естественный водный режим) и период с 1966 по 2020 г. (антропогенное воздействие и потепление климата). Последний, в свою очередь, разделен на период 1966–1987 гг. (массовые мелиорации) и период 1988–2020 гг. (современные климатические изменения).

²Волчек А. А. Гидрологические расчеты : учеб. пособие. М. : Кнорус, 2021. 418 с.

³Там же.

⁴Статистические методы в природопользовании : учеб. пособие / В. Е. Валуев [и др.]. Брест : Брест. политехн. ин-т, 1999. 252 с.

В работе использованы статистические методы анализа временных рядов, в основе которых лежат научные представления о стохастической природе изменчивости уровня режима рек. Метод системного анализа накопленной информации и сравнительно-географический метод позволили синтезировать наиболее важные закономерности временных колебаний максимальных уровней воды⁵ [13].

При построении прогнозных моделей, когда тренд явно не выражен, рассматривались выборочные автокорреляционные и частные автокорреляционные функции процесса формирования максимальных уровней воды рек, с помощью которых определялся характер изменения уровня режима. При этом применялись критерии оценки степени нестационарности процесса и выбора модели, приведенные в публикациях [8; 15; 16].

Практический интерес представляет выявление закономерностей в динамике максимальных уровней воды рек, а именно плавного возрастания или убывания (монотонного тренда), периодических изменений (циклического тренда), постоянства в течение каких-то периодов времени и резкого изменения при переходе от одного отрезка к другому (ступенчатого тренда). Эти ситуации могут быть описаны полиномиальной аппроксимацией тренда вида

$$H_{\max}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i h_i(t),$$

где $h_i(t)$ – заданные функции времени; a_0, \dots, a_k – коэффициенты регрессии [8].

Функции времени могут быть либо линейными, степенными, показательными или логарифмическими при монотонном тренде, либо тригонометрическими при циклическом тренде и кусочно-постоянными при ступенчатом тренде. Во всех этих случаях параметры a_0, \dots, a_k оцениваются по имеющемуся ряду наблюдений $H_{\max,1}, \dots, H_{\max,n}$.

Результаты проведенных нами исследований закономерностей многолетних колебаний максимальных уровней воды рек Беларуси позволяют считать установленным наличие определенной связи между стоками смежных лет [17–19]. Данный факт служит основанием для описания максимальных уровней воды в виде простой марковской цепи

$$H_{\max}(t) = r(1)H_{\max}(t-1) + \xi(t),$$

где $r(1)$ – коэффициент автокорреляции; $\xi(t)$ – независимая от \bar{H}_{\max} случайная величина [8].

Первое слагаемое в правой части уравнения (4) можно трактовать как максимальный уровень воды, который обусловлен зимними атмосферными осадками предшествующего года, аккумулярованными бассейном реки, и сбросом их в русло в данном году. При этом случайная величина $\xi(t)$, очевидно, должна включать в себя и часть максимального уровня воды текущего года, сформированную за счет зимних осадков этого года. Запишем следующее уравнение:

$$H_{\max}(t) = a_2 H_{\max}(t-1) + b_2 W_{\text{ос}}(t) + \xi(t), \quad (4)$$

где a_2, b_2 – эмпирические коэффициенты; $W_{\text{ос}}(t)$ – осадки, предшествующие половодью текущего года [8].

Результаты и их обсуждение

Пространственная структура средних максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья по данным инструментальных наблюдений до 2015 г. в абсолютных отметках представлена на рис. 1. Она устойчиво коррелирует с рельефом Беларуси и максимальными расходами рек во время весеннего половодья [3; 20]. Наибольшие значения максимальных уровней воды рек наблюдаются в центре страны, в районе Белорусской антеклизы и Вилейского погребенного выступа, а также на ее северо-востоке, вблизи городов Шклова и Горки. Их наименьшие значения фиксируются на западе и юго-востоке страны.

На рис. 2 представлена пространственная структура изменений средних максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья за выбранные расчетные интервалы.

Для анализа временной структуры максимальных уровней воды отобраны крупные реки Беларуси, имеющие наибольший период наблюдений – с 1877 по 2020 г. Не измеренные значения за отдельные годы восстановлены с применением данных рек-аналогов⁶. В случае невозможности подбора реки-аналога использовано уравнение (1) с коэффициентами, приведенными в табл. 1.

⁵Статистические методы в природопользовании... 252 с.

⁶Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения... 55 с.

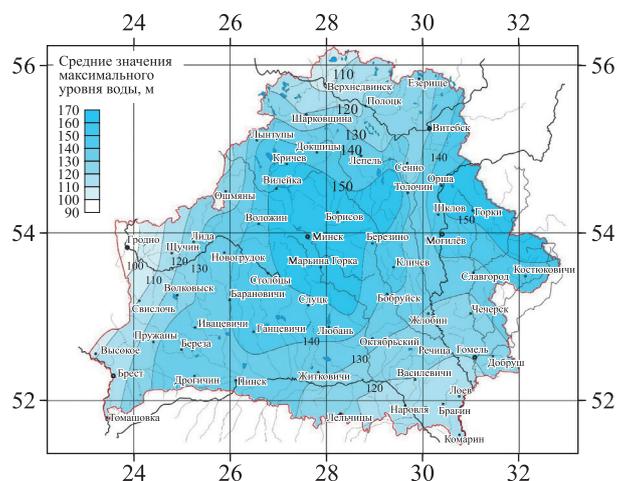


Рис. 1. Пространственная структура средних значений максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья по данным инструментальных наблюдений до 2015 г. в абсолютных отметках

Fig. 1. Spatial structure of the average values of maximum water levels of the rivers of Belarus during the spring flood period according to instrumental observations up to 2015 in absolute marks

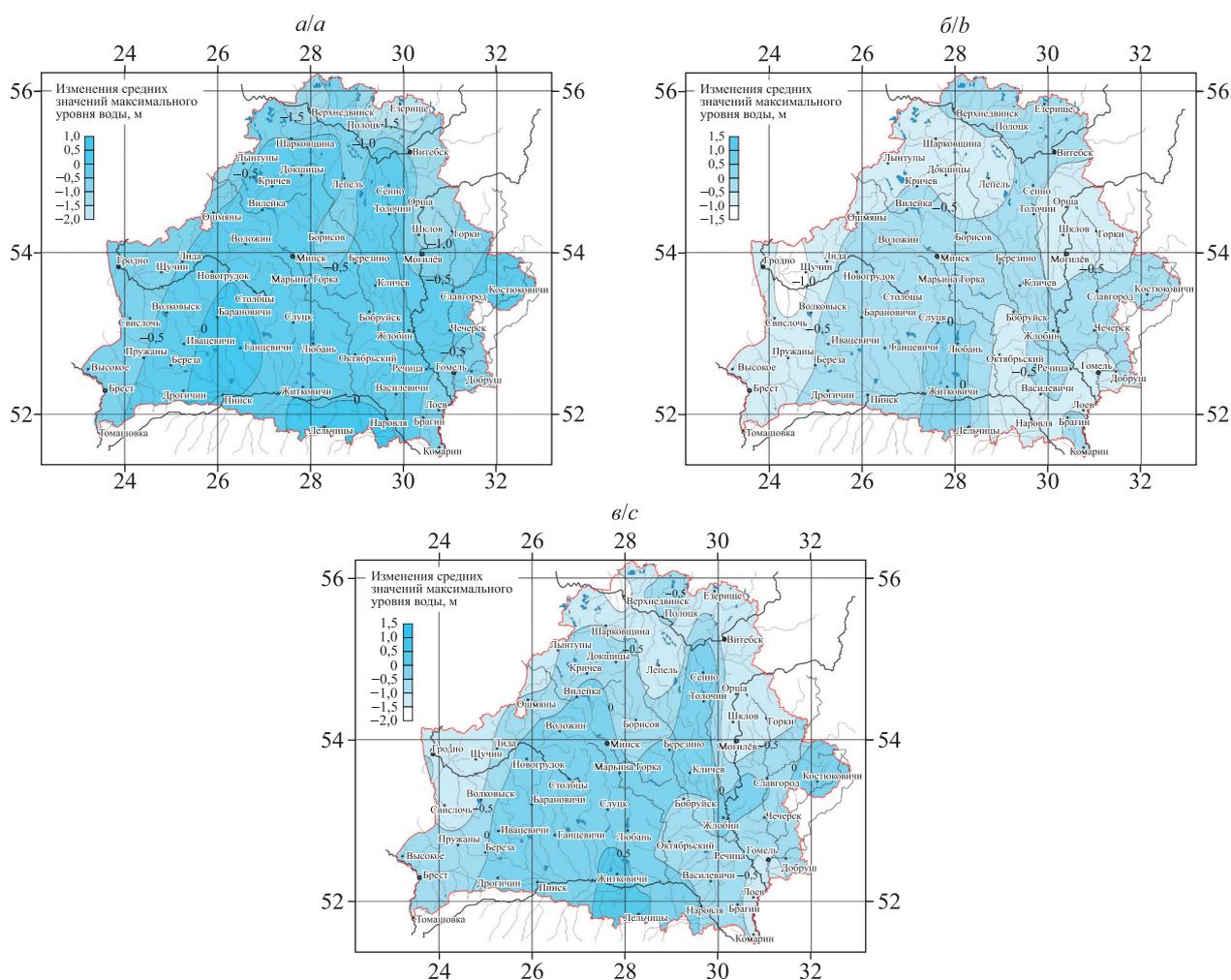


Рис. 2. Пространственная структура изменений средних значений максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья за различные интервалы в абсолютных отметках:

а – за 1877–1965 гг. по отношению к 1966–1987 гг.; б – за 1966–1987 гг. по отношению к 1988–2015 гг.; в – за 1877–1965 гг. по отношению к 1966–2015 гг.

Fig. 2. Spatial structure of changes in average values of maximum water levels of the rivers of Belarus during the spring flood period over various intervals in absolute marks: а – for 1877–1965 in relation to 1966–1987; б – for 1966–1987 in relation to 1988–2015; в – for 1877–1965 in relation to 1966–2015

Таблица 1

Эмпирические коэффициенты уравнения (1)
для анализа временной структуры максимальных уровней воды рек Беларуси
в период весеннего половодья за отдельные годы

Table 1

Empirical coefficients of the equation (1)
for analysing the time structure of the maximum water levels of rivers of Belarus
during the spring flood period for individual years

Река	Годы с отсутствием измеренных уровней	Нуль поста, мБС	Коэффициенты		
			a_1	b_1	r
Березина в створе г. Бобруйска	1877–1880, 1918–1920, 1940, 1942–1944	132,17	132,78	–494	0,94
Днепр в створе г. Орши	1877–1880, 1923, 1924, 1942–1944	148,96	345,46	–1753	0,98
Днепр в створе г. Речицы	1877–1894, 1931–1934	114,47	124,16	–500	0,95
Западная Двина в створе г. Витебска	1942–1944	123,72	446,62	–2507	0,96
Неман в створе г. Гродно	1877–1880, 1916–1921, 1937, 1938, 1944	91,31	230,85	–1168	0,90
Припять в створе г. Мозыря	1877–1880, 1918, 1942	110,93	182,69	–829	0,97

Примечания: 1. Здесь и далее значения приведены в метрах по Балтийской системе высот (мБС), символом r обозначен коэффициент корреляции. 2. Полу жирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

После восстановления пропущенных значений временные ряды максимальных уровней воды в период весеннего половодья проверялись на однородность с использованием интегральной кривой (формула (2)). Как показал анализ, все исследуемые временные ряды являются однородными, что позволяет использовать стандартные статистические методы.

Наибольшие значения максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья за 1877–2020 гг. представлены в табл. 2. К катастрофическим наводнениям относятся наводнения, которые повторяются раз в 100–200 лет и реже. Такие наводнения отмечались на р. Березине в створе г. Бобруйска и р. Днепр в створе г. Орши (536 и 949 см соответственно).

Таблица 2

Наибольшие значения максимальных уровней воды рек Беларуси
в период весеннего половодья за 1877–2020 гг.

Table 2

The highest values of the maximum water levels of rivers of Belarus
during the spring flood period for 1877–2020

Река	Нуль поста, мБС	H_{\max} , см	Дата
Березина в створе г. Бобруйска	132,17	536	26 апреля 1931 г.
Днепр в створе г. Орши	148,96	949	23 апреля 1931 г.
Днепр в створе г. Речицы	114,47	584	24–26 апреля 1958 г.
Западная Двина в створе г. Витебска	123,72	1268	28 апреля 1931 г.
Неман в створе г. Гродно	91,31	893	23 апреля 1958 г.
Припять в створе г. Мозыря	110,93	742	22–24 апреля 1895 г.

Хронологический многолетний ход максимальных уровней воды исследуемых рек Беларуси в период весеннего половодья представлен на рис. 3.

Как видно из рис. 3, повсеместно наблюдается снижение максимальных уровней воды, особенно во время массовых крупномасштабных мелиораций. При стабилизации мелиоративных воздействий и современном потеплении климата эти процессы замедляются и речные экосистемы принимают новое устойчивое равновесие.

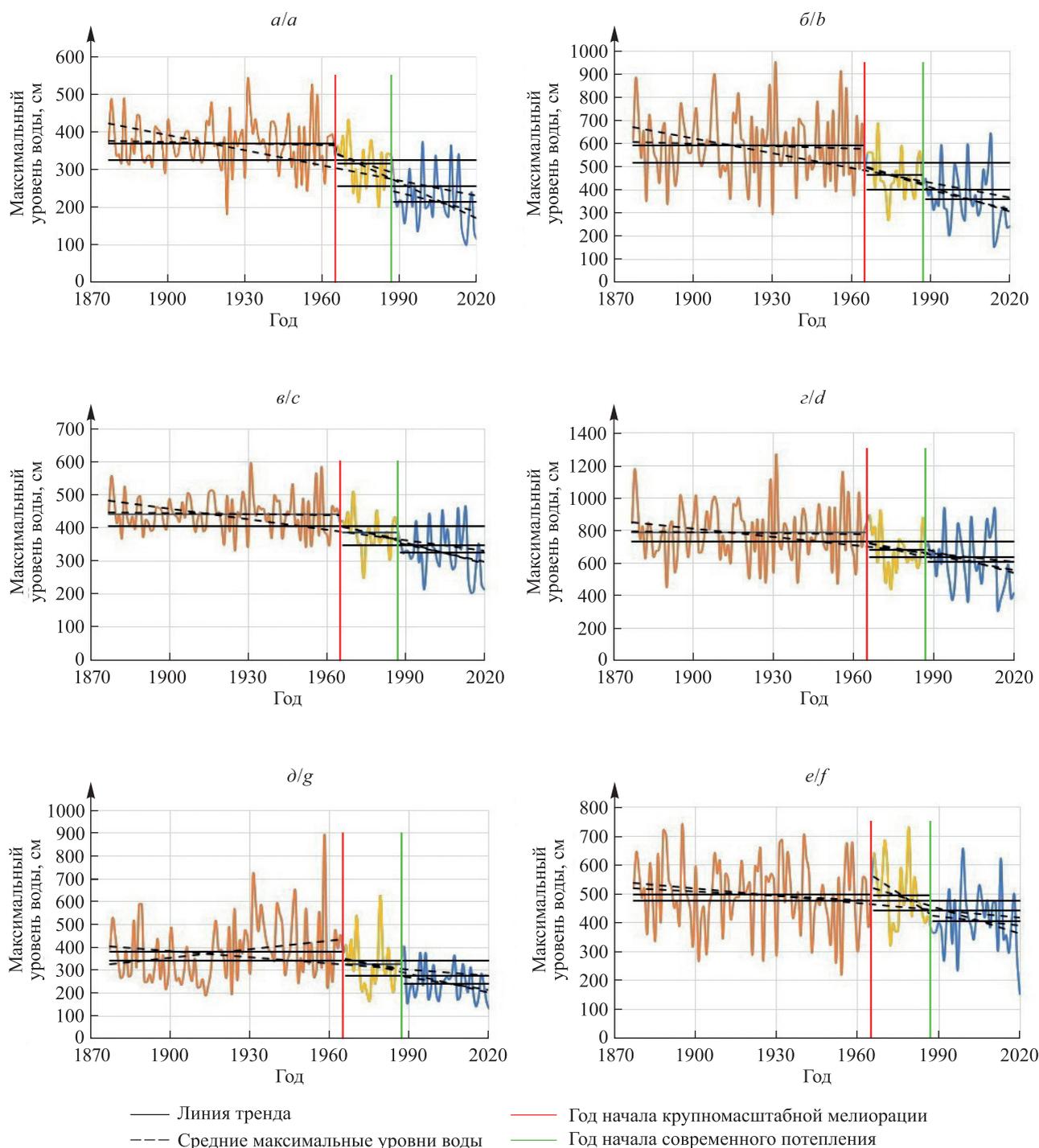


Рис. 3. Хронологический многолетний ход максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья:

a – р. Березины в створе г. Бобруйска; *б* – р. Днепр в створе г. Орши;
в – р. Днепр в створе г. Речицы; *г* – р. Западной Двины в створе г. Витебска;
д – р. Неман в створе г. Гродно; *е* – р. Припяти в створе г. Мозыря

Fig. 3. Chronological long-term course of maximum water levels of rivers of Belarus during the spring flood period:

a – Berezina River in the Bobruisk section; *b* – Dnipro River in the Orsha section;
c – Dnipro River in the Rechitsa section; *d* – Zapadnaya Dvina River in the Vitebsk section;
g – Neman River in the Grodno section; *f* – Pripyat River in the Mozyr section

В ходе анализа временных рядов максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья по данным крупных рек получены выборочные оценки основных статистических характеристик за рассматриваемые интервалы (табл. 3).

Таблица 3

Основные статистические характеристики максимальных уровней воды рек Беларуси
в период весеннего половодья за различные интервалы

Table 3

Main statistical characteristics of maximum water levels of the rivers of Belarus
during the spring flood period over various intervals

Период наблюдений	Количество лет наблюдений	H_{\max} , см	Коэффициенты		
			C_v	C_s	$r(1)$
<i>Березина в створе г. Бобруйска</i>					
1877–2020	144	326	0,28	–0,36	0,45
1877–1965	89	370	0,17	0,08	–0,14
1966–2020	55	255	0,32	0,11	0,38
1966–1987	22	316	0,19	–0,29	0,04
1988–2020	33	215	0,32	0,68	0,03
<i>Днепр в створе г. Орши</i>					
1877–2020	144	519	0,32	0,24	0,29
1877–1965	89	592	0,24	0,23	–0,18
1966–2020	55	402	0,30	0,21	0,29
1966–1987	22	463	0,20	0,42	0,04
1988–2020	33	361	0,33	0,60	0,19
<i>Днепр в створе г. Речицы</i>					
1877–2020	144	406	0,19	–0,38	0,40
1877–1965	89	442	0,12	0,33	–0,18
1966–2020	55	349	0,20	–0,14	0,32
1966–1987	22	385	0,14	–0,19	0,15
1988–2020	33	325	0,22	0,24	0,21
<i>Западная Двина в створе г. Витебска</i>					
1877–2020	144	729	0,25	0,17	0,18
1877–1965	89	787	0,21	0,28	–0,12
1966–2020	55	637	0,25	0,04	0,28
1966–1987	22	679	0,19	0,25	0,15
1988–2020	33	609	0,29	0,24	0,28
<i>Неман в створе г. Гродно</i>					
1877–2020	144	342	0,38	1,08	0,27
1877–1965	89	382	0,34	1,03	0,09
1966–2020	55	277	0,35	1,20	0,25
1966–1987	22	300	0,46	–0,08	0,16
1988–2020	33	243	0,30	0,62	–0,09
<i>Припять в створе г. Мозыря</i>					
1877–2020	144	477	0,25	–0,06	0,09
1877–1965	89	498	0,24	–0,27	–0,07
1966–2020	55	441	0,26	0,25	0,25
1966–1987	22	494	0,22	0,52	0,27
1988–2020	33	406	0,26	0,05	0,01

Примечания: 1. Здесь и далее C_v – коэффициент вариации, C_s – коэффициент асимметрии. 2. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

Исходя из табл. 3, средние значения максимальных уровней воды в период весеннего половодья за 1877–2020 гг. составляют на р. Березине в створе г. Бобруйска 326 см, на р. Днепр в створе г. Орши 519 см, на р. Днепр в створе г. Речицы 406 см, на р. Западной Двине в створе г. Витебска 729 см, на р. Неман в створе г. Гродно 342 см и на р. Припяти в створе г. Мозыря 477 см. Наибольшие значения средних максимальных уровней воды наблюдались с начала инструментальных наблюдений до начала крупномасштабной мелиорации – с 1877 по 1965 г.

Коэффициент вариации за 1988–2020 гг. больше аналогичного показателя за 1877–2020 гг. у всех рек, кроме р. Неман в створе г. Гродно. Наименьший размах колебаний максимальных уровней воды в период весеннего половодья зафиксирован на р. Днепр в створе г. Речицы ($C_v = 0,19$), а наибольший – на р. Неман в створе г. Гродно ($C_v = 0,38$). Наблюдается положительная асимметрия. Соответствующие коэффициенты не превышают значения 1, что свидетельствует о распределении, близком к нормальному. Несильная асимметрия свойственна анализируемым параметрам р. Неман в створе г. Гродно. Коэффициенты автокорреляции, которые характеризуют внутрирядные связи хронологических величин максимальных уровней воды, за период наблюдений являются значимыми для максимальных уровней воды всех рек, кроме р. Припяти в створе г. Мозыря.

Эмпирические кривые обеспеченности отвечают трехпараметрическому гамма-распределению при $C_s = (1-2)C_v$. Поскольку функция распределения вероятностей максимальных уровней воды в период весеннего половодья при таких оценках параметров несущественно отличается от функции нормального распределения, применение параметрических критериев для проверки статистических гипотез можно считать допустимым.

Тенденции в колебаниях максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья измерялись с помощью линейных трендов, параметры которых приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры линейных трендов временных рядов максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья для различных интервалов

Table 4

Parameters of linear trends of time series of maximum water levels of the rivers of Belarus during the spring flood period for various intervals

Река	Параметры	Период наблюдений				
		1877–2020	1877–1965	1966–2020	1966–1987	1988–2020
<i>Линейный тренд (см. уравнение (3))</i>						
Березина в створе г. Бобруйска	$\pm \Delta$	-13,31	-1,24	-31,48	-22,20	-17,16
	r	-0,62	-0,05	-0,62	-0,24	-0,24
Днепр в створе г. Орши	$\pm \Delta$	-21,47	-3,59	-34,88	-33,90	-27,70
	r	-0,55	-0,06	-0,47	-0,23	-0,23
Днепр в створе г. Речицы	$\pm \Delta$	-10,55	-1,02	-20,55	-16,32	-17,31
	r	-0,58	-0,05	-0,46	-0,20	-0,23
Западная Двина в створе г. Витебска	$\pm \Delta$	-16,34	-2,10	-30,34	-39,05	-44,40
	r	-0,38	-0,03	-0,30	-0,20	-0,24
Неман в створе г. Гродно	$\pm \Delta$	-8,98	12,40	-27,33	-17,78	-18,96
	r	-0,29	-0,24	-0,45	-0,11	-0,25
Припять в створе г. Мозыря	$\pm \Delta$	-8,42	-5,03	-29,30	-61,74	-10,72
	r	-0,29	-0,11	-0,41	-0,37	-0,10
<i>Зависимость между максимальным уровнем и максимальным расходом воды реки (см. уравнение (1))</i>						
Березина в створе г. Бобруйска	a_1	131,71	102,78	146,80	109,50	151,17
	b_1	-486	-290	-590	-348	-625
	r	0,93	0,92	0,92	0,94	0,89
Днепр в створе г. Орши	a_1	342,66	356,50	307,64	320,78	286,26
	b_1	-1731	-1823	-1516	-1585	-1394
	r	0,96	0,93	0,95	0,97	0,94

Окончание табл. 4
Ending of the table 4

Река	Параметры	Период наблюдений				
		1877–2020	1877–1965	1966–2020	1966–1987	1988–2020
Днепр в створе г. Речицы	a_1	125,78	105,09	159,69	133,79	174,55
	b_1	-510	-352	-745	-560	-846
	r	0,95	0,94	0,93	0,98	0,91
Западная Двина в створе г. Витебска	a_1	446,92	464,11	405,39	426,43	404,10
	b_1	-2508	-2630	-2224	-2382	-2210
	r	0,96	0,96	0,96	1,0	0,94
Неман в створе г. Гродно	a_1	222,23	248,39	192,67	226,45	143,46
	b_1	-1111	-1291	-922	-1127	-631
	r	0,88	0,85	0,89	0,96	0,78
Припять в створе г. Мозыря	a_1	169,40	174,54	158,38	155,29	154,13
	b_1	-734	-770	-660	-631	-636
	r	0,93	0,96	0,88	0,87	0,86

Примечания: 1. Здесь и далее $\pm \Delta$ – средний градиент скорости изменения максимального уровня воды за 10 лет, см. Значение этого параметра вычислено по формуле (2). 2. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

Как видно из табл. 4, наибольшее значение среднего градиента скорости изменения максимальных уровней воды в период весеннего половодья наблюдалось за 1966–2020 гг. у всех рек, кроме р. Западной Двины в створе г. Витебска. Здесь же зафиксировано его наименьшее значение (-44,40 см за 10 лет), которое было зарегистрировано в 1988–2020 гг. Связь расходов и уровней воды является устойчивой и статистически значимой.

Рассмотрим устойчивость выборочных статистик (средних значений, коэффициентов вариации, коэффициентов автокорреляции) при изменении периодов осреднения применительно к максимальным уровням воды во время весеннего половодья ($n = 144$ года). При этом использовались данные пяти интервалов исследуемого временного ряда: 1) периода наблюдений (1877–2020); 2) периода естественного режима (1877–1965); 3) периода крупномасштабных мелиораций (1966–1987); 4) периода современных климатических изменений (1988–2020); 5) периода антропогенного воздействия и климатических изменений (1966–2020). В табл. 4 приведены основные статистические параметры этих интервалов, а в табл. 5 – матрица статистических критериев (t -критерия Стьюдента и F -критерия Фишера) и их критические значения.

Таблица 5

**Статистические критерии для различных интервалов
временного ряда максимальных уровней воды рек Беларуси
в период весеннего половодья и их критические значения**

Table 5

**Statistical criteria for different time series intervals
of the maximum water levels of the rivers of Belarus
during the spring flood period and their critical values**

Период наблюдений	Период наблюдений					
	1966–2020		1966–1987		1988–2020	
	t -Критерий Стьюдента для средних значений	F -критерий Фишера для дисперсий	t -Критерий Стьюдента для средних значений	F -критерий Фишера для дисперсий	t -Критерий Стьюдента для средних значений	F -критерий Фишера для дисперсий
<i>Березина в створе г. Бобруйска</i>						
1877–1965	8,87/1,99	1,65/1,48	3,79/2,03	1,16/1,89	11,23/2,01	1,18/1,57
1966–1987	3,61/2,01	1,91/1,92	–	–	–	–
1988–2020	2,47/2,0	1,40/1,73	5,78/2,01	1,37/2,0	–	–

Период наблюдений	Период наблюдений					
	1966–2020		1966–1987		1988–2020	
	<i>t</i> -Критерий Стьюдента для средних значений	<i>F</i> -критерий Фишера для дисперсий	<i>t</i> -Критерий Стьюдента для средних значений	<i>F</i> -критерий Фишера для дисперсий	<i>t</i> -Критерий Стьюдента для средних значений	<i>F</i> -критерий Фишера для дисперсий
<i>Днепр в створе г. Орши</i>						
1877–1965	8,55 /1,98	1,46/1,52	5,10 /2,01	2,34 /1,88	9,01 /2,0	1,49/1,68
1966–1987	2,38 /2,01	1,61/1,93	–	–	–	–
1988–2020	1,56/2,0	1,02/1,73	3,55 /2,01	1,57/2,0	–	–
<i>Днепр в створе г. Речицы</i>						
1877–1965	8,27 /1,99	1,69 /1,48	4,42 /2,03	1,03/1,88	8,47 /2,01	1,72 /1,57
1966–1987	2,41 /2,01	1,75/1,93	–	–	–	–
1988–2020	1,52/2,0	1,02/1,66	3,53 /2,01	1,79/2,0	–	–
<i>Западная Двина в створе г. Витебска</i>						
1877–1965	5,33 /1,98	1,01/1,52	3,34 /2,02	1,78/1,88	5,0 /2,0	1,09/1,57
1966–1987	1,21/2,01	1,62/1,93	–	–	–	–
1988–2020	0,74/2,0	1,20/1,66	1,71/2,01	1,95/2,0	–	–
<i>Неман в створе г. Гродно</i>						
1877–1965	5,50 /1,98	1,83 /1,52	2,02/2,02	1,45/1,88	7,41 /1,98	3,33 /1,68
1966–1987	1,89/2,03	1,26/1,75	–	–	–	–
1988–2020	1,86/1,99	1,82 /1,73	3,18 /2,03	2,29 /1,90	–	–
<i>Припять в створе г. Мозыря</i>						
1877–1965	2,84 /1,98	1,09/1,52	0,16/2,03	1,19/1,88	4,13 /2,0	1,29/1,68
1966–1987	1,88/2,02	1,09/1,93	–	–	–	–
1988–2020	1,47/1,99	1,18/1,73	2,96 /2,02	1,09/1,90	–	–

Примечания: 1. До косой черты приведены статистические критерии, после нее – их критические значения. 2. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

При изучении закономерностей многолетних колебаний уровня режима рек несомненный интерес представляет анализ динамики максимальных уровней воды и обобщенных характеристик атмосферной циркуляции. Для исследования в качестве последних обычно используются параметры классификации, разработанной Г. Я. Вангенгеймом и А. А. Гирсом и основанной на трех типах атмосферной циркуляции – западном (W), восточном (E) и меридиональном (С). Подробно этот вопрос для метеорологических рассматривается в монографии В. Ф. Логинова [21], в которой приведен их полный анализ.

Как видно из табл. 6, наибольшие значения среднегодовых максимальных уровней воды наблюдались в 1929–1939 гг. при восточном типе атмосферной циркуляции на р. Березине в створе г. Бобруйска (394 см) и р. Неман в створе г. Гродно (467 см). При меридиональном типе атмосферной циркуляции в 1940–1948 гг. на р. Днепр в створе г. Орши этот показатель составил 598 см, на р. Днепр в створе г. Речицы – 454 см, на р. Западной Двине в створе г. Витебска – 803 см, в 1877–1890 гг. на р. Припяти в створе г. Мозыря – 540 см. Средний градиент скорости изменения максимальных уровней воды в период весеннего половодья имеет максимальное значение в 2011–2020 гг. при восточном типе атмосферной циркуляции у всех рек, кроме р. Неман в створе г. Гродно. Что касается зависимости $H_{\max} = f(Q_{\max})$, тренды являются статистически значимыми, не прослеживается связь между максимальным уровнем и максимальным расходом воды р. Западной Двины в створе г. Витебска.

Проверка гипотезы однородности анализируемых параметров максимальных уровней воды для периодов с разными типами атмосферной циркуляции основана на использовании *t*-критерия Стьюдента и *F*-критерия Фишера. В то же время для отдельных интервалов с преобладанием того или иного типа атмосферной циркуляции выполняются условия стационарности. Переход от одного состояния к другому происходит в естественном режиме под воздействием внешних климатических факторов, существенно изменяющих соотношение между осадками и испарением в пределах территории бассейнов рек. В итоге можно сделать вывод о том, что многолетние колебания максимальных уровней воды рассматриваемых рек вызваны климатическими факторами, причина кроется в процессах крупномасштабного влагообмена в системе океан – атмосфера – суша [8].

Основные статистические параметры максимальных уровней воды рек Беларуси в период весеннего половодья для различных интервалов

Table 6

Main statistical parameters of maximum water levels of the rivers of Belarus during the spring flood period for various intervals

Период наблюдений	Количество лет наблюдений	Тип атмосферной циркуляции	$H_{\max}^{\text{ср}}, \text{см}$	C_v	$r(1)$	Статистические параметры			Зависимость между максимальным уровнем и максимальным расходом воды реки (см. уравнение (1))	
						Линейный тренд		r		
						$\pm \Delta$	a_1			b_1
<i>Бережина в створе г. Бобруйска</i>										
1877–1890	14	C	382	0,16	-0,10	-15,48	0,10	84,66	-169	0,80
1891–1928	38	W	363	0,15	-0,19	-0,04	0	104,51	-300	0,88
1929–1939	11	E	394	0,17	-0,08	-68,91	0,33	109,41	-328	0,99
1940–1948	9	C	377	0,15	0,10	-57,58	0,28	108,62	-331	0,85
1949–1964	16	E + C	357	0,23	-0,38	35,44	0,19	104,33	-305	0,99
1965–1988	24	E	314	0,18	0,04	-24,19	0,30	110,46	-354	0,94
1989–2010	22	W	229	0,28	-0,21	21,32	0,22	135,99	-535	0,83
2011–2020	10	E	181	0,41	0,24	-110,85	0,45	161,30	-695	0,99
<i>Днепр в створе г. Орши</i>										
1877–1890	14	C	594	0,25	-0,07	-163,70	0,45	333,44	-1636	0,82
1891–1928	38	W	595	0,22	0,19	-10,58	0,09	345,87	-1765	0,93
1929–1939	11	E	590	0,32	-0,64	-202,55	0,10	380,51	-1989	0,99
1940–1948	9	C	598	0,19	0,02	-107,53	0,25	325,37	-1606	0,96
1949–1964	16	E + C	584	0,28	-0,51	17,35	0,05	408,94	-2170	1,0
1965–1988	24	E	463	0,19	0,05	-30,10	0,07	317,69	-1568	0,96
1989–2010	22	W	373	0,27	-0,04	7,08	0,05	309,07	-1537	0,90
2011–2020	10	E	326	0,47	0,34	-275,39	0,55	275,14	-1323	0,98
<i>Днепр в створе г. Речицы</i>										
1877–1890	14	C	448	0,13	-0,13	-39,99	0,30	118,46	-445	0,87
1891–1928	38	W	440	0,10	0,01	3,03	0,07	90,56	-249	0,98
1929–1939	11	E	449	0,14	-0,27	-59,71	0,31	123,54	-480	0,94
1940–1948	9	C	454	0,11	-0,08	-32,83	0,18	109,51	-385	0,99

1949–1964	16	E + C	431	0,17	-0,42	17,81	0,11	119,59	-453	0,99
1965–1988	24	E	385	0,14	0,16	-18,57	0,25	134,13	-562	0,98
1989–2010	22	W	337	0,18	-0,05	17,12	0,18	166,24	-794	0,97
2011–2020	10	E	293	0,30	0,39	-157,94	0,54	185,25	-924	0,98
<i>Западная Двина в створе г. Витебска</i>										
1877–1890	14	C	779	0,22	0,31	-270,51	0,66	-270,51	0,66	0,31
1891–1928	38	W	786	0,20	0,10	-24,29	0,18	-24,29	0,18	0,10
1929–1939	11	E	789	0,30	-0,53	-339,73	0,48	-339,73	0,48	-0,53
1940–1948	9	C	803	0,13	-0,04	54,10	0,14	54,10	0,14	-0,04
1949–1964	16	E + C	780	0,25	-0,43	31,15	0,07	31,15	0,07	-0,43
1965–1988	24	E	688	0,18	0,24	-43,17	0,24	-43,17	0,24	0,24
1989–2010	22	W	631	0,25	0,07	10,76	0,04	10,76	0,04	0,07
2011–2020	10	E	551	0,39	0,42	-439,21	0,62	-439,21	0,62	0,42
<i>Неман в створе г. Гродно</i>										
1877–1890	14	C	390	0,32	0,06	19,60	0,07	181,79	-855	0,81
1891–1928	38	W	327	0,30	-0,01	28,34	0,32	220,35	-1138	0,77
1929–1939	11	E	467	0,27	0,13	-126,03	0,34	253,36	-1274	0,86
1940–1948	9	C	457	0,31	0,10	-144,67	0,28	270,77	-1397	0,96
1949–1964	16	E + C	406	0,40	-0,42	30,25	0,09	280,18	-1466	0,98
1965–1988	24	E	332	0,32	0,18	-11,29	0,08	223,91	-1112	0,96
1989–2010	22	W	249	0,28	-0,14	19,30	0,18	118,44	-472	0,70
2011–2020	10	E	213	0,29	0,12	-93,03	0,46	184,56	-898	0,94
<i>Припять в створе г. Мозыря</i>										
1877–1890	14	C	540	0,22	-0,15	46,62	0,16	125,50	-406	0,80
1891–1928	38	W	493	0,23	-0,15	14,42	0,14	191,95	-894	1,0
1929–1939	11	E	510	0,25	-0,13	-105,36	0,27	185,08	-847	1,0
1940–1948	9	C	509	0,23	0,38	-206,61	0,49	184,08	-841	0,99
1949–1964	16	E + C	460	0,30	-0,09	61,94	0,21	188,03	-863	0,99
1965–1988	24	E	490	0,22	0,31	-62,64	0,41	158,07	-653	0,87
1989–2010	22	W	424	0,22	0,03	40,23	0,28	122,56	-410	0,82
2011–2020	10	E	372	0,36	-0,14	-216,77	0,49	226,22	-1139	0,99

Примечания: 1. $H_{\max, \text{ср}}$ – среднегодовой максимальный уровень воды реки, см. 2. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые величины.

Построение прогнозных моделей

Рассмотрим методику прогнозирования максимальных уровней воды в период весеннего половодья на примере конкретной реки, в частности р. Березины в створе г. Бобруйска, так как она является самой крупной внутренней рекой Беларуси.

На первом этапе выполнен анализ полноты и корректности данных о максимальных уровнях воды реки. В силу различных обстоятельств здесь не велось наблюдения в годы, информация о которых представлена в табл. 1. С использованием данных рек-аналогов восстановлены пропущенные значения. В связи с тем, что во время Великой Отечественной войны не осуществлялся мониторинг всей гидрологической сети, применялось уравнение (1) с эмпирическими коэффициентами $a_1 = 132,78$, $b_1 = -494$, так как значения максимальных расходов были восстановлены ранее [4; 7]. Далее по формуле (2) проведена оценка однородности временного ряда графическим методом (рис. 4).

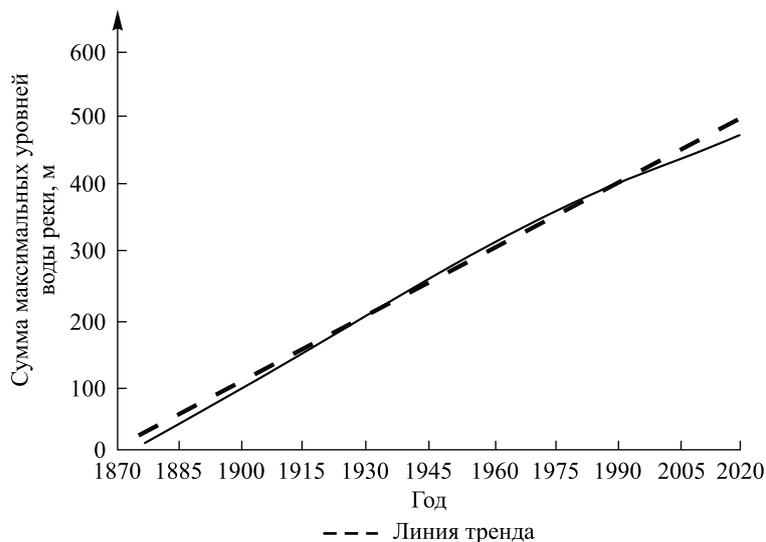


Рис. 4. Изменение нарастающей суммы максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска в период весеннего половодья во времени

Fig. 4. Change of the increasing sum of maximum water levels of the Berezina River in the Bobruisk section during the spring flood period over time

Как видно из рис. 4, наметилась тенденция к уменьшению величин максимальных уровней воды, что согласуется с результатами вышеприведенных исследований.

Для выбора структуры модели прогнозирования максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска рассмотрены автокорреляционная и частная автокорреляционная функции данного процесса, с помощью которых определяется характер изменения уровней воды (рис. 5).

Исследуемый временной ряд максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска не отвечает моделям, представленным в публикациях [9; 16] в полной мере. Поэтому он идентифицирован моделями AP(1) и AP(2).

Модель AP(1) имеет следующий вид:

$$H_{\max}(t) = \bar{H}_{\max} + r(1)[H_{\max}(t-1) - \bar{H}_{\max}] + \xi(t), \quad (5)$$

где $\xi(t)$ – белый гауссовский шум с нулевым средним значением. При этом $\sigma_{\xi} = \sigma_H \sqrt{1 - r(1)^2}$.

В соответствии с уравнением (5) для временного ряда максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска при $r(1) = 0,45$ и $\bar{H}_{\max} = 326$ см (см. табл. 3), а также при $\sigma_{\xi} = 80,45$ см и $\sigma = 90,09$ см получаем выражение

$$H_{\max}(t) = 0,45H_{\max}(t-1) + 179 + \xi(t).$$

В свою очередь, модель AP(2) имеет следующий вид:

$$H_{\max}(t) = \bar{H}_{\max} + r(1)[H_{\max}(t-1) - \bar{H}_{\max}] + r(2)[H_{\max}(t-2) - \bar{H}_{\max}] + \xi(t), \quad (6)$$

где $r(2)$ – коэффициент автокорреляции при сдвиге на 2 года.

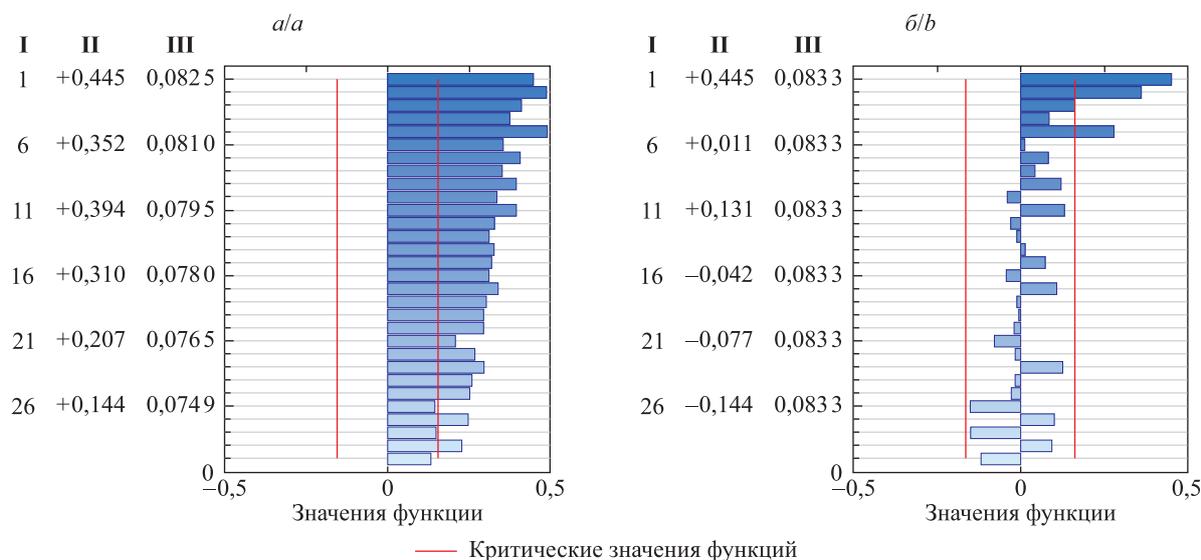


Рис. 5. Автокорреляционная (а) и частная автокорреляционная (б) функции максимальных уровней воды в период весеннего половодья на примере р. Березины в створе г. Бобруйска. В колонке I указаны лаги временного ряда, в колонке II – значения функции, в колонке III – ошибки параметра функции

Fig. 5. Autocorrelation (a) and partial autocorrelation (b) functions of maximum water levels during the spring flood period on the example of the Berezina River in the Bobruisk section. In the column I the lags of the time series are indicated, in the column II – the values of the function, in the column III – errors of the function parameter

В соответствии с уравнением (6) для временного ряда максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска при $r(1) = 0,45$, $r(2) = 0,51$ и $H_{\max_{\text{cp}}} = 326$ см (см. табл. 3), а также при $\sigma_{\xi} = 80,45$ см и $\sigma = 90,09$ см получаем выражение

$$H_{\max}(t) = 0,45H_{\max}(t-1) + 0,51H_{\max}(t-2) + 13,04 + \xi(t).$$

Нами предпринята попытка описать колебания максимальных уровней воды р. Березины в створе г. Бобруйска с помощью сложной марковской модели со сдвигом до 30 лет. Регрессионно-корреляционный анализ показал, что для ее построения могут использоваться параметры $H(t-7)$, $H(t-13)$, $H(t-15)$ и $H(t-21)$. Запишем частный вид модели:

$$H(t) = 0,32H(t-7) + 0,26H(t-13) + 0,28H(t-15) + 0,28 \cdot H(t-21) - 72 + \xi(t).$$

Коэффициент множественной корреляции полученного уравнения ($R = 0,67$) значительно превышает теоретический предел значимости ($R^T = 0,19$) при 109 степенях свободы и уровне значимости 5%. В интервал $\pm 5\%$ попало 28,1% всех точек, в интервал $\pm 10\%$ – 39,5%, в интервал $\pm 15\%$ – 55,3%, в интервал $\pm 20\%$ – 65,8% точек.

Практический интерес представляет выявление закономерностей в динамике основных гидрологических характеристик. Применительно к р. Березине в створе г. Бобруйска для максимальных уровней воды уравнение (4) примет вид

$$H(t) = 0,77H(t-1) + 0,52W_{\text{oc}}(t) + 21 + \xi(t).$$

Коэффициент множественной корреляции полученного уравнения ($R = 0,51$) превышает теоретический предел значимости ($R^T = 0,24$) при 72 степенях свободы и уровне значимости 5%. В интервал $\pm 5\%$ попало 29,7% всех точек, в интервал $\pm 10\%$ – 36,5%, в интервал $\pm 15\%$ – 48,6%, в интервал $\pm 20\%$ – 56,8% точек.

Таким образом, полученные прогнозные уравнения дают приемлемые результаты и могут использоваться при решении определенных водохозяйственных и гидротехнических задач.

Заключение

Проведенная оценка степени однородности основных статистических характеристик максимальных уровней воды рек Беларуси за 144-летний период позволяет сделать вывод о наличии статистически значимых изменений в динамике уровня режима, обусловленных естественно-климатическими

колебаниями гидрологического цикла и антропогенным воздействием. Стационарность процесса многолетних колебаний максимальных уровней воды имеет место лишь на отдельных отрезках временных рядов.

При изучении закономерностей многолетних колебаний максимальных уровней воды рек использование методов теории случайных процессов должно сочетаться с анализом генезиса этого процесса и определяющих его природно-хозяйственных факторов, прежде всего климатических. По результатам исследований формируется вид прогнозной модели, а по данным наблюдений осуществляется ее настройка. Рассматриваемые прогнозные модели требуют совершенствования в части привлечения современных математических методов для описания процессов, происходящих не только в русле реки, но и на водосборе, с учетом дальнейшего развития региона.

Библиографические ссылки

1. Мажайский ЮА, Рокочинский АН, Волчек АА, Мешик ОП, Езнах Е, редакторы. *Природно-ресурсный потенциал. Том 1*. Рязань: Мешерский филиал Всероссийского НИИ гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова; 2018. 408 с. (Природообустройство Полесья; книга 1).
2. Квач ЕГ. Особенности гидрологического режима трансграничных водных объектов Республики Беларусь и Российской Федерации. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2023;4:93–104. DOI: 10.35567/19994508_2023_4_3.
3. Логинов ВФ, Волчек АА, Волчек АНА. *Весенние половодья на реках Беларуси: пространственно-временные колебания и прогноз*. Минск: Беларуская навука; 2014. 244 с.
4. Волчек АА. Водные ресурсы Беларуси и экологические риски. *Вопросы географии*. 2023;157:81–104. DOI: 10/24057/probl.geog.157.4.
5. Ободовский АГ, Станкевич АП, Афанасьев СА, редакторы. *Управление трансграничным бассейном Днепра: суббассейн реки Припять*. Киев: Кафедра; 2012. 447 с.
6. Куприянов ВВ, редактор. *Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 5, Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Часть 1*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1966. 718 с.
7. Раткович ДЯ. *Многолетние колебания речного стока: закономерности и регулирование*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1976. 255 с.
8. Ismaiylov GK, Fedorov VM. Analysis of long-term, variations in the Volga annual runoff. *Water Resources*. 2001;28(5):469–476. DOI: 10.1023/A:1012342203595.
9. Loginov VF, Volchak AA. Variations in Neman River annual runoff near Grodno Town. *Water Resources*. 2006;33(6):608–615. DOI: 10.1134/S0097807806060029.
10. Волчек АА, Парфомук СИ, Шпока ДА. Оптимизация количества гидрометрических постов наблюдений за уровнем воды на реках Беларуси. *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. 2023;3:81–91.
11. Волчек АА. Автоматизация гидрологических расчетов. В: Голуб МВ, редактор. *Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды. Материалы Международной научно-практической конференции по проблемам водохозяйственного, промышленного и гражданского строительства и экономико-социальных преобразований в условиях рыночных отношений; 17–18 февраля 1998 г.; Биберах, Германия – Брест, Беларусь – Ноттингем, Великобритания*. Брест: Брестский политехнический институт; 1998. с. 55–59.
12. Волчек АА, Сидак СВ. К вопросу восстановления пропусков в гидрологических рядах наблюдений. In: Ministry of Education and Science of Georgia, Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Ecocenter for Environmental Protection. *9th International scientific and technical conference «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction»; 2019 July 25–27; Tbilisi, Georgia*. Tbilisi: Ministry of Education and Science of Georgia; 2019. p. 296–300. Co-published by the Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Ecocenter for Environmental Protection.
13. Логинов ВФ, Волчек АА, Шведовский ПС. *Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов*. Брест: Брестский государственный технический университет; 2004. 301 с.
14. Христофоров АВ. *Теория случайных процессов в гидрологии*. Москва: Издательство МГУ; 1994. 141 с.
15. Бокс Дж, Дженкинс Г. *Анализ временных рядов, прогноз и управление*. Левшин АЛ, переводчик; Писаренко ВФ, редактор. Москва: Мир; 1974. 406 с.
16. Любушин АА, Писаренко ВФ, Болгов МВ, Рукавишников ТА. Исследование общих эффектов вариаций стока рек. *Метеорология и гидрология*. 2003;7:76–88. EDN: PVFRDX.
17. Волчек АА, Шпока ДА. Колебания максимальных уровней воды реки Припять. *Природопользование*. 2023;1:27–40. DOI: 10.47612/2079-3928-2023-1-27-40.
18. Волчек АА, Шпока ИН, Шпока ДА. Оценка колебаний уровней воды реки Лесная в условиях современного потепления климата. *Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология*. 2019;2:23–28. EDN: TNRHNV.
19. Волчек АА, Шпока ИН, Шпока ДА. Оценка колебаний максимальных уровней воды рек бассейна Припяти на территории Беларуси. *Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология*. 2020;2:27–30. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-120-2.1-27-30.
20. Мясніковіч МУ, рэдактар. *Нацыянальны атлас Беларусі*. Мінск: Белкартаграфія; 2002. 292 с.
21. Логинов ВФ. *Причины и следствия климатических изменений*. Минск: Навука і тэхніка; 1992. 319 с.

References

1. Mazhaiskii YuA, Rokochinskii AN, Volchak AA, Meshik OP, Eznakh E, editors. *Prirодно-resursnyi potentsial. Tom 1* [Natural resource potential. Volume 1]. Ryazan: Meshcherskii filial Vserossiiskogo NII gidrotekhniki i melioratsii imeni A. N. Kostyakova; 2018. 408 p. (Nature management of Polesie; book 1). Russian.

2. Kvach EG. Special features of hydrological regime of transboundary water bodies of the Republic of Belarus and the Russian Federation. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2023;4:93–104. Russian. DOI: 10.35567/19994508_2023_4_3.
3. Loginov VF, Volchak AA, Volchak AA. *Vesennie polovodya na rekakh Belarusi: prostranstvenno-vremennye kolebaniya i prognoz* [Spring floods on the rivers of Belarus: spatial and temporal fluctuations and forecast]. Minsk: Belaruskaja nawuka; 2014. 244 p. Russian.
4. Volchak AA. Water resources of Belarus and environmental risks. *Problems of Geography*. 2023;157:81–104. Russian. DOI: 10/24057/probl.geor.157.4.
5. Obodovskii AG, Stankevich AP, Afanas'ev SA, editors. *Upravlenie transgranichnym basseinom Dnepra: subbassein reki Pripyat'* [Management of the transboundary basin of the Dnieper: the subbasin of the Pripyat River]. Kyiv: Kafedra; 2012. 447 p. Russian.
6. Kupriyanov VV, editor. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 5, Belorussiya i Verkhnee Podneprov'e. Chast' I* [Surface water resources of the USSR. Volume 5, Belarus and the Upper Dnieper Region. Part 1]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1966. 718 p. Russian.
7. Ratkovich DYa. *Mноголетние колебания речного стока: закономерности и регулирование* [Long-term fluctuations in river flow: patterns and regulation]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1976. 255 p. Russian.
8. Ismaiyl'ov GK, Fedorov VM. Analysis of long-term, variations in the Volga annual runoff. *Water Resources*. 2001;28(5):469–476. DOI: 10.1023/A:1012342203595.
9. Loginov VF, Volchak AA. Variations in Neman River annual runoff near Grodno Town. *Water Resources*. 2006;33(6):608–615. DOI: 10.1134/S0097807806060029.
10. Volchak AA, Parfomuk SI, Shpoka DA. [Optimisation of the number of hydrometric posts for observing water levels on the rivers of Belarus]. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy*. 2023;3:81–91. Russian.
11. Volchak AA. [Automation of hydrological calculations]. In: Golub MV, editor. *Vodokhozyaistvennoe stroitel'stvo i okhrana okruzhayushchei sredy. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po problemam vodokhozyaistvennogo, promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva i ekonomiko-sotsial'nykh preobrazovaniy v usloviyakh rynochnykh otnosheniy; 17–18 fevralya 1998 g.; Biberakh, Germaniya – Brest, Belarus' – Nottingem, Velikobritaniya* [Water construction and environmental protection. Proceedings of the International scientific and practical conference on the problems of water management, industrial and civil construction and economic and social transformations in conditions of market relations; 1998 February 17–18; Biberach, Germany – Brest, Belarus – Nottingham, United Kingdom]. Brest: Brestskii politekhnicheskii institut; 1998. p. 55–59. Russian.
12. Volchak AA, Sidak SV. [On the issue of restoring gaps in the hydrological series of observations]. In: Ministry of Education and Science of Georgia, Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Ecocenter for Environmental Protection. *9th International scientific and technical conference «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction»*; 2019 July 25–27; Tbilisi, Georgia. Tbilisi: Ministry of Education and Science of Georgia; 2019. p. 296–300. Co-published by the Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Ecocenter for Environmental Protection. Russian.
13. Loginov VF, Volchak AA, Shvedovskii PS. *Praktika primeneniya statisticheskikh metodov pri analize i prognoze prirodnnykh protsessov* [The practice of applying statistical methods in the analysis and prediction of natural processes]. Brest: Brest State Technical University; 2004. 301 p. Russian.
14. Khristoforov AV. *Teoriya sluchainnykh protsessov v gidrologii* [The theory of random processes in hydrology]. Moscow: Izdatel'stvo MGU; 1994. 141 p. Russian.
15. Box J, Jenkins G. *Analiz vremennykh ryadov, prognoz i upravlenie* [Time series analysis, forecasting and management]. Levshin AL, translator; Pisarenko VF, editor. Moscow: Mir; 1974. 406 p. Russian.
16. Lyubushin AA, Pisarenko VF, Bolgov MV, Rukavishnikova TA. Study of general effects of river runoff variations. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2003;7:76–88. Russian. EDN: PVFRDX.
17. Volchak AA, Shpoka DA. Maximum water levels fluctuations of the Pripyat River. *Nature Management*. 2023;1:27–40. Russian. DOI: 10.47612/2079-3928-2023-1-27-40.
18. Volchak AA, Shpoka IN, Shpoka DA. Evaluation of Lesnaya River water levels in the conditions of modern warming of climate. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vodokhozyaistvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya*. 2019; 2:23–28. Russian. EDN: TNRHNV.
19. Volchak AA, Shpoka IN, Shpoka DA. Estimation of fluctuations of maximum water levels of solder basin rivers on the territory of Belarus. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vodokhozyaistvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya*. 2020;2:27–30. Russian. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-120-2.1-27-30.
20. Mjasnikovich MU, editor. *Nacyjanal'ny atlas Belarusi* [National atlas of Belarus]. Minsk: Belkartagrafiya; 2002. 292 p. Belarusian.
21. Loginov VF. *Prichiny i sledstviya klimaticheskikh izmeneniy* [Causes and consequences of climate change]. Minsk: Navuka i tjehnika; 1992. 319 p. Russian.

Получена 18.12.2023 / принята 05.03.2024.
Received 18.12.2023 / accepted 05.03.2024.

УДК 911.3:656.13(476)(043.3)

ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СЕТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ И ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ИМИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

А. П. БЕЗРУЧЕНОК¹⁾, А. Л. КИНДЕЕВ¹⁾, А. Г. МАЗЬКО²⁾

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

²⁾Национальное кадастровое агентство, пер. Краснозвездный, 12, 220005, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрена территориальная организация сети электрических зарядных станций (ЭЗС) в Республике Беларусь. Обоснованы необходимость и актуальность совершенствования и укрупнения сети ЭЗС в стране в связи со значительным ростом (более 127 %) количества электромобилей за 2021–2022 гг. Приведен краткий обзор состояния современного рынка ЭЗС. Разработан методический алгоритм географического анализа территориальной структуры сети ЭЗС, позволяющий выявить диспропорции в их размещении по административным районам. Выяснено, что в 47 % административных районов нет ЭЗС. Определены зоны обслуживания ЭЗС, при этом наиболее обеспечен ими трансъевропейский транспортный коридор Е30, проходящий по маршруту Брест – Минск – граница Российской Федерации (магистраль М1), и только участок дороги от г. Минска до г. Орши имеет полное покрытие ЭЗС. Неэффективны магистрали М3, М8 и М11, где ЭЗС располагаются лишь в крупных городах и отсутствуют на межселенных территориях. При вычислении суммарного расстояния, на котором необходимо размещать ЭЗС, рассчитано, что для полного покрытия всех основных автомобильных дорог в стране нужно установить более 200 ЭЗС с учетом норматива 1 ЭЗС на 50 км. Выполнена оценка административных районов по уровню дефицита покрытия дорог зонами обслуживания ЭЗС, а также по степени обеспеченности ЭЗС на душу населения. Выявлено, что 72 административных района из 118 имеют высокий и очень высокий уровень дефицита, 8 административных районов – средний уровень дефицита и 38 административных районов – низкий и очень низкий уровень дефицита. На базе проведенного сетевого анализа предложено размещение новых ЭЗС в местах существующей придорожной инфраструктуры. Разработанные предложения по совершенствованию сети ЭЗС позволяют выделить административные районы с уже имеющейся инфраструктурой (Молодечненский, Браславский, Мостовский, Волковысский районы и др.) для установки в них ЭЗС в первую очередь и административные районы без нее (Ельский, Наровлянский, Брагинский, Верхнедвинский, Россонский, Климовичский и Хотимский районы) для установки в них ЭЗС во вторую очередь.

Ключевые слова: электромобили; устойчивая мобильность; электрические зарядные станции; ЭЗС; обеспеченность; Республика Беларусь.

Образец цитирования:

Безрученко АП, Киндеев АЛ, Мазько АГ. Территориальная структура сети электрических зарядных станций и обеспеченность ими в Республике Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024; 1:62–75.

EDN: PLZLMG

For citation:

Bezruchonak AP, Kindzeyeu AL, Mazko AG. Territorial structure of a network of electric vehicles charging stations and their availability in the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;1:62–75. Russian.

EDN: PLZLMG

Авторы:

Андрей Петрович Безрученко – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры экономической и социальной географии факультета географии и геоинформатики.

Аркадий Леонидович Киндеев – преподаватель кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.

Алесь Геннадьевич Мазько – специалист по кадастру и геоинформационным системам.

Authors:

Andrei P. Bezruchonak, PhD (geography), docent; associate professor at the department of economic and social geography, faculty of geography and geoinformatics.

bezruchonak@bsu.by

Arkadi L. Kindzeyeu, lecturer at the department of soil science and geographic information systems, faculty of geography and geoinformatics.

akindeev@tut.by

Alesia G. Mazko, specialist in cadastre and geographic information systems.

mazkooy@gmail.com

TERRITORIAL STRUCTURE OF A NETWORK OF ELECTRIC VEHICLES CHARGING STATIONS AND THEIR AVAILABILITY IN THE REPUBLIC OF BELARUS

A. P. BEZRUCHONAK^a, A. L. KINDZEYEU^a, A. G. MAZKO^b

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

^bNational Cadastral Agency, 12 Chyrvonazorny Lane, Minsk 220005, Belarus

Corresponding author: A. L. Kindzeyeu (akindeev@tut.by)

Abstract. The article discusses the territorial organisation of a network of electric vehicles charging stations (EVCS) in the Republic of Belarus. The necessity and relevance of improving and enlarging the network of EVCS in the country is substantiated in connection with the significant growth (more than 127 %) in the number of electric vehicles in 2021–2022. A brief overview of the state of the modern EVCS market is provided. A methodological algorithm for the geographical analysis of the territorial structure of the network of EVCS has been developed, which makes it possible to identify disproportions in their distribution across the administrative regions of the country. It was revealed that 47 % of administrative districts are not provided with EVCS. The service areas of the EVCS have been determined, the most well-supported section is the trans-European transport corridor E30, passing along the route Brest – Minsk – border of the Russian Federation (highway M1). Moreover, only the section of the road from Minsk to Orsha has full EVCS coverage. The highways M3, M8, and M11 are ineffective, where EVCS are located only in large cities and are absent in inter-settlement areas. When determining the total distance at which it is necessary to place EVCS, it was found that in order to fully cover all major highways in the country, it is necessary to place more than 200 EVCS, taking into account the standard of 50 km per 1 EVCS. The administrative districts were assessed by the level of shortage of roads not covered by EVCS service areas, as well as by the level of provision of EVCS per capita. It was revealed that 72 administrative districts out of 118 have a high and very high level of deficit of roads in the district, 8 administrative districts – with a medium level of deficit and 38 administrative districts – with a low and very low level of deficit. Based on the network analysis, it is proposed to locate new EVCS in areas with existing roadside infrastructure. The developed proposals for improving the network of EVCS make it possible to allocate administrative districts with existing infrastructure (Molodechno, Braslav, Mosty, Volkovysk districts, etc.) for the installation of EVCS in them in the first place and administrative districts without it (Yelsk, Narovlyany, Bragin, Verkhnedvinsk, Rossony, Klimovichy, and Khotimsk districts) in them in the second place.

Keywords: electric vehicles; sustainable mobility; electric vehicles charging stations; EVCS; availability; Republic of Belarus.

Введение

Актуальность темы исследования. Автомобильный транспорт – неотъемлемый элемент социально-экономического развития Республики Беларусь, покрывающий растущие потребности населения в мобильности. Географически он представляет собой убиквитетный вид транспорта с наибольшим территориальным охватом транспортной сети по стране (протяженность дорожного покрытия в 2021 г. составляла 103,4 тыс. км, из них 90,0 тыс. км занимали дороги с твердым покрытием). Функционально автомобильный транспорт вышел на первое место по объему перевозок грузов (40 % с учетом трубопроводного транспорта и около 56 % без учета его) и пассажиров (59,1 %), опередив железнодорожный транспорт¹. Неоспоримым является повышение значимости социальной роли автомобиля, что нашло отражение в росте автомобилизации населения, создающей повышенный спрос на дорожную инфраструктуру и способствующей возникновению проблем транспортного характера (пробок и заторов, загрязнения воздуха и почв и др.).

По оценкам ООН, на транспорт приходится около 25 % выбросов парниковых газов (непосредственно на автомобильный транспорт, по некоторым данным, – около 10 % глобальных выбросов), что влияет на процесс изменения климата². При этом в настоящее время во многих странах мира популярен дискурс перехода к концепции устойчивой городской мобильности, под которой понимается способность поддерживать

¹Транспорт в Республике Беларусь, 2022 [Электронный ресурс] // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_brochures/index_52718/ (дата обращения: 10.10.2023).

²Fact sheet climate change [Electronic resource] // United Nations. URL: https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/media_gstc/FACT_SHEET_Climate_Change.pdf (date of access: 10.10.2023); Transport. Cars and vans [Electronic resource] // Int. Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/energy-system/transport/cars-and-vans> (date of access: 10.10.2023).

доступное, безопасное, эффективное передвижение людей, грузов и информации при нанесении минимального ущерба окружающей среде³.

Сокращение выбросов, стремление к энергетической эффективности, улучшение качества воздуха и уменьшение шумового загрязнения от транспорта выступают приоритетами устойчивого развития многих государств, что поддерживается на глобальном уровне декларацией целей в области устойчивого развития ООН (цели 7, 9 и 11). Европейский союз, к примеру, к 2030 г. намерен снизить объем выбросов парниковых газов от новых автомобилей на 55 %, а к 2035 г. – на 100 %⁴.

Одними из трендов, направленных на экологизацию транспорта, являются производство и использование электротранспорта. Переход от двигателей внутреннего сгорания к электрическим двигателям – заметная тенденция в мировом автомобилестроении, что находит отражение в динамике продаж. Так, доля аккумуляторных электромобилей, подключаемых гибридных электромобилей, а также электромобилей на топливных элементах в общем количестве реализованных автомобилей выросла с 4 % в 2020 г. до 14 % в 2022 г. (рис. 1). В 2022 г. было продано около 10 млн электромобилей⁵.

Рынок электромобилей в Республике Беларусь находится в стадии формирования, а спрос на персональный электротранспорт удовлетворяется за счет импорта. В 2021 г. в стране было зарегистрировано 3,1 млн легковых автомобилей (находящихся в личной собственности граждан и принадлежащих организациям), в том числе 1600 электромобилей (удельный вес составил 0,05 %). За год количество электромобилей увеличилось до 3635 ед., обеспечив прирост более 127 %, а их доля достигла 0,12 %⁶.

Региональная структура распределения легковых электромобилей в Республике Беларусь по данным за 2022 г. представлена в таблице. Первое место по количеству зарегистрированных электромобилей занимают г. Минск и Минская область (68,9 %), что обусловлено прежде всего демографическими причинами (наибольшей численностью населения). На втором месте расположена Брестская область (9,7 %). Наименьший показатель характерен для Могилёвской области (3,4 %).

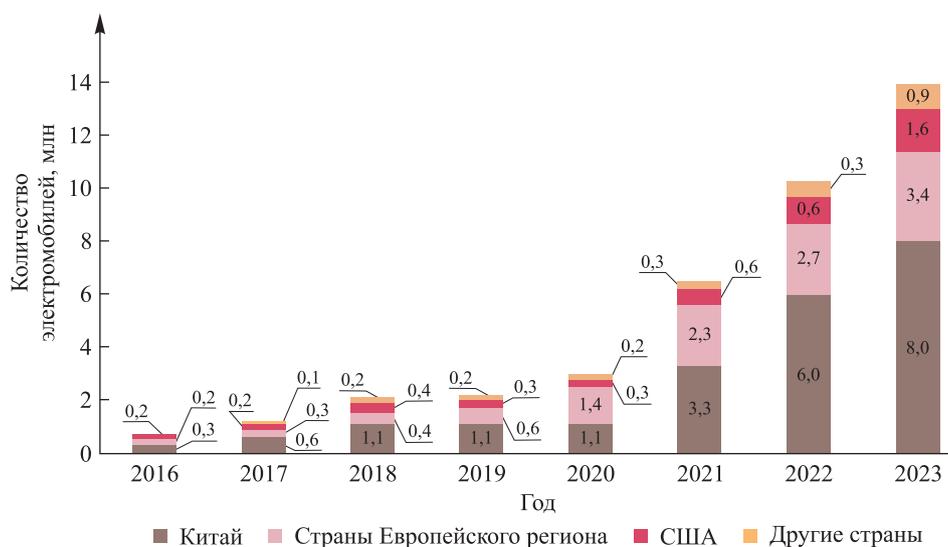


Рис. 1. Продажи электромобилей в мире в 2016–2023 гг.
Для 2023 г. указаны прогнозные значения
(составлено по данным Международного энергетического агентства)

Fig. 1. Global electric vehicles sales in 2016–2023.
For 2023, forecast values are indicated
(compiled according to International Energy Agency data)

³Sustainable mobility for the 21st century [Electronic resource] // The World Bank. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2017/07/10/sustainable-mobility-for-the-21st-century> (date of access: 10.10.2023).

⁴Reducing car emissions: new CO₂ targets for cars and vans explained [Electronic resource] // Eur. Parliament. URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180920STO14027/reducing-car-emissions-new-co2-targets-for-cars-and-vans-explained> (date of access: 10.10.2023).

⁵Transport. Electric vehicles [Electronic resource] // Int. Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles> (date of access: 10.10.2023).

⁶Экономическая статистика. Наличие транспортных средств (на конец года) [Электронный ресурс] // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=264588> (дата обращения: 10.10.2023).

Количество электромобилей в Республике Беларусь в 2022 г.

Number of electric vehicles in the Republic of Belarus in 2022

Показатели	Брестская область	Витебская область	Гомельская область	Гродненская область	Минская область (г. Минск)	Могилёвская область
Количество, ед.	353	145	260	252	776 (1723)	126
Доля, %	9,7	3,9	7,2	6,9	21,4 (47,5)	3,4

Примечание. Составлено по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь.

На развитие легкового пассажирского электротранспорта в Республике Беларусь влияет несколько факторов, в том числе законодательный. С 2018 г. в стране был принят ряд соответствующих постановлений и программ. Так, постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 10 октября 2018 г. № 731 была утверждена Программа создания государственной зарядной сети для зарядки электромобилей, допускающая одновременное использование земельных участков по целевому назначению и размещению электрических зарядных станций (ЭЗС) и др. Данная программа предусматривает устройство 1304 ЭЗС к 2030 г.⁷ Указ Президента Республики Беларусь от 12 марта 2020 г. № 92 определил меры стимулирования использования электромобилей, включающие в себя освобождение от налога на добавленную стоимость при ввозе электромобиля⁸. В Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года указывается важность создания благоприятных условий для использования электромобилей⁹. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 9 апреля 2021 г. № 213 была утверждена Комплексная программа развития электротранспорта на 2021–2025 годы¹⁰. В некоторых из перечисленных документов отмечается стратегическая значимость ввода в эксплуатацию Белорусской атомной электростанции в качестве стимулирующей меры развития электротранспорта, которая обеспечит наличие необходимой электроэнергии для устойчивого функционирования инфраструктуры ЭЗС.

Однако сейчас в сочетании с динамичным ростом рынка электромобилей и принятием мер по его стимулированию в Республике Беларусь нужна комплексная географическая оценка обеспеченности инфраструктурой ЭЗС в разрезе административных районов, а также исследование ее доступности в контексте географии дорожной сети. Цель статьи – изучение современного рынка, территориальной организации сети ЭЗС в стране с выявлением пространственных дифференциаций в их размещении. В связи с этим предполагается решение следующих задач: краткий ретроспективный обзор развития рынка ЭЗС в Республике Беларусь, создание методического алгоритма географического анализа территориальной структуры ЭЗС с использованием инструментария геоинформационных систем (ГИС), оценка географической доступности ЭЗС и обеспеченности ими административных районов страны (по протяженности участков дорожной сети без покрытия ЭЗС, а также на душу населения), установление территориальных диспропорций в размещении ЭЗС и разработка рекомендаций по совершенствованию их существующей сети. Таким образом, географическая оценка инфраструктуры ЭЗС позволит выявить региональные различия в размещении ЭЗС на территории Республики Беларусь, а измерение доступности ЭЗС и обеспеченности ими административных районов даст возможность выделить участки, на которых рекомендуется установка новых ЭЗС.

Состояние изученности вопроса. Активное производство электромобилей, рост объемов их продаж и развитие необходимой сопутствующей инфраструктуры способствовали повышению интереса к теоретическим и прикладным исследованиям, направленным на изучение не только технико-экономических, но и пространственных аспектов этой отрасли и посвященным в первую очередь обоснованию географии размещения инфраструктуры ЭЗС.

⁷ Об утверждении Программы создания государственной зарядной сети для зарядки электромобилей [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 10 окт. 2018 г. № 731 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21800731&p1=1&p5=0> (дата обращения: 10.10.2023).

⁸ О стимулировании использования электромобилей [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь от 12 марта 2020 г. № 92 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32000092&p1=1> (дата обращения: 10.10.2023).

⁹ Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 года / М-во экономики Респ. Беларусь. Минск: Науч.-исслед. экон. ин-т М-ва экономики Респ. Беларусь, 2020. 82 с.

¹⁰ О Комплексной программе развития электротранспорта на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 9 апр. 2021 г. № 213 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100213&p1=1&p5=0> (дата обращения: 10.10.2023).

На данный момент строгого алгоритма регламентации условий размещения ЭЭС нет, однако специалисты выделили основные методические аспекты такого пространственного анализа. Считается, что традиционным подходом к решению данного вопроса является установка объектов в зависимости от расположения отдельных точечных атрибутов [1]. Однако согласно более поздним исследованиям этот подход может привести к ошибке при измерении расстояния между местом рождения спроса и местом возникновения предложения (сервисным центром), что повлияет на результат определения необходимого местоположения изучаемого объекта. Более того, модели точечного представления информации не решают задачи по установлению параметров оптимального покрытия дорожной сети ЭЭС [2]. Похожий подход, который заключается в применении нейросетей и виртуальной реальности для обработки данных, полученных от пользователей, и анализе модели инфраструктуры города, был задействован при исследовании сети ЭЭС в г. Пекине (Китай) [3]. Другой метод, основанный на теории массового обслуживания и разработанный Г. А. Писаревым на примере г. Красноярска (Россия), учитывает спрос на ЭЭС в разных районах города и их пропускную способность, однако при этом отсутствует анализ общего покрытия территории ЭЭС [4]. В ряде исследований для решения задач по оценке географической доступности ЭЭС с учетом дорожной сети предлагается полигональный подход к измерению этого показателя для максимально возможного числа электромобилей в пределах допустимых расстояний [5]. Пространственная оценка покрытия дорожной сети ЭЭС и сетевой анализ позволяют избежать наложения одних обслуживаемых зон на другие, что, в свою очередь, способствует оптимизации инфраструктуры [6]. Данный подход помогает избежать диспропорций в размещении ЭЭС, декластеризовать пространство и снизить излишние расходы на установку ЭЭС в уже покрытых зонах [7].

Анализ состояния и перспектив развития инфраструктуры электромобилей показал, что одним из основных сдерживающих факторов роста рынка электромобилей является отсутствие инфраструктуры, необходимой для их эксплуатации [8]. Данный факт частично актуален и для Республики Беларусь, хотя в последнее время изначальный недостаток инфраструктуры ЭЭС компенсируется выходом на рынок новых игроков.

По данным существующих исследований, в Республике Беларусь отмечают перспективность и целесообразность развития электротранспорта как процесса, сопровождаемого экономическими, экологическими и энергетическими преимуществами [9]. Подобная инфраструктура способна стать частью единой умной транспортной системы, основанной на принципах больших данных [10]. Стоит сказать, что работа с такими массивами пространственно-временной информации невозможна без ГИС. Нехватка географических изысканий в данной области подтверждает необходимость проведения комплексного геоинформационного анализа и оценки экономико-географических особенностей развития инфраструктуры ЭЭС в Республике Беларусь.

Материалы и методы исследования

Исходными материалами для исследования послужили картографические данные, находящиеся в открытом доступе, в том числе сведения информационного портала *PlugShare*¹¹, сайта производственного объединения (ПО) «Белоруснефть»¹² и поисково-информационной службы «Яндекс.Карты»¹³. Дополнительная статистическая и аналитическая информация была собрана с использованием базы данных Национального статистического комитета Республики Беларусь¹⁴, взята из опубликованных программ, связанных с развитием электротранспорта, и иных профильных информационных ресурсов, посвященных развитию рынка электромобилей и сети ЭЭС в Республике Беларусь¹⁵.

В основе предлагаемого алгоритма анализа обеспеченности дорожной сети ЭЭС лежат теория графов и сетевой анализ. Для выявления современной территориальной структуры сети ЭЭС была выбрана категория платных (коммерческих) ЭЭС из-за их наибольшей распространенности и доступности потребителю.

Для определения степени обеспеченности дорожной сети ЭЭС и выявления пространственных диспропорций в их размещении использовались методы сетевого анализа (для измерения параметров зон обслуживания ЭЭС и установления участков дорожной сети с недостаточным покрытием) и качественной оценки (по уровню обеспеченности ЭЭС в разрезе административных районов, а также

¹¹Карта зарядных станций [Электронный ресурс] // PlugShare. URL: <https://www.plugshare.com/ru> (дата обращения: 10.10.2023).

¹²Карта ЭЭС [Электронный ресурс] // Белоруснефть. URL: <https://azs.belorusneft.by/beloil-map/?lang=ru#> (дата обращения: 10.10.2023).

¹³Яндекс.Карты [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.by/maps/157/minsk/?ll=27.561481%2C53.902496&z=12> (дата обращения: 10.10.2023).

¹⁴Экономическая статистика. Наличие транспортных средств (на конец года) [Электронный ресурс] // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=264588> (дата обращения: 10.10.2023).

¹⁵Угадаете, сколько электромобилей зарегистрировано в Беларуси? Подсказка: почти в 40 раз больше, чем два года назад [Электронный ресурс] // Онлайнер. URL: <https://auto.onliner.by/2022/11/23/skolko-elektromobilej-zaregistrirvano-v-belarusi-podskazka> (дата обращения: 10.10.2023).

на душу населения). В модуле *ArcMap* ГИС-среды *ArcGIS* (версия 10.7) была задана полигональная граница зон покрытия ЭЭС, равная 50 км (данное расстояние обосновано практикой установки ЭЭС ПО «Белоруснефть» и положениями Программы создания государственной зарядной сети для зарядки электромобилей), что позволило вычислить зону влияния каждой ЭЭС с учетом конфигурации дорожной сети страны. Присвоение атрибутов ЭЭС (количества, типа) по административным районам производилось с помощью инструмента *соединение данных*. К слою «Районы» был присоединен слой «ЭЭС» с учетом геопространственной привязки. К полигонам добавлялись точки, при этом каждому полигону присваивалось суммарное значение числовых атрибутов точек, попавших внутрь полигона.

Дороги вне зоны покрытия ЭЭС были отнесены к участкам с недостаточной обеспеченностью (дефицитом) инфраструктурой ЭЭС. На основании информации о протяженности дорог данного типа оценивался уровень административных районов по доле дорог вне зоны влияния ЭЭС. Административные районы с долей дорог без ЭЭС менее 20 % имеют очень низкий уровень дефицита, с долей дорог без ЭЭС от 20 до 40 % – низкий уровень дефицита, с долей дорог без ЭЭС от 40 до 60 % – средний уровень дефицита, с долей дорог без ЭЭС от 60 до 80 % – высокий уровень дефицита, а с долей дорог без ЭЭС более 80 % – очень высокий уровень дефицита. Похожий принцип использовался при проведении анализа административных районов по обеспеченности ЭЭС на душу населения (с выделением методом геометрических интервалов очень низкого (менее 0,008), низкого (0,009–0,023), среднего (0,024–0,054), высокого (0,055–0,114) и очень высокого (более 0,115) уровней).

В основе рекомендаций по совершенствованию существующей сети ЭЭС лежит гипотеза о том, что целесообразнее размещать их в местах притяжения (вблизи банков, кафе и ресторанов, зон придорожного сервиса, магазинов и гостиниц) вдоль дорожной сети. Для выделения необходимых объектов применялись данные из открытых источников – картографической базы *OpenStreetMap*¹⁶, которые типизировались по приведенным категориям, после чего выбирались объекты, находящиеся на удалении от основных дорог менее чем на 50 м.

Методическими ограничениями выступают динамическая ситуация с введением в эксплуатацию ЭЭС (появление новых игроков на рынке усложняет своевременный сбор и систематизацию актуальной пространственной информации), неполная статистика по количеству электромобилей, находящихся в личной собственности граждан, в разрезе административных районов (такие данные позволили бы лучше оценить обеспеченность парка электромобилей инфраструктурой). Перспективным направлением исследования по данной теме может также служить изучение оптимальной обеспеченности ЭЭС в контексте демографии (численности и плотности населения) городских пространств.

Результаты и их обсуждение

Расширение использования электротранспорта в Республике Беларусь требует развития сопутствующей инфраструктуры. Так, в 2017 г. на территории страны находилось 17 ЭЭС, а в 2022 г. – более 600 ЭЭС, ориентировочно рассчитанных на обслуживание 25 тыс. электромобилей. В июле 2023 г. насчитывалось около 900 публичных ЭЭС (порядка 430 ЭЭС типа DC мощностью от 50 до 172 кВт и 470 ЭЭС типа AC мощностью от 22 до 44 кВт). Подавляющая часть ЭЭС представлена национальной сетью *Malanka*, оператором которой выступает ПО «Белоруснефть» (рис. 2).

Другим государственным оператором инфраструктуры ЭЭС является ОАО «Витязь», наладившее собственное производство ЭЭС. Республиканское унитарное предприятие «Белтелеком» реализует под брендом *Evika!* пилотный проект по установке 15 ЭЭС. В октябре 2023 г. в Колодищах (Минский район) состоялось открытие ЭЭС новой сети *SKAT* от ОАО «Белсельэлектросетьстрой». Проявляют интерес к устройству быстрых ЭЭС и иные предприятия белорусской энергосистемы¹⁷. В целом к 2030 г. в государственной зарядной сети планируется создать 1304 ЭЭС с расстоянием 50–70 км между ними, в том числе 25 супербыстрых ЭЭС.

В Республике Беларусь существуют три основных типа ЭЭС: 1) ЭЭС общего пользования, которые обслуживаются различными операторами; 2) домашние ЭЭС; 3) ЭЭС, состоящие в собственности коммерческих заведений. Наибольшее количество домашних ЭЭС сконцентрировано в г. Минске. Поскольку такие станции находятся в частной собственности физических лиц и доступ к ним для массового пользователя невозможен, они не влияют на целостную инфраструктуру, в связи с чем домашние ЭЭС были исключены из дальнейшего анализа. В данном исследовании акцент был сделан на ЭЭС первого и третьего типов.

¹⁶OpenStreetMap [Электронный ресурс]. URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=7/54.005/26.735&layers=T> (дата обращения: 10.10.2023).

¹⁷Рост продаж электромобилей [Электронный ресурс] // *Ezpravka*. URL: <https://ev-charge.by/> (дата обращения: 10.10.2023).



Рис. 2. ЭЗС бренда *Malanka* (оператор – ПО «Белоруснефть»)
Fig. 2. EVCS of brand *Malanka* (operated by production association «Belorusneft»)

На базе сведений о местоположении и категории ЭЗС была построена ГИС-модель их пространственного распределения в Республике Беларусь. На карте размещена 431 ЭЗС, которая включает в себя от одного до шести зарядных мест. На основании слоев административно-территориального деления страны была скомпонована карта, отображающая географию ЭЗС по категориям (рис. 3).

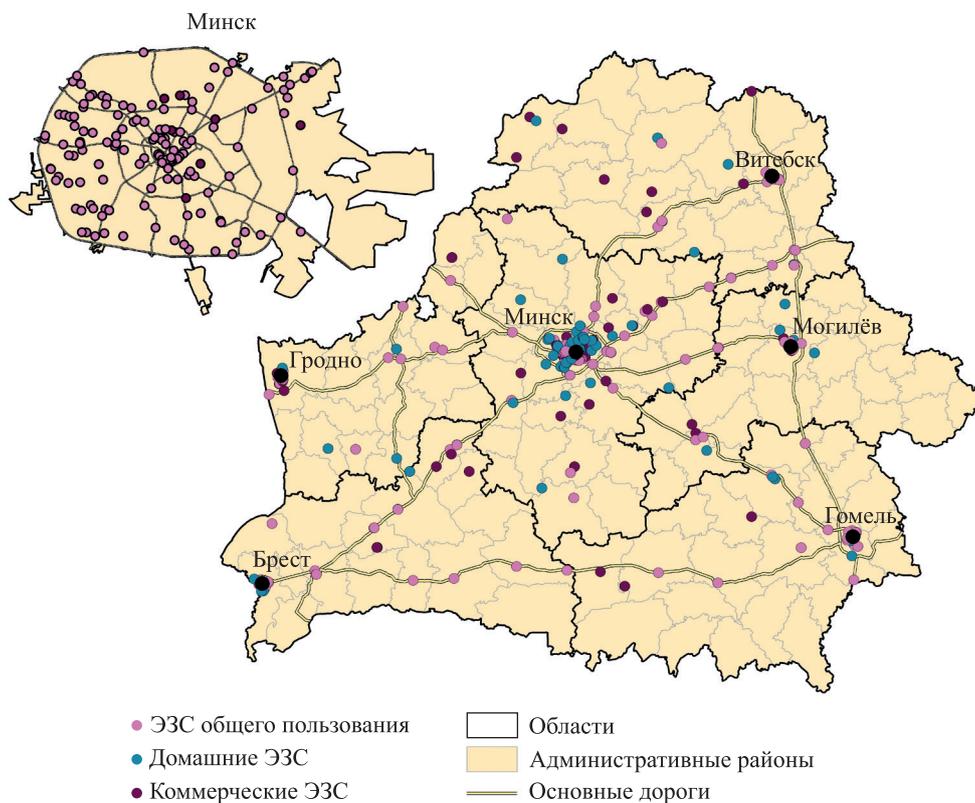


Рис. 3. География ЭЗС в Республике Беларусь по категориям в 2021 г.
(составлено по данным информационного портала *PlugShare*, сайта ПО «Белоруснефть»
и поисково-информационной службы «Яндекс.Карты»)
Fig. 3. Geography of EVCS in the Republic of Belarus by categories in 2021
(compiled according to information portal *PlugShare*, website of production association «Belorusneft»
and search and information services *Yandex.Maps* data)

В 2021 г. наблюдалось неоднородное распределение ЭЗС в разрезе областей и административных районов Республики Беларусь (рис. 4).

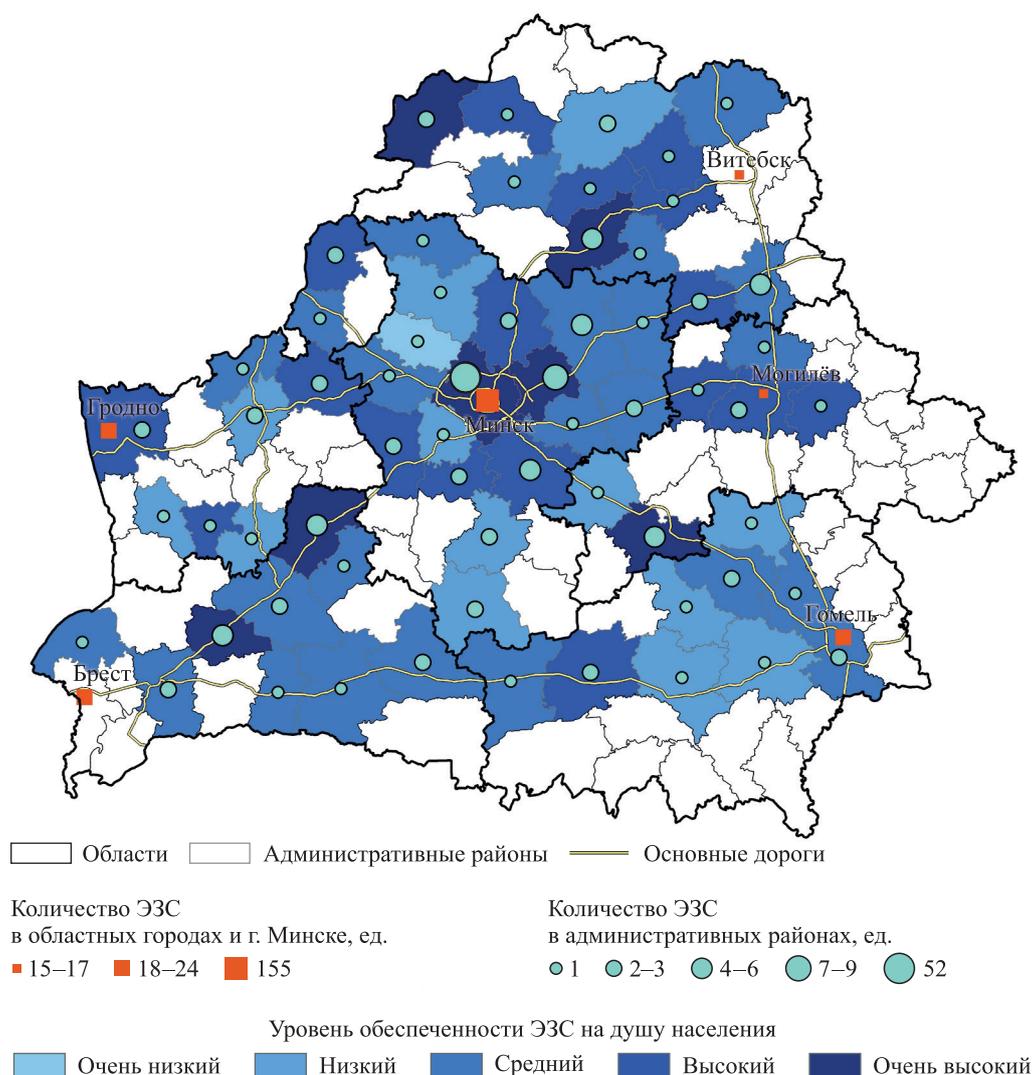


Рис. 4. Пространственная структура ЭЗС в Республике Беларусь в 2021 г.
(составлено по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь)

Fig. 4. Spatial structure of EVCS in the Republic of Belarus in 2021
(compiled according to the Statistical Committee of the Republic of Belarus data)

Наиболее обеспеченные ЭЗС административные районы (без учета ЭЗС в областных центрах) географически приурочены к основным транспортным магистралям Республики Беларусь, в частности к международным транспортно-коммуникационным коридорам (№ 2, 9, 9В (ответвление от коридора № 9)). Исключением выступили Жабинковский, Несвижский, Дубровенский районы (коридор № 2), Быховский, Сенненский районы (коридор № 9), а также Сморгонский район (коридор № 9В). Необходимо отметить отсутствие ЭЗС на значительной части территории Могилёвской области, а также в южных приграничных районах Гомельской области и северных приграничных районах Витебской области (30 приграничных районов из 43 не имеют ни одной ЭЗС). В ранге областных центров можно обратить внимание на г. Гомель как на второй по численности населения город страны, располагающий при этом только 21 ЭЗС – меньшим количеством, чем в городах Гродно и Брест (24 и 23 ЭЗС соответственно).

В разрезе областей Республики Беларусь лидирующее место по обеспеченности ЭЗС занимает Минская область (246 ЭЗС), включая г. Минск (155 ЭЗС, или 63 %). Большое значение этого показателя в столице страны объясняется существенным демографическим (численность населения) и экономическим (уровень доходов) потенциалом города, обуславливающим высокий спрос на электромобили. Остальные ЭЗС неравномерно распределены по территории Минской области, причем преимущественно они концентрируются в Минском (52 ЭЗС) и Смолевичском (9 ЭЗС) районах. От 3 до 5 ЭЗС располагаются в Логойском, Борисовском, Марьиногорском и Столбцовском районах. В 11 административных районах имеется не более 2 ЭЗС. Административные районы северной и центральной частей области

обеспечены ЭЗС, а в ее южной части (Несвижском, Клецком, Копыльском, Любанском и Стародорожском районах) они отсутствуют.

Второй по количеству ЭЗС является Брестская область, где расположены 44 ЭЗС, 23 из которых находятся в областном центре (52 %). Остальные ЭЗС распределены по административным районам: Барановичскому (6 ЭЗС), Березовскому (4 ЭЗС), Кобринскому (3 ЭЗС), Лунинецкому, Ивацевичскому (по 2 ЭЗС), Каменецкому, Ляховичскому, Пинскому и Ивановскому (по 1 ЭЗС). В Брестской области 44 % административных районов, в том числе Брестский (ЭЗС г. Бреста как областного центра отнесены в отдельный ранг), Жабинковский, Пружанский, Малоритский, Дрогичинский, Столинский и Ганцевичский районы, не обеспечены ЭЗС.

В Витебской области расположена 41 ЭЗС, из них 17 ЭЗС находятся в г. Витебске (41 %). Оставшиеся ЭЗС распределены по административным районам: Оршанскому, Лепельскому (по 5 ЭЗС), Браславскому (3 ЭЗС), Толочинскому, Полоцкому (по 2 ЭЗС), Бешенковичскому, Глубокскому, Городокскому, Миорскому, Ушачскому, Чашникскому и Шумилинскому (по 1 ЭЗС). В 38 % административных районов, включая Бешенковичский, Верхнедвинский, Витебский (ЭЗС г. Витебска как областного центра отнесены в отдельный ранг), Докшицкий, Лиозненский, Поставский, Россонский и Сенненский районы, ЭЗС отсутствуют.

В Гродненской области расположены 39 ЭЗС, 24 из которых находятся в г. Гродно (61 %). Оставшиеся ЭЗС распределены по административным районам: Гродненскому, Лидскому (по 3 ЭЗС), Ивьевскому, Островецкому (по 2 ЭЗС), Волковысскому, Вороновскому, Зельвенскому, Ошмянскому, Слонимскому (по 1 ЭЗС). В 47 % административных районов, в том числе в Берестовицком, Дятловском, Кореличском, Мостовском, Новогрудском, Свислочском, Сморгонском и Щучинском районах, ЭЗС отсутствуют.

В Гомельской области расположены 35 ЭЗС, из них 21 ЭЗС находится в г. Гомеле (60 %). Остальные ЭЗС распределены по административным районам: Гомельскому (4 ЭЗС), Жлобинскому (3 ЭЗС), Петриковскому (2 ЭЗС), Буда-Кошелёвскому, Житковичскому, Калинковичскому, Речицкому, Рогачевскому, Светлогорскому (по 1 ЭЗС). В 57 % административных районов, включая Брагинский, Ветковский, Добрушский, Ельский, Кормянский, Лельчицкий, Лоевский, Мозырский, Наровлянский, Октябрьский, Хойникский и Чечерский районы, ЭЗС отсутствуют.

Самое малое количество ЭЗС в разрезе областей приходится на Могилёвскую область, где расположены 26 ЭЗС, из которых 17 ЭЗС находятся в черте г. Могилёва (57 %). Оставшиеся ЭЗС неравномерно распределены по административным районам: Бобруйскому (4 ЭЗС), Бельничскому, Могилёвскому, Осиповичскому, Чаусскому и Шкловскому (по 1 ЭЗС). В 71 % административных районов, в том числе в Быховском, Глусском, Горецком, Дрибинском, Кировском, Климовичском, Кличевском, Костюковичском, Краснопольском, Кричевском, Круглянском, Мстиславском, Славгородском, Хотимском и Чериковском районах, ЭЗС отсутствуют.

Общей характерной чертой пространственного размещения ЭЗС в административных районах областных центров Брестской и Витебской областей является отсутствие ЭЗС вблизи крупных городов, основных центров социально-экономического притяжения. Этот факт частично можно объяснить небольшой численностью городского населения (1200 и 1400 человек соответственно¹⁸), достаточно низким уровнем доходов и невысоким спросом на электромобили, результатом чего выступает незначительная потенциальная вероятность пользования инфраструктурой ЭЗС.

Таким образом, анализ географии размещения ЭЗС в Республике Беларусь позволяет сделать вывод о том, что 55 административных районов из 118 (47 %) не имеют ни одной ЭЗС, причем основная часть ЭЗС расположена в Минской области либо приурочена к главным транспортным магистралям страны. Наименее обеспеченной ЭЗС является Могилёвская область.

Целесообразно проведение анализа обеспеченности административных районов ЭЗС на душу населения с последующим выделением их групп по данному показателю. В этом отношении лидируют административные районы с высоким демографическим потенциалом (численность населения определяет потенциальное количество потребителей, которые используют электромобили и создают спрос на инфраструктуру ЭЗС), а именно Минский, Барановичский, Бобруйский, Гродненский районы и др. Некоторые из них приурочены к транспортным коридорам.

Для выделения административных районов, где, возможно, существует необходимость в пространственно сбалансированном размещении ЭЗС, были определены участки дорожной сети, не покрытые зоной обслуживания ЭЗС (рис. 5). Во внимание принято то, что через 17 административных районов из 55 проходят магистрали, где повышенный автомобильный поток подразумевает наличие как минимум 2 ЭЗС.

¹⁸Перепись населения [Электронный ресурс] // Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/perepis-naseleniya/> (дата обращения: 10.10.2023).

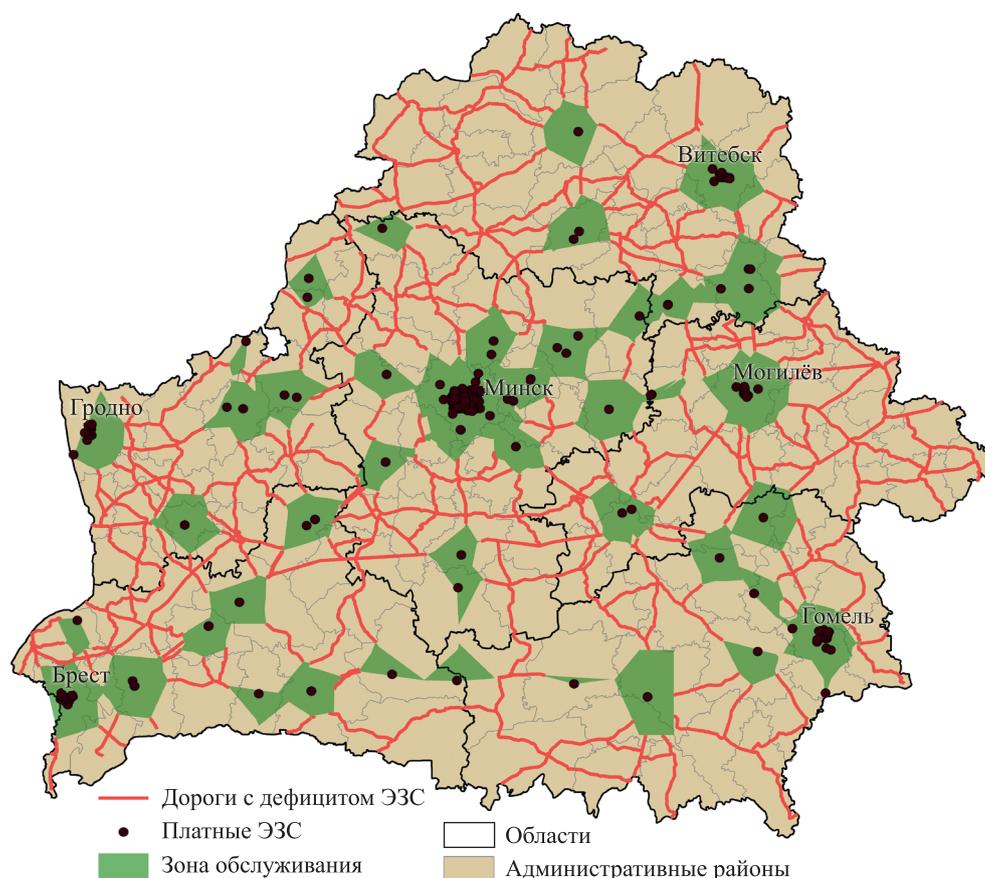


Рис. 5. Зоны обслуживания ЭЭС в Республике Беларусь в 2021 г.
(составлено по данным сайта ПО «Белоруснефть»)

Fig. 5. EVCS service areas the Republic of Belarus in 2021
(compiled according to website of production association «Belorusneft» data)

Наиболее покрытым участком сети основных автомобильных дорог Республики Беларусь для комфортного передвижения на электромобиле является участок № 2 трансъевропейского транспортного коридора E30 Брест – Минск – граница Российской Федерации (магистраль М1). При этом участок данной дороги от г. Минска до г. Орши имеет полное покрытие зонами обслуживания ЭЭС. Менее эффективны участки магистралей М3, М8 и М11, где ЭЭС располагаются только в крупных городах и отсутствуют вдоль дорог.

При определении суммарного расстояния, на котором необходимо размещать ЭЭС, была рассчитана доля дорог с дефицитом ЭЭС (рис. 6).

Установлено, что из общей протяженности основных автомобильных дорог Республики Беларусь, взятых для анализа, доля участков дорог с дефицитом ЭЭС составляла около 55 %. Согласно Программе создания государственной зарядной сети для зарядки электромобилей для достижения полной обеспеченности дорог необходимо построить более 200 ЭЭС на расстоянии 50 км друг от друга. Данный план должен быть реализован к 2030 г.

При выделении административных районов по доле протяженности дорог с дефицитом ЭЭС от общей протяженности основных дорог было выявлено, что 72 административных района из 118 имеют высокий и очень высокий уровень дефицита, 8 административных районов – средний уровень дефицита и 38 административных районов – низкий и очень низкий уровень дефицита. Наиболее выраженным дефицитом отличаются Витебская и Могилёвская области (15 и 17 административных районов с высоким и очень высоким уровнем дефицита соответственно). Интерес представляет Брагский район с высоким уровнем дефицита, где располагается Национальный парк «Браславские озера», который выступает одним из основных центров притяжения для туристов.

Результаты данного анализа частично дополнили и подтвердили существующие исследования автомобильного транспорта Беларуси¹⁹, что позволяет сделать вывод о частичной зависимости обеспеченности

¹⁹Безрученко А. П. Территориальная структура и совершенствование сети дорог автомобильного транспорта Республики Беларусь : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.23.02. Минск, 2017. 23 с.

ЭЗС от особенностей конфигурации сети основных автомобильных дорог и развитости автотранспорта. Так, большинство административных районов с дефицитом ЭЗС (Пружанский, Свислочский, Новогрудский, Браславский, Россонский, Ушачский, Мстиславский, Костюковичский, Брагинский, Столинский районы и др.) относятся к периферийным районам с низкой обеспеченностью транспортной сетью и продуктивностью автотранспорта. Они имеют незначительный экономико-демографический потенциал, неспособный на создание существенного спроса и предложения на услуги автотранспорта. Однако стоит отметить Мозырский и Пинский районы, относящиеся к центральным районам с высокой обеспеченностью транспортной сетью и продуктивностью автотранспорта и при этом имеющие средний уровень дефицита ЭЗС. Остальные административные районы данной типологической группы соответствуют районам с низким и очень низким уровнем дефицита ЭЗС. Также присутствуют административные районы полупериферийного типа в зоне влияния транспортно-коммуникационных магистралей с высокой обеспеченностью транспортной сетью и средней продуктивностью автотранспорта, но с высоким (Шкловский, Житковичский и Городокский районы) и очень высоким (Быховский, Славгородский, Сморгонский районы) уровнем дефицита ЭЗС. По нашему мнению, они должны занимать приоритетное место в очередности развития инфраструктуры ЭЗС.

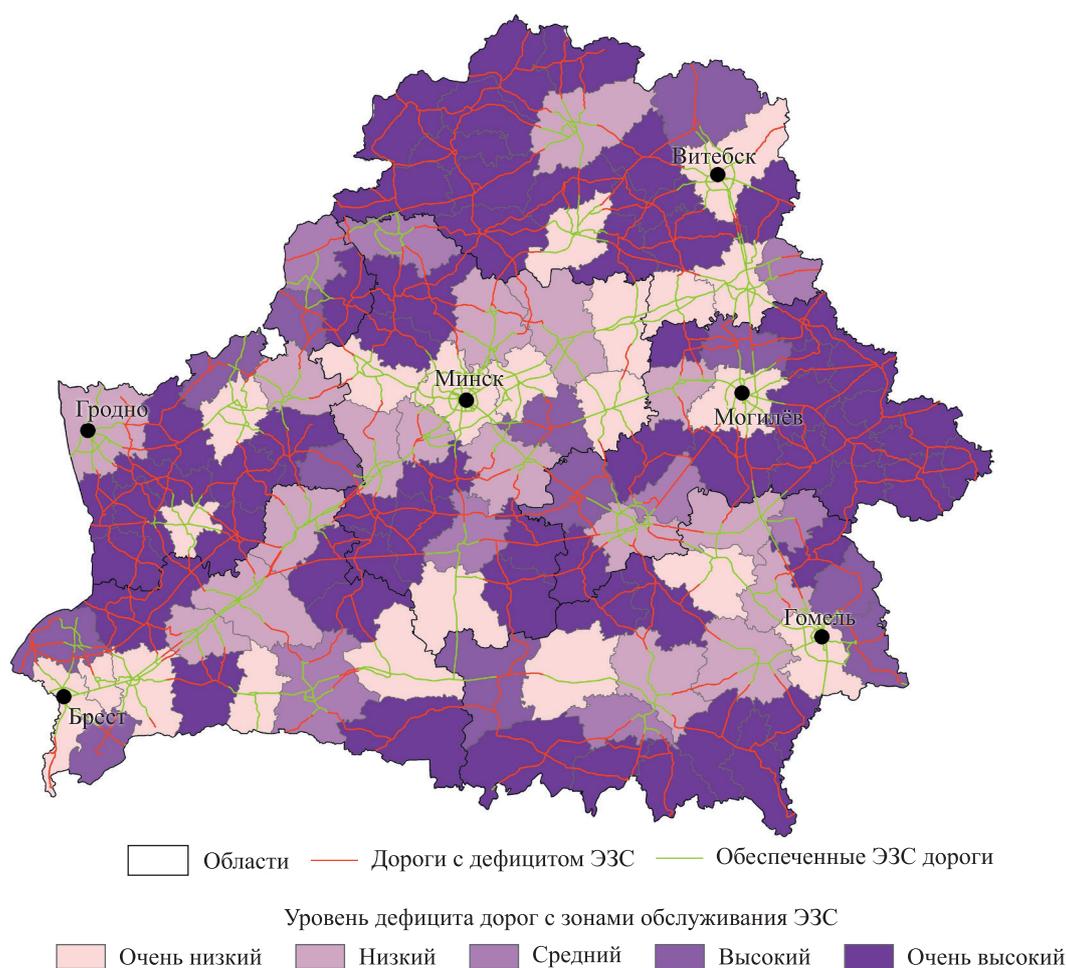


Рис. 6. Распределение административных районов Республики Беларусь по уровню дефицита дорог с зонами обслуживания ЭЗС в 2021 г. (составлено по данным сайта ПО «Белоруснефть»)

Fig. 6. Distribution of administrative districts of the Republic of Belarus by level of road deficit with EVCS service areas in 2021 (compiled according to website of production association «Belorusneft» data)

Для решения вопроса о недостаточной обеспеченности территории страны ЭЗС возможна их установка на участках дорог с дефицитом ЭЗС, однако с уже имеющейся придорожной инфраструктурой (рис. 7). К таким локациям можно отнести кафе и рестораны, магазины, гостиницы, банки, зоны придорожного сервиса (мойки, стоянки, парки) и др.

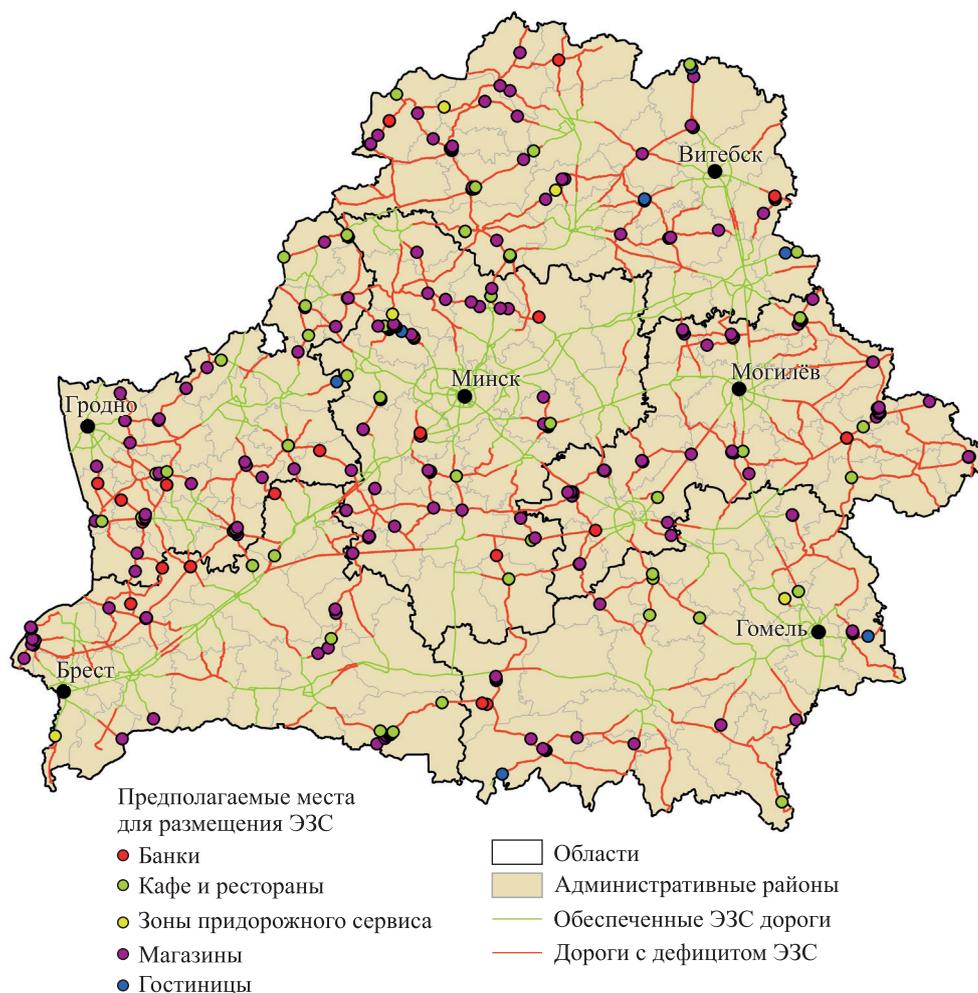


Рис. 7. Потенциальные центры притяжения для размещения ЭЗС в Республике Беларусь (составлено по данным картографической базы *OpenStreetMap*)

Fig. 7. Potential attraction centres for EVCS installation the Republic of Belarus (compiled according to cartographic database *OpenStreetMap* data)

Размещение ЭЗС в таких локациях может быть целесообразным с экономической точки зрения, поскольку их установка вблизи существующей инфраструктуры должна обходиться дешевле, чем новое строительство. Выделяется ряд административных районов, где имеется значительное количество объектов придорожной инфраструктуры, но при этом наблюдается высокий уровень дефицита ЭЗС (Молодечненский, Браславский, Мостовский, Волковысский районы и др.). Такая дифференциация позволяет вычленить территории с уже имеющейся инфраструктурой для установки в них ЭЗС в первую очередь и территории без нее для установки ЭЗС во вторую очередь. Тем не менее для оценки экономической эффективности размещения ЭЗС необходим анализ потенциального автомобильного трафика, что выступает интересным объектом дальнейших географических исследований по данному направлению.

Заключение

Анализ рынка электромобилей в Республике Беларусь показал наличие растущего спроса на персональный электротранспорт. Так, за 2021–2022 гг. количество электромобилей увеличилось с 1600 до 3635 ед., обеспечив прирост более 127 %, а их доля в общей структуре повысилась с 0,05 до 0,12 %. Расширение использования электротранспорта в стране привело к развитию сопутствующей инфраструктуры. Если в 2017 г. на территории Республики Беларусь находилось 17 ЭЗС, то в июле 2023 г. насчитывалось уже около 900 публичных ЭЗС.

В ходе проведенного исследования был разработан методический алгоритм географического анализа современной территориальной структуры сети ЭЗС, позволивший установить, что в Республике Беларусь 47 % административных районов не имеют ни одной ЭЗС. Этот факт определяет необходимость

оценки потенциала пространственно сбалансированного размещения ЭЗС в данных районах, для чего были выявлены участки дорожной сети, не покрытые ЭЗС, в том числе с существующей придорожной инфраструктурой, способной выступать центром притяжения для автомобилистов.

Исходя из географии зон обслуживания имеющихся ЭЗС, наиболее обеспеченным участком является трансъевропейский транспортный коридор № 2 (Е30), проходящий по маршруту Брест – Минск – граница Российской Федерации (магистраль М1). При этом только участок дороги от г. Минска до г. Орши имеет полное покрытие зонами обслуживания ЭЗС. Менее эффективны участки магистралей М3, М8 и М11, где зарядные станции располагаются только в крупных городах и отсутствуют на межселенных территориях.

При определении суммарного расстояния, на котором необходимо размещать ЭЗС, рассчитано, что для полного покрытия всех основных автомобильных дорог в стране необходимо установить более 200 ЭЗС с учетом норматива 1 ЭЗС на 50 км. Оценка административных районов по уровню дефицита покрытия зонами обслуживания ЭЗС выявила, что 72 административных района из 118 имеют высокий и очень высокий уровень дефицита, 8 административных районов – средний уровень дефицита и 38 административных районов – низкий и очень низкий уровень дефицита. Их сопоставление с типами административных районов и транспортных узлов Республики Беларусь по продуктивности автотранспорта позволило вычленить как совпадения, так и некоторые несоответствия в степени развитости сети, качестве работы автотранспорта и уровне дефицита ЭЗС.

Выявлены потенциальные локации для совершенствования территориальной организации инфраструктуры ЭЗС, основанные на их размещении в местах наличия придорожной инфраструктуры, что также позволяет выделить территории для установки ЭЗС в первую очередь (Молодечненский, Браславский, Мостовский, Волковысский районы и др.).

Дальнейшими направлениями исследований могут выступить отход от привязки обеспеченности ЭЗС к конфигурации сети и более четкая ориентация на демографический и социально-экономический потенциал территории возможного размещения инфраструктуры ЭЗС.

Библиографические ссылки

1. Miller JH. GIS and geometric representation in facility location problems. *International Journal of Geographical Information Systems*. 1996;10(7):791–816. DOI: 10.1080/02693799608902110.
2. Chen TD, Kockelman KM, Khan M. Locating electric vehicle charging stations: a parking-based assignment method for Seattle, Washington. *Transportation Research Record*. 2013;2385(1):28–36. DOI: 10.3141/2385-04.
3. Long Pan, Enjian Yao, Yang Yang, Rui Zhang. A location model for electric vehicle (EV) public charging stations based on drivers' existing activities. *Sustainable Cities and Society*. 2020;59:102192. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102192.
4. Писарев ГА. Методы размещения зарядных станций электромобилей [диссертация]. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2019. 74 с.
5. Kai Huang K, Kanaroglou P, Xiaozhou Zhang. The design of electric vehicle charging network. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2016;49:[17 p.]. DOI: 10.1016/j.trd.2016.08.028.
6. Ran Wei, Murray AT. Continuous space maximal coverage: insights, advances and challenges. *Computers & Operations Research*. 2015;62:325–336. DOI: 10.1016/j.cor.2014.04.010.
7. de Jong W, Vogels J, van Wijk K, Cazemier O. The key factors for providing successful public transport in low-density areas in The Netherlands. *Research in Transportation Business & Management*. 2011;2:65–73.
8. Асадов ДГ. Исследование состояния и перспективы развития инфраструктуры электромобилей. *Международный технико-экономический журнал*. 2011;5:132–135. EDN: ОРНМГР.
9. Мангул ДИ. Перспективы развития электрифицированного автотранспорта в Беларуси. В: Жуковская ТЕ, составитель. *Актуальные проблемы энергетики. Электроэнергетические системы и сети. Материалы 76-й научно-технической конференции студентов и аспирантов; апрель 2020 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Белорусский национальный технический университет; 2020. с. 125–130.
10. Лишик МВ. Формирование перспективной инновационной ситуации для электромобилей в Республике Беларусь. В: Белорусский национальный технический университет. *Материалы II Китайско-белорусского молодежного конкурса научно-исследовательских и инновационных проектов; 20–21 мая 2021 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Белорусский национальный технический университет; 2021. с. 219.

References

1. Miller JH. GIS and geometric representation in facility location problems. *International Journal of Geographical Information Systems*. 1996;10(7):791–816. DOI: 10.1080/02693799608902110.
2. Chen TD, Kockelman KM, Khan M. Locating electric vehicle charging stations: a parking-based assignment method for Seattle, Washington. *Transportation Research Record*. 2013;2385(1):28–36. DOI: 10.3141/2385-04.
3. Long Pan, Enjian Yao, Yang Yang, Rui Zhang. A location model for electric vehicle (EV) public charging stations based on drivers' existing activities. *Sustainable Cities and Society*. 2020;59:102192. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102192.

4. Pisarev GA. *Metody razmeshcheniya zaryadnykh stantsii elektromobilei* [Methods for placing electric vehicle charging stations] [dissertation]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2019. 74 p. Russian.
5. Kai Huang K, Kanaroglou P, Xiaozhou Zhang. The design of electric vehicle charging network. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2016;49:[17 p.]. DOI: 10.1016/j.trd.2016.08.028.
6. Ran Wei, Murray AT. Continuous space maximal coverage: insights, advances and challenges. *Computers & Operations Research*. 2015;62:325–336. DOI: 10.1016/j.cor.2014.04.010.
7. de Jong W, Vogels J, van Wijk K, Cazemier O. The key factors for providing successful public transport in low-density areas in The Netherlands. *Research in Transportation Business & Management*. 2011;2:65–73.
8. Asadov DG. Analyzing state and development prospects of electric vehicle infrastructure. *International Technical and Economic Journal*. 2011;5:132–135. Russian. EDN: OPHMGP.
9. Mangul DI. [Prospects for the development of electrified vehicles in Belarus]. In: Zhukovskaya TE, compiler. *Aktual'nye problemy energetiki. Elektroenergeticheskie sistemy i seti. Materialy 76-i nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov; aprel' 2020 g.; Minsk, Belarus'* [Current problems of energy. Electric power systems and networks. Proceedings of the 76th scientific and technical conference of undergraduate and graduate students; 2020 April; Minsk, Belarus]. Minsk: Belarusian National Technical University; 2020. p. 125–130. Russian.
10. Lishik MV. [Formation of a promising innovative situation for electric vehicles in the Republic of Belarus]. In: Belarusian National Technical University. *Materialy II Kitaisko-belorusskogo molodezhnogo konkursa nauchno-issledovatel'skikh i innovatsionnykh proektov; 20–21 maya 2021 g.; Minsk, Belarus'* [Proceedings of the 2nd Chinese-Belarusian youth competition of research and innovation projects; 2021 May 20–21; Minsk, Belarus]. Minsk: Belarusian National Technical University; 2021. p. 219. Russian.

Получена 15.12.2023 / исправлена 15.02.2024 / принята 29.02.2024.
Received 15.12.2023 / revised 15.02.2024 / accepted 29.02.2024.

УДК 551.79:561(476)

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ХРОНОЛОГИИ МУРАВИНСКОГО (МИКУЛИНСКОГО, ЭМСКОГО) МЕЖЛЕДНИКОВЬЯ НА ЗАПАДЕ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

Я. К. ЕЛОВИЧЕВА¹⁾, Н. М. ПИСАРЧУК¹⁾

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

Аннотация. Представлены обновленные материалы палинологического изучения стратотипических и опорных разрезов муравинского (микулинского, эмского) межледниковья и абсолютного датирования отложений, а также предложен современный взгляд на геохронологию пятой морской изотопной стадии. Исследования проведены на основе сопоставления имеющихся палинологических данных по разрезам запада Восточно-Европейской равнины с геохронологическими шкалами Северного полушария. Последовательная летопись осадконакопления в палеоархивах, новый методический подход к сплошному серийному опробованию органогенных пород в керне скважин и естественных обнажениях (каждые 1–5 см), комплексные палинологические методы и методы абсолютного датирования на базе сопряженного анализа за последние 10 лет позволили с высокой детальностью изучить озерно-болотные толщи осадков и получить более достоверные материалы, уточняющие хроностратиграфическую позицию последнего и самого теплого, муравинского (микулинского, эмского), межледниковья.

Ключевые слова: муравинское (микулинское, эмское) межледниковье; палинологический анализ; абсолютное датирование; фазы развития растительности; геохронологическая шкала.

MODERN CONCEPTS ABOUT THE CHRONOLOGY OF THE MURAVIN (MIKULIN, EEMIAN) INTERGLACIAL IN THE WEST OF THE EASTERN EUROPEAN PLAIN

Ya. K. YELOVICHEVA^a, N. M. PISARCHUK^a

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

Corresponding author: N. M. Pisarchuk (pisarchuk@bsu.by)

Abstract. The article presents updated materials on the palynological study of stratotype and reference sections of the Muravin (Mikulin, Eemian) interglacial and absolute dating of sediments and also offered a modern look at the geo-

Образец цитирования:

Еловичева ЯК, Писарчук НМ. Современные представления о хронологии муравинского (микулинского, эмского) межледниковья на западе Восточно-Европейской равнины. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;1:76–97.
EDN: DBYHXY

For citation:

Yelovicheva YaK, Pisarchuk NM. Modern concepts about the chronology of the Muravin (Mikulin, Eemian) interglacial in the west of the Eastern European Plain. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;1:76–97. Russian.
EDN: DBYHXY

Авторы:

Ядвига Казимировна Еловичева – доктор географических наук, профессор; профессор кафедры физической географии мира и образовательных технологий факультета географии и геоинформатики.
Наталья Михайловна Писарчук – старший преподаватель кафедры физической географии мира и образовательных технологий факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Yadviga K. Yelovicheva, doctor in science (geography), full professor; professor at the department of physical geography of the world and educational technologies, faculty of geography and geoinformatics.
yelovicheva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9132-2600>
Natalia M. Pisarchuk, senior lecturer at the department of physical geography of the world and educational technologies, faculty of geography and geoinformatics.
pisarchuk@bsu.by
<https://orcid.org/0000-0003-3747-9628>

chronology of the fifth marine isotope stage. Research conducted on the basis of the parliamentary conference provides evidence of palynological data on sections of the west of Eastern European Plain with geochronological scales of the northern hemisphere. Consistent sedimentation record in paleoarchives, a new methodological approach in the sequential serial study of organogenic rocks in borehole cores and natural outcrops (every 1–5 cm), complex palynological and absolute dating methods based on conjunctive analysis over the past 10 years, lake-marsh evidence has been studied in great detail measurements and obtain more approximate materials that clarify the chronostratigraphic point of the last and warmest Muravin (Mikulin, Eemian) interglacial.

Keywords: Muravin (Mikulin, Eemian) interglacial; palynological analysis; absolute dating; phases of vegetation development; geochronological scale.

Введение

Несмотря на широкое использование в геологии и смежных науках достаточно информативного палинологического анализа, который представляет собой основу стратиграфических и палеогеографических построений в плейстоцене, специалисты до сих пор расходятся во мнениях о временных рамках, продолжительности и детальной хронологии событий межледниковий, в том числе, казалось бы, уже наиболее полно исследованного муравинского межледниковья, сопоставляемого с микулинским межледниковьем в Восточной Европе и эемским интергляциалом в Западной и Центральной Европе.

Органогенные толщи указанного выше возраста, залегающие под образованиями последнего и самого малого по площади, поозерского, оледенения (валдайского оледенения на Восточно-Европейской равнине и вюрмского оледенения на Западно-Европейской равнине) или перекрытые коррелятными ему отложениями южнее границы предельного распространения ледника, выявлены скважинами на небольших глубинах, расположены в приповерхностной части плейстоценовой толщи либо практически выведены на дневную поверхность в естественных обнажениях. Являясь весьма доступными для многосторонних геологических и палеонтологических исследований как специалистами научных учреждений, так и в большей мере сотрудниками специализированных лабораторий при управлениях геологии, которые выполняют существенный объем палинологических работ при крупномасштабном геологическом картировании территорий государств бывшего Союза, они стали важным стратиграфическим репером верхней части плейстоценовой осадочной толщи.

Тем не менее первичные пыльцевые диаграммы были построены в условиях редкого опробования на анализ мощных озерно-болотных накоплений (каждые 0,5–1,0 м) часто лишь в нижней части отложений, отражающей оптимальные слои муравинского (микулинского, эемского) горизонта. Этот факт позволил зарубежным специалистам убедить научное окружение в характеристике муравинского (микулинского, эемского) межледниковья как однооптимального межледникового интервала позднего плейстоцена, изредка встречающиеся в разрезах вышезалегающие слои с незначительными пиками пыльцы мезо- и термофильных пород считались переотложенными. Многие восточноевропейские ученые придерживались таких же взглядов, ссылаясь на перспективность зарубежных стратиграфических построений. Имевшиеся единичные абсолютные датировки плейстоценовых пород (по одной на разрез) лишь подтверждали возраст межледниковых интервалов и их принадлежность к соответствующему горизонту. Со временем палинологические исследования пород охватили геологический разрез в объеме всего плейстоцена, длительность которого увеличивалась за счет удревления его нижней части благодаря появлению новых и редко датированных археологических находок, и гипотеза об однооптимальности древних межледниковых эпох распространилась повсеместно.

Вместе с тем инновационные технологии стран Европы, США и Японии проявились в разработке и применении новых методов абсолютного датирования отложений не только голоцена и поозерского (валдайского, вюрмского) оледенения (в пределах до 60 тыс. лет), но и более древних образований континентального плейстоцена, а также в проведении глубоководного бурения океанических и морских толщ, отражавших самые крупные, глобальные по масштабу, непрерывные геологические события. Поэтому они выступали источниками сведений о последовательной цепи климатических событий в рамках международных проектов во второй половине XX – начале XXI в.

Материалы и методы исследования

В дополнение к первоначально созданным альпийской палеоклиматической кривой Пенка – Брикнера¹ [1; 2], астрономическим инсоляционным кривым Миланковича [3; 4], нашедшим согласование с данными в области изменения климата [3] и уточненной информацией о числе галечных слоев

¹Марков К. К., Величко А. А., Лазуков Г. И., Николаев В. А. Плейстоцен. М. : Высш. школа, 1968. 304 с.

в террасах северных предгорий Альп (В. Зёргель на территории средней Германии, Б. Эберль в Альпах установили по моренам три пика поозерского (валдайского, вюрмского) оледенения (тройной пик на кривой Миланковича) и по два пика каждого из трех предшествующих ему оледенений (парные пики на той же кривой) [5]), и разработанным в дальнейшем температурным кривым [6; 7], климатическим шкалам Краснова [8–11] и Шнитникова [12], инсоляционной кривой Шараф – Будниковой [13; 14] полученные результаты масштабного бурения выразились в возникновении большой серии новых международных шкал на геохронологической основе, в частности изотопно-кислородных [15–23], изотопно-углеродных [22; 24; 25], палеомагнитных [26–31], температурных [32] шкал, построенных по данным изучения глубоководных океанических отложений (атлантическая, тихоокеанская, индийская [33–35] шкалы), внутриконтинентальных морских отложений (байкальская (по содержанию биогенного кремнезема) [35; 36–41], средиземноморская [42–44], каспийская² [45] шкалы) и континентальных почвенно-лессовых серий (центральнокитайская [28; 29], восточноевропейская [46–52], украинская³ [53–61] шкалы), керн льда (антарктическая [32; 62–66], гренландская [67–71] шкалы), которым свойственно практически непрерывное осадконакопление и льдообразование, а также по данным ESP-датирования отложений с находками моллюсков (малакологическая шкала [51; 72–77]), глобально осредненной изотопно-кислородной бентосной записи LR04 (по бентосным фораминиферам) [78–83], изменений кальцита пресноводных карбонатных отложений в ледниковой области Европы и Северной Америки [84; 85], тысячелетних древесно-кольцевых хронологий (дендрохронологические шкалы⁴ [86]).

Ученые всех стран получили новую огромную информацию о природных событиях последних 2,5 млн лет. Временной интервал длительностью 700–800 тыс. лет с резкой сменой ритмичности различных кривых и специфической закономерностью чередования каждые 100 лет одного оледенения и одного межледниковья был отнесен к собственно гляциоплейстоцену с четкой нижней границей природного феномена – сменой палеомагнитных эпох Матуямы – Брюнеса, что положило конец многолетним прениям по этим вопросам. На данном интервале были выделены 19 морских изотопных стадий (МИС) по изменениям крупных этапов с диаметрально противоположными температурными колебаниями – холодные четные МИС с восьмью ледниковыми горизонтами и теплые нечетные МИС с девятью межледниковыми горизонтами. При этом требовалось, чтобы каждая МИС строго соответствовала самостоятельному горизонту (лишь поозерское (валдайское, вюрмское) оледенение объединяет три стадии – МИС-2 – МИС-4). Уникальное по развитию природной среды гольштейнское (лихвинское, александрийское) межледниковье соотносено только с МИС-11 по решению XIV конгресса Международного союза по изучению четвертичного периода (ИНКВА).

Результаты и их обсуждение

Вполне естественно, что новые сведения, обусловленные лучшей информативностью геохронологических шкал, потребовали от специалистов соответствующей корректировки их прежних взглядов – признания значительно большего количества оледенений (свыше четырех) и межледниковий (свыше трех) и их более сложной внутренней структуры с точки зрения наличия вариаций пиков изотопных отношений: число оптимумов межледниковых эпох составляет от одного до трех, и наиболее мощным из них является ранний оптимум (по высокому содержанию пыльцы мезо- и термофильных пород), в периоды оледенений выделяется несколько стадий и межстадиалов. Указанное выше способствовало выработке рекомендаций по созданию новых стратиграфических схем гляциоплейстоцена Восточно-Европейской равнины (2011) и региональных схем на основе сопоставления горизонтов с МИС, переоценке представлений о его объеме, стратиграфии и геохронологии, показало существенную сложность развития природной среды, а также позволило провести аналогию между природными событиями и явлениями во времени и пространстве.

Но оказалось, что перечисленные геохронологические шкалы неоднозначно (в силу имевшейся погрешности методов определения абсолютного возраста) отражали границы каждой МИС, которые подвергались корректировке новыми датировками, полученными из континентальных отложений и палеонтологических объектов. Так, установленный возраст всей МИС-5 (от 70 до 110–125 тыс. лет) указывал на ее длительность в пределах 40–60 тыс. лет и наличие четко выраженных трех максималь-

²Янина Т. А. Палеогеография бассейнов Понто-Каспия в плейстоцене по результатам малакофаунистического анализа : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.25. М., 2009. 42 с.

³Шелкопояс В. Н. Термолюминесцентный метод и его применение для стратиграфии плейстоценовых субаэральных отложений : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук : 04.00.01. Киев, 1974. 45 с.

⁴Тишин Д. В., Чижикова Н. А. Дендрохронология : учеб.-метод. пособие. Казань : Казан. ун-т, 2018. 34 с.

ных и двух минимальных пиков изотопных кривых, адекватных трем оптимумам и двум разделявшим их межоптимальным похолоданиям. Точке зрения о такой сложной палеогеографической обстановке муравинского (микулинского, эемского) межледниковья соответствовали материалы по отдельным разрезам Восточно-Европейской равнины [87; 88].

В свою очередь, западноевропейские ученые разделили МИС-5 на пять подстадий (МИС-5а – МИС-5е) и только самой ранней из них, подстадией МИС-5е, ограничили муравинский (микулинский, эемский) однооптимальный интергляциал [89] в рамках от 110–113 до 130 тыс. лет назад (объемом ≈ 20 тыс. лет), что впоследствии было утверждено Международной комиссией по стратиграфии [90], а вышележащие отложения подстадий МИС-5а – МИС-5d в границах от 70–75 до 110–113 тыс. лет назад отнесли к поозерскому (валдайскому, вюрмскому) раннеледниковью и ледниковью в ранге межстадиалов и стадиалов. К такому же решению пришли и ученые из бывшего Союза [91]. Следует отметить, что к тому времени была составлена таблица [34; 71] с указанием вариантов возрастных границ подстадий. Так, подстадия МИС-5.1 соответствует подстадия МИС-5а с нижней границей 79–80 тыс. лет назад, подстадия МИС-5.2 – подстадия МИС-5b с нижней границей 86–87 тыс. лет назад, подстадия МИС-5.3 – подстадия МИС-5с с нижней границей 97–99 тыс. лет назад, подстадия МИС-5.4 – подстадия МИС-5d с нижней границей 100–107 тыс. лет назад, а подстадия МИС-5.5 – подстадия МИС-5е с нижней границей 122 тыс. лет назад. Верхняя граница муравинского (микулинского, эемского) межледниковья оценена в 71 тыс. лет назад, а его нижняя граница – в 127–128 тыс. лет назад, т. е. длительность эпохи составила 57 тыс. лет.

Вопросы хронологических границ, продолжительности и числа оптимумов муравинской (микулинской, эемской) межледниковой эпохи были предметом горячего обсуждения в 1998 г. на тематическом симпозиуме «The Eemian: local sequences, global perspectives» (Керкраде, Нидерланды) [92; 93] и международном семинаре «Paleogeografia gornego Pleistocenu i Holocenu Wschodniej Polski i Bialorusi» (Краков, Польша) [94; 95]. В рамках последнего наряду с докладами зарубежных ученых о ведущей позиции муравинского (микулинского, эемского) межледниковья в объеме только подстадии МИС-5е и его однооптимальности был представлен доклад Я. К. Еловичевой [94; 96], впервые не только отразивший специфику фаз растительности в разрезах с двумя-тремя оптимумами этой межледниковой эпохи на территории Беларуси, но и подтвердивший достоверность ее корреляции с другими схемами не по схожести пыльцевых диаграмм, как это было принято в то время, а по макросукцессиям палеофитоценозов. Данный методический подход и построенный профиль последовательности изменения структуры макросукцессионных рядов муравинского (микулинского, эемского) межледниковья (по 40 диаграммам) в странах, находящихся на территории от атлантического побережья до Предуралья по широте расположения Беларуси, показали, что неоспоримая коррелятивность одновозрастных разрезов имеет место только для ближних районов, а ошибочная – для удаленных районов, поскольку крайние диаграммы и степень экзотичности флоры сильно различались. Кроме того, на основе установленной продолжительности макросукцессии самого молодого и не завершеного еще голоценового межледниковья (10,3 тыс. лет) с пока еще достоверным одним оптимумом (АТ-период) проведен примерный расчет длительности межледниковий гляциоплейстоцена – однооптимального (≈ 15 –20 тыс. лет), двухоптимального (≈ 35 –40 тыс. лет) и трехоптимального (≈ 60 тыс. лет), что соответствовало разному объему изотопных ярусов [97].

Дальнейший детальный анализ изотопно-кислородных шкал различных отложений позднего гляциоплейстоцена показал ошибочность взглядов на однооптимальность муравинского (микулинского, эемского) межледниковья и его корреляцию только с подстадией МИС-5е. Как видно на примере разреза «Гранд-Пиль» (см. вклейку, рис. 1), характер и ход изотопных и древесных кривых отражали принадлежность этого межледниковья ко всей стадии МИС-5. Обе записи однозначно трактовали единые природные условия в интервале от 70–74 до 130 тыс. лет назад, что отвечает верхней и нижней границам муравинского (микулинского, эемского) межледниковья и его полному объему около 60 тыс. лет. Пять подстадий внутри этого интервала в действительности четко коррелируют с пятью основными подгоризонтами: подстадия МИС-5е – с началом межледниковья и первым (основным) оптимумом, подстадия МИС-5с – со вторым оптимумом, подстадия МИС-5а – с позднемежледниковьем и третьим оптимумом, а подстадии МИС-5d и МИС-5b – с двумя похолоданиями.

На других появившихся шкалах [101] так же четко, как и на модели хода кривых с различными периодами, фиксировалась трехоптимальность муравинского (микулинского, эемского) межледниковья. Однако по поводу объема этого межледниковья согласие так и не было достигнуто, велась дискуссия о хронологических рамках относимых к нему отложений в пределах от 145 до 70 тыс. лет назад с вариацией длительности их накопления до 60–75 тыс. лет. Данная точка зрения сохранялась достаточно долгое время вследствие признания высокого авторитета зарубежных ученых белорусскими специалистами-палинологами.

Таким образом, геохронологическая позиция муравинского (микулинского, эемского) межледниковья на Восточно-Европейской равнине оставалась неоднозначной в следующих интервалах:

- в интервале от 70–75 до 100–110 тыс. лет назад и даже до 130 тыс. лет назад длительностью 30–50 тыс. лет (на изотопных шкалах [7; 15–18; 20; 22; 89]);
- в интервале от 115 до 128 тыс. лет назад длительностью 13 тыс. лет (по изотопному составу бен-тосных фораминиферов [78; 79; 81–83; 102] на принятой Международной комиссией по стратиграфии геохронологической схеме [90]);
- в интервале от 70 до 145 тыс. лет назад длительностью 75 тыс. лет (по результатам палинологических исследований и ЭПР-датирования малакофауны (раковин морских моллюсков) из отложений на территории Северной Евразии, а также по данным ИК-ОСЛ-датирования зерен полевых шпатов из континентальных отложений на территории Литвы [74; 103; 104]), что значительно превосходит объем подстадии МИС-5е, захватывает часть МИС-6 (сожское (вартинское, московское) оледенение) и всю МИС-5 [74]. Так, этими же специалистами на основании ИК-ОСЛ-датирования и палинологического изучения отложений опорного разреза «Вока» (юго-западное побережье Финского залива) было показано, что вторая половина муравинского (микулинского, эемского) межледниковья соответствует интервалу времени от 70 до 100 тыс. лет назад, т. е. второй половине МИС-5 [104; 105].

Сведения о том, что муравинское (микулинское, эемское) межледниковье охватывает больший интервал, чем подстадия МИС-5е, получены и для озерных образований в разрезе «Вевайс» (северо-восток Германии) по ОСЛ-датировкам 126 ± 16 и $108,9 \pm 7,8$ тыс. лет назад [106]. Как видно, высокая длительность межледниковой эпохи (30–75 тыс. лет) может предполагать наличие в то время не менее трех оптимумов, исходя из длительности развития макросукцесий палеофитоценозов.

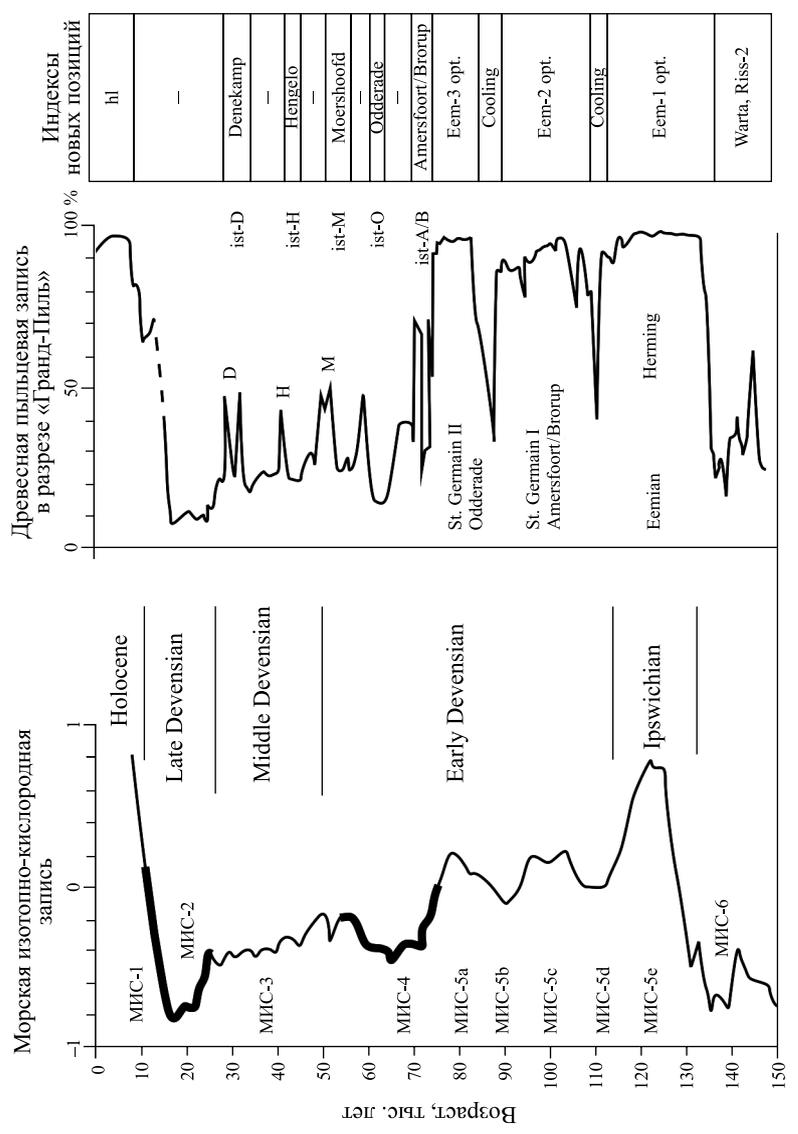
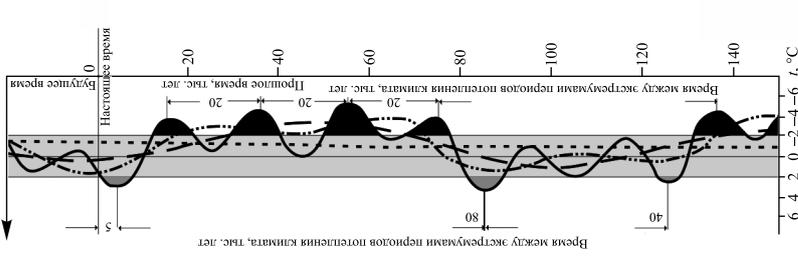
Со временем степень полноты пыльцевых диаграмм изменилась по причине востребованности учеными знаний о более полной хронологии природных явлений и событий в условиях последовательности осадконакопления в палеоводоемах. Эта проблема решилась путем применения нового методического подхода к сплошному опробованию керна скважин и естественных обнажений (каждые 1–2 см) на основе сопряженного анализа, что позволило значительно детализировать садку органического материала в древних водоемах, полнее отразить существенные изменения состава спектров по разрезу. В результате ранние диаграммы состава древесных пород сменились более полными и максимально информативными диаграммами, на которых показаны все выявленные ископаемые растительных микрофоссилий в образцах, что обеспечило характеристику этапов развития растительности и изменения климата, а также прочих компонентов природной среды. Уже к концу XX – началу XXI в. в пределах территории Восточно-Европейской равнины ученые-палинологи выявили большее число разновозрастных разрезов гляциоплейстоцена с несколькими оптимумами, положив начало новому направлению – детальной микростратиграфии. Установленные в разрезах вторые и третьи оптимумы были также выражены макросукцессией палеофитоценозов, наличие которой доказало их самостоятельность.

Вопросы продолжительности и возрастных рамок муравинского (микулинского, эемского) межледниковья, оставшиеся актуальными из-за ограниченного числа используемых методов абсолютного датирования, результаты которых имеют погрешности при исследовании более древних толщ осадков, стали получать разрешение. Важность в работе приобрела четкая привязка геохронологических данных к определенным фазам развития растительности при пыльцевом анализе.

Так, по результатам исследований в разрезе «Орляки» (пограничье Витебской области Беларуси и Смоленской области России) для фаз развития растительности *Quercus*, *Alnus*, *Corylus*, *Tilia*, *Carpinus*, соответствующих пыльцевым зонам *mr-4* и *mr-5*, раннего оптимума получена дата 104 ± 8 тыс. лет назад (ТЛМ-363), раннеледниковья поозерского (валдайского, вюрмского) оледенения – более 145 тыс. лет назад (ТЛМ-364), усвячской свиты этого оледенения – 29 ± 2 тыс. лет назад (ТЛМ-365), а также 23 ± 3 тыс. лет назад (ТЛМ-366), максимальной оршанской его стадии – 17 ± 1 тыс. лет назад (ТЛМ-367) [107].

В разрезе «Мурава» (Беларусь) [87; 100; 108; 109] на развернутой палинологической диаграмме (см. вклейку, рис. 2) отражены фазы развития растительности на окружавшей муравинский палеоводоем территории в течение сожского (вартинского, московского) позднеледниковья, муравинского (микулинского, эемского) межледниковья (раннемежледниковья (пыльцевые зоны *mr-1* – *mr-3*), раннего оптимума (пыльцевые зоны *mr-4* – *mr-6*), промежуточного похолодания (пыльцевые зоны *mr-7*, *mr-8*), среднего оптимума (пыльцевая зона *mr-9*), позднемежледниковья (пыльцевая зона *mr-10*)) и поозерского (валдайского, вюрмского) раннеледниковья. Экзотические и редковстречаемые растения в то время представляли *Abies*, *Larix*, *Betula* sect. *Nanae*, *Alnaster fruticosus*, *Selaginella selaginoides*, *Ephedra*, *Hyppophae*, *Osmunda cinnamomea*, *Nuphar luteum*, *Nymphaea alba*.

Концептуальная модель
интегрально-динамической
взаимосвязи между основными
глобальными факторами
формирования климата



Индексы Беларуси	
1	hl-igl
2	pz-3
3	pz-2
4	ist
5	pz-1
6	Третий оптимум
	Похолодание
	Второй оптимум
	Похолодание
	Первый оптимум
	sz-gl

- ⋯⋯⋯ Период около 200 млн лет (время вращения Солнечной системы вокруг галактического центра)
- ⋯⋯ Период 100 тыс. лет (время изменения эксцентриситета орбиты Земли)
- ⋯⋯⋯ Период 40 тыс. лет (время изменения наклона оси вращения Земли к плоскости эклиптики)
- ⋯⋯ Период 20 тыс. лет (время процессии земной оси)
- Периоды экстремального потепления климата
- Периоды экстремального похолодания

Рис. 1. Корреляция позднеледникового периода (последние 150 тыс. лет) морской изотопно-кислородной (по номенклатуре Великобритании), дресно-пыльцевой (разрез «Гранд-Пиль» на юго-востоке Франции) записей, концептуальной модели интегрально-динамической взаимосвязи между основными глобальными факторами формирования климата со схемой позднего гляциоплейстоцена Беларуси. Интерстадиалы указаны по индексации Нидерландов [98] (составлено по данным публикаций [99–101])

Fig. 1. Correlation of late glaciopleistocene (last 150 thsd years) marine oxygen isotope (according to British nomenclature), tree-pollen (section «Grand Pile» in southeastern France) records, a conceptual model of the integral-dynamic relationship between the main global climate formation factors with the scheme Late Glaciopleistocene of Belarus. Interstadials are indicated according to Dutch indexing [98] (compiled according to publications [99–101])

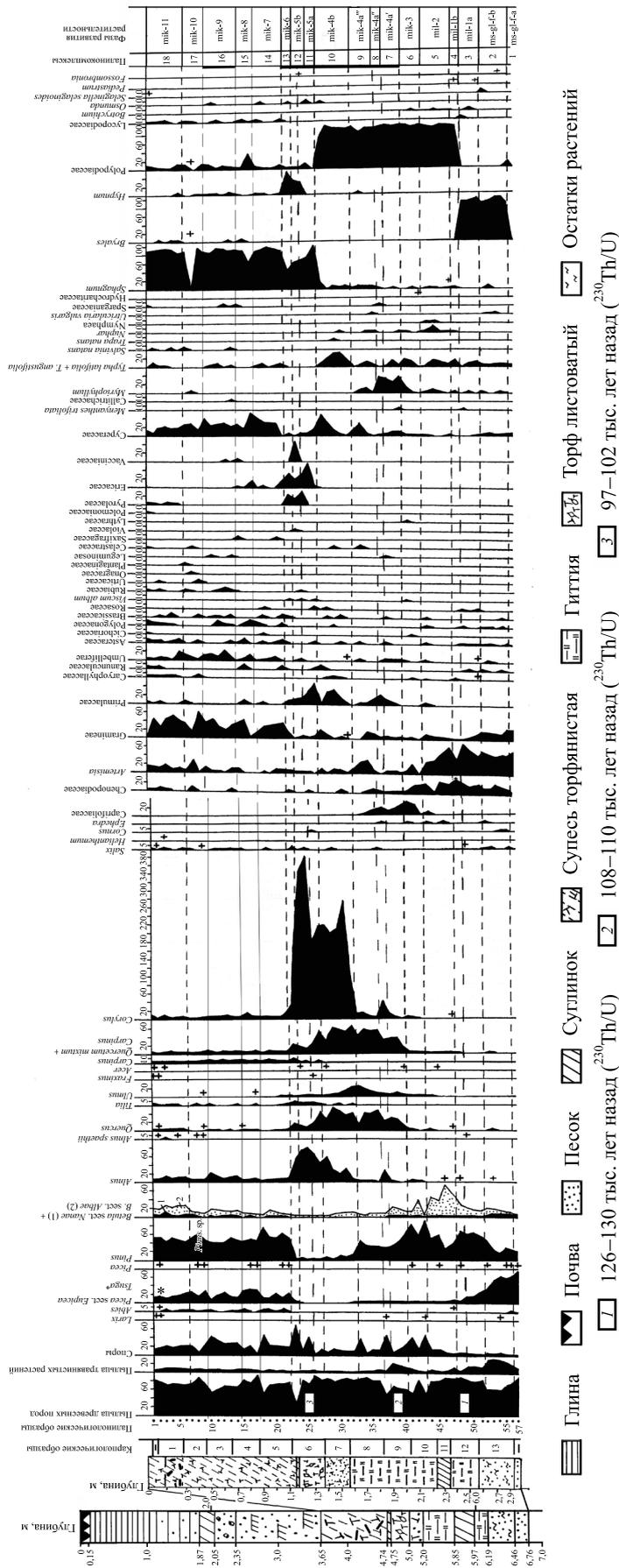


Рис. 3. Палинологическая диаграмма древнеозерных отложений у д. Нижней Боярщины
 Fig. 3. Palynological diagram of ancient lake sediments near the Nizhnyaya Boyarshchina Village

Интервалы абсолютного возраста органогенных отложений муравинского

Absolute age intervals of organogenic deposits of the Muravin

Горизонт	Возраст	Подгоризонт	Пыльцевые зоны [124]	Пыльцевые зоны [100]	Фазы развития растительности
Поозерский (валдайский, вюрмский)	МИС-4	Раннеледниковье	Q-3w	gl-pz-s	NAP + P + B
Муравинский (микулинский, эмский)	70 тыс. лет	Позднемежледниковье	–	mr-12b	Pic + B
			–	mr-12a	P + B
	МИС-5а	Третий оптимум	–	mr-11	Q. m. + P + B
	МИС-5b	Похолодание	–	mr-10b	P
			–	mr-10a	P + B
	МИС-5с	Второй оптимум	–	mr-9	Q. m. + P
	МИС-5d	Похолодание	M-8	mr-8	P
			M-7	mr-7	Pic
	МИС-5е	Первый оптимум	M-6	mr-6	Carp
			M-5	mr-5	Til
			M-4b	mr-4b	Cor + Al
			M-4a	mr-4a	Q + U
	110–130 тыс. лет	Раннемежледниковье	M-3	mr-3	P + Q. m.
			M-2	mr-2	P + B
M-1			mr-1	B	
Сожский (варгинский, московский)	МИС-6	Позднеледниковье	Q-2-mos	gl-sz-f	NAP + P + B

Примечания: 1. В таблице приняты следующие обозначения: NAP – травы; P – *Pinus*, B – *Betula*; Q. m. – *Quercetum* относящиеся только к пыльцевой зоне mr-6, знаком ** – значение, относящиеся ко всей палинозоне M-4.

(микулинского, эемского) межледниковья разрезов Восточно-Европейской равнины

(Mikulin, Eemian) interglacial sections of the Eastern European Plain

Разрез							
Микулино	Фили	Мурава	Черемошник	Нижняя Боярщина	Килешино	Александровский карьер	Орляки
–	–	–	–	–	–	–	23–29 тыс. лет (ТЛМ) (усвячская свита) 17 тыс. лет (ТЛМ) (оршанская стадия)
–	–	–	–	–	–	–	Более 145 тыс. лет (ТЛМ)
–	–	–	–	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–	115 тыс. лет (ОСЛ)	–
104–116 тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$)	–	96–107 тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$, Th/U) 91–102 тыс. лет (Th/U)*	–	–	–	–	–
–	–	–	–	97–102 тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$)	–	–	104 тыс. лет (ТЛМ, Th/U)
–	104–117 тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$)	105 тыс. лет (ТЛМ)	–	–	–	–	–
–		–	–	108–110 тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$)	113–118 тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$, Th/U)	127 тыс. лет (ОСЛ)	–
–		–	114 тыс. лет (L/L) 115 тыс. лет (TSD)	–	Не более 72 тыс. лет (ОСЛ, ^{14}C)**		–
–		–	–	–	–		–
–		–	–	121–125 тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$)	126–130 тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$)	–	–
–	–	–	–	–	–	–	–

mixtum; Q – *Quercus*; U – *Ulmus*; Cor – *Corylus*; Al – *Alnus*; Til – *Tilia*; Carp – *Carpinus*; Pic – *Picea*. 2. Знаком * отмечено значение,

Данные абсолютного датирования показали, что фазы развития растительности *Carpinus + Picea* (пыльцевые зоны *mr-6*, *mr-7*) имеют возраст $102,6 \pm 11,9$ тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$, № LU-5210U), фаза развития растительности *Carpinus* (пыльцевая зона *mr-6*) относится к 91 ± 6 тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$, № LU-5210U) [100; 110–112], а фаза развития растительности *Tilia* (пыльцевая зона *mr-5*) – к 105 ± 10 тыс. лет (ТЛМ-437) [112; 113].

Но еще более значимыми с 1920-х гг. стали результаты датирования муравинских (микулинских, эемских) отложений при повторном изучении ранее наиболее известных отложений в ранге опорных и стратотипических разрезов на спорово-пыльцевой, палеокарпологический и уранториевый анализы с высоким разрешением (каждые 2–4 см) [114–116]. Полученные специалистами Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета данные были приурочены к узким временным интервалам – палинозомам (фазам развития растительности), поскольку и глубины залегания пород, и их генетические типы в разных расчистках и в различные годы дифференцируются в зависимости от их положения в толще озерной котловины.

В разрезе «Нижняя Боярщина» (Смоленская область, Россия) наиболее детальная и полная палинологическая диаграмма Чеботаревой [88] (сожское (вартинское, московское) позднеледниковье → муравинское (микулинское, эемское) межледниковье с двумя четкими климатическими оптимумами → поозерское (валдайское, вюрмское) раннеледниковье) позднее была дополнена диаграммами Гричука [117], Савельевой [106; 118; 119], Еловичевой и Писарчук [109; 120]. Их сравнение показало, что развернутая диаграмма Еловичевой и Писарчук (см. вклейку, рис. 3) отразила интервалы на окружавшей нижнебоярский палеоводоем территории в течение сожского (вартинского, московского) позднеледниковья, муравинского (микулинского, эемского) межледниковья (раннемежледниковья (пыльцевые зоны *mr-1* – *mr-3*), раннего оптимума (пыльцевые зоны *mr-4* – *mr-6*), промежуточного похолодания (пыльцевые зоны *mr-7*, *mr-8*), среднего оптимума (пыльцевая зона *mr-9*), позднемежледниковья (пыльцевые зоны *mr-10*, *mr-11*)). Экзотические и редковстречаемые растения представляли *Abies*, *Larix*, *Betula humilis*, *B. nana*, *Pinus* sp., *Picea* sp., *Alnaster*, *Lycopodium annotinum*, *L. pungens*, *Selaginella selaginoides*, *Ephedra*, *Eurotia ceratoides*, *Salsola soda*, *Atriplex oblongifolia*, *Hyppophae*, *Botrychium virginianum*, *Osmunda cinnamomea*, *Nuphar*, *Nymphaea*, *Trapa natans*, *Salvinia natans*, *Brasenia*, *Polygonum amphibium*.

Данные количественного $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датирования трех слоев в разрезе «Нижняя Боярщина» свидетельствуют о том, что нижний из них знаменует вторую половину фазы *mr-1*, или палинозоны М-1 (раннемежледниковье и начало МИС-5), и датируется 126–130 тыс. лет назад ($^{230}\text{Th}/\text{U}$). Садка среднего слоя (фаза *mr-4*, или палинозона М-4, первой половины оптимума, включающая фазы развития растительности *Quercus + Ulmus + Alnus + Corylus*) датирована 108–110 тыс. лет назад ($^{230}\text{Th}/\text{U}$), а верхний слой (фаза *mr-5*, или палинозона М-5, из фаз развития растительности *Alnus + Corylus* и фаза *mr-6*, или палинозона М-6, включающая фазы развития растительности *Tilia + Carpinus*) накопился во вторую половину основного оптимума и имеет возраст 97–102 тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$) [105; 106; 114–116; 119]. Как указано выше, этот же возраст ($102,6 \pm 11,9$ тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$, № LU-5210U) и 91 ± 6 тыс. лет ($^{230}\text{Th}/\text{U}$, № LU-5210U)) имеют отложения фазы развития растительности *Carpinus + Picea* в разрезе «Мурава» [100; 111].

Данные абсолютного датирования осадков раннемежледниковья и первой половины климатического оптимума муравинского (микулинского, эемского) межледниковья (палинозоны М-1 – М-4) могут быть соотнесены с временным интервалом подстадии МИС-5е. Продолжительность фаз М-1 – М-6 этой эпохи составляет ≈ 25 –30 тыс. лет, что соответствует подстадиям МИС-5е, МИС-5d и частично подстадии МИС-5с и подтверждает значительно больший ее временной интервал, чем длительность, принимавшаяся зарубежными учеными и охватывающая лишь объем подстадии МИС-5е.

В разрезе «Микулино» (Смоленская область, Россия) отложения палинозон М-6 и М-7 датируются 104–116 тыс. лет назад [106], в разрезе «Черемошник» (Московская область, Россия) отложения палинозоны М-1 – 121–125 тыс. лет назад [106], в разрезе «Фили» (Москва, Россия) отложения палинозон М-1 – М-4 – 104–117 тыс. лет назад [106], в разрезе «Мурава» (Беларусь) отложения пыльцевой зоны *mr-6*, или палинозоны М-6, – 96–107 тыс. лет назад ($^{230}\text{Th}/\text{U}$, № LU-5210U) [106] (см. вклейку, рис. 2), в разрезе «Килешино» (Тверская область, Россия) отложения палинозоны М-4 – 113–118 тыс. лет назад [106] (по сравнению с более ранними результатами ОСЛ-датирования и ^{14}C -датирования не более 72 тыс. лет назад [118; 121; 122]), а в разрезе «Александровский карьер» (Курская область, Россия) ископаемая почва, залегающая, по данным ОСЛ-датирования, на отложениях возраста 127 ± 8 тыс. лет (нижний предел муравинского (микулинского, эемского) межледниковья) и перекрытая толщей возраста 115 ± 7 тыс. лет (верхний предел того же межледниковья), отнесена только к подстадии МИС-5е (в объеме однооптимального межледниковья) [123]. Полученные сведения об обновленных по разрезу серийных датировках обобщены в таблице.

Заключение

Обобщенный материал по абсолютному датированию различными методами стратиграфических подразделений и соответствующих им пыльцевых зон и фаз развития растительности муравинского (микулинского, эемского) межледниковья в пределах Восточно-Европейской равнины позволил сделать следующие выводы:

- начальные границы муравинского (микулинского, эемского) межледниковья и подстадии МИС-5е являются близкими по возрасту и отвечают в большинстве случаев датировке 130 тыс. лет назад;
- подстадия МИС-5е коррелирует только с пыльцевыми зонами М-1 – М-4 в интервале от 113–114 до 130 тыс. лет назад (длительность \approx 15 тыс. лет укладывается в рамки однооптимального макросукцессионного ряда), соответствующими первой половине муравинского (микулинского, эемского) межледниковья (раннемежледниковью, раннему оптимуму с термодерогической стадией развития растительности – фазами *Quercus*, *Ulmus*, *Alnus*, *Corylus* [105; 125; 126]), что свидетельствует о большей, чем подстадия МИС-5е, продолжительности этой межледниковой эпохи;
- границы палинозон М-1 – М-7 (раннемежледниковье, основной ранний оптимум с термодерогической (фазы развития растительности *Quercus*, *Ulmus*, *Alnus*, *Corylus* (палинозоны М-1 – М-4)) и термогидротической (фазы развития растительности *Tilia*, *Carpinus* (палинозоны М-5, М-6)) фазами развития растительности, последующая фаза развития растительности *Picea* (палинозона М-7)) находятся в пределах от 96 до 125 тыс. лет назад, что также несколько больше объема границ 115–128 тыс. лет назад, принятых ранее Международной комиссией по стратиграфии для подстадии МИС-5е [90], и в действительности соответствует общему интервалу подстадий МИС-5е, МИС-5d и частично подстадии МИС-5с;
- длительность однооптимального межледниковья в рамках палинозон М-1 – М-7 достигает 25–30 тыс. лет, что близко к предполагаемому расчету протяженности одного макросукцессионного ряда палеофитоценозов;
- достаточно определенно выражена верхняя граница муравинского (микулинского, эемского) межледниковья, которая находится в пределах около 70 тыс. лет назад;
- нижняя граница этой межледниковой эпохи в большинстве случаев отвечает интервалу 110–130 тыс. лет назад при варибельности до 145 тыс. лет назад, что требует новых уточнений при ведении дальнейших исследований;
- временной интервал абсолютного возраста органоогенных отложений муравинского (микулинского, эемского) межледниковья разрезов «Мурава» и «Нижняя Боярщина» северо-запада Восточно-Европейской равнины определен по данным $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -, TSD-, L/L-, ОСЛ- и ТЛМ-датирования от 70 до 130 тыс. лет назад с его общей продолжительностью 60–70 тыс. лет и тремя климатическими оптимумами в соответствии с длительностью трех макросукцессионных рядов палеофитоценозов;
- надежность корреляции фаз развития растительности и генетических типов отложений из близко расположенных геологических стратотипических разрезов муравинского (микулинского, эемского) межледниковья в объеме всей МИС-5, таких как разрез «Нижняя Боярщина» в России и разрез «Мурава» в Беларуси, очевидна при комплексном палинологическом, палеокарпологическом, серийном абсолютном датировании древних отложений путем сопряженного анализа на уровне конкретных фаз растительности.

Актуальная задача дальнейших новых комплексных исследований органоогенных образований муравинской (микулинской, эемской) межледниковой эпохи заключается в получении значительно большего массива данных и установлении специалистами возраста верхней ее части – второго и третьего климатических оптимумов с разделяющими их промежуточными похолоданиями и позднемежледниковья (фазы mg-9 – mg-13). Сделанные выводы не только вносят существенный вклад в решение вопроса о временных рамках и структуре последнего межледниковья, но и подтверждают перспективность нового отечественного подхода к установлению хронологии осадконакопления в муравинскую (микулинскую, эемскую) межледниковую эпоху на территории Восточно-Европейской равнины.

Библиографические ссылки

1. Penck A, Bruckner E. *Die Alpen im Eiszeitalter*. Leipzig: C. H. Tauchnitz; 1909. 1199 p.
2. Antevs E. *The last glaciation, with special reference to the ice retreat in Northeastern North America*. New York: American Geographical Society; 1928. 292 p. (American geographical society research series).
3. Koppen W, Wegener A. *Die Klimate der geologischen Vorzeit*. Berlin: Borntraeger; 1924. 226 p.
4. Миланкович М. *Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата*. Хргиан АХ, переводчик; Бастамов СЛ, редактор. Москва: Государственное объединенное научно-техническое издательство; 1939. 207 с.
5. Москвитин АИ. *Стратиграфия плейстоцена Центральной и Западной Европы*. Москва: Наука; 1970. 287 с.
6. Emiliani C. Pleistocene temperatures. *The Journal of Geology*. 1955;63(6):538–578. DOI: 10.1086/626295.

7. Emiliani C. Paleotemperature analysis of the Caribbean cores P6304-8 and P6304-9 and a generalized temperature curve for the past 425 000 years. *The Journal of Geology*. 1966;74(2):109–126. DOI: 10.1086/627150.
8. Краснов ИИ. Опыт прогноза геологического и физико-географического развития Земли по ритмостратиграфическим схемам и астрономическим расчетам. *Известия Академии наук СССР. Серия географическая*. 1973;2:9–20.
9. Краснов ИИ. Кривая солнечной радиации и изменения природных условий ландшафтной оболочки в антропогене. В: Краменко НН, Чепалыга АЛ, редакторы. *Космос и эволюция организмов. Материалы совещания «Космические факторы и эволюция органического мира»*. Москва: Палеонтологический институт РАН; 1974. с. 83–97.
10. Краснов ИИ, Никифорова КВ. Схема стратиграфии четвертичной (антропогеновой) системы, уточненная по материалам последних лет. В: Никифорова КВ, редактор. *Стратиграфия, палеогеография, литогенез антропогена Евразии*. Москва: [б. и.]; 1973. с. 157–188.
11. Вангенгейм ЭА, Ганешин СА, Заррина ЕП, Краснов ИИ, Никифорова КВ, Шанцер ЕВ, редакторы. *Стратиграфия СССР. Том 14, Четвертичная система. Полутом 2*. Москва: Недра; 1984. 556 с.
12. Шнитников АВ. Многовековой ритм развития ландшафтной оболочки. В: Зубаков ВА, редактор. *Хронология плейстоцена и климатическая стратиграфия*. Москва: [б. и.]; 1973. с. 7–38.
13. Шараф ШГ, Будникова НА. Вековые изменения элементов орбиты Земли и астрономическая теория колебания климата. *Труды Института теоретической астрономии АН СССР*. 1969;14:48–115.
14. Монин АС. *История Земли*. Ленинград: Наука; 1977. 228 с.
15. Shackleton NJ, Opdyke ND. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperature and ice volume on a 10^5 year and 10^6 year scale. *Quaternary Research*. 1973;3(1):39–55. DOI: 10.1016/0033-5894(73)90052-5.
16. Shackleton NJ, Opdyke ND. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of Pacific core V28-238, late Pliocene to latest Pleistocene. In: Cline RM, Hays JD, editors. *Investigations of late Quaternary paleogeography and paleoclimatology*. Boulder: Geological Society of America; 1976. p. 449–464. (Memoir – Geological Society of America; issue 145).
17. Shackleton NJ, Opdyke ND. Oxygen isotope and paleomagnetic evidence for early Northern Hemisphere glaciation. *Nature*. 1977;270:216–219. DOI: 10.1038/270216a0.
18. van Donk J. ^{18}O record of the Atlantic Ocean for the entire Pleistocene epoch. In: Cline RM, Hays JD, editors. *Investigations of late Quaternary paleogeography and paleoclimatology*. Boulder: Geological Society of America; 1976. p. 147–164. (Memoir – Geological Society of America; issue 145).
19. Pisias NG, Moore TC Jr. The evolution of the Pleistocene climate: a time series approach. *Earth and Planetary Science Letters*. 1981;52(2):450–458. DOI: 10.1016/0012-821X(81)90197-7.
20. Pisias NG, Martinson DG, Moore TC Jr, Shackleton NJ, Prell W, Hays JD, et al. High resolution stratigraphic correlation of benthic oxygen isotopic records spanning the last 300 000 years. *Marine Geology*. 1984;56(1–2):119–136. DOI: 10.1016/0025-3227(84)90009-4.
21. Martinson DG, Pisias NG, Hays JD, Imbrie J, Moore TC Jr, Shackleton NJ. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300 000 year chronostratigraphy. *Quaternary Research*. 1987;27(1):1–29. DOI: 10.1016/0033-5894(87)90046-9.
22. Prell WL. Oxygen and carbon isotope stratigraphy for the Quaternary of hole 502B: evidence for two modes of isotopic variability. In: Prell WL, Gardner JV, editors. *Deep Sea Drilling Project initial reports. Volume 68*. Washington: U. S. Government Printing Office; 1982. p. 455–464. DOI: 10.2973/dsdp.proc.68.120.1982.
23. Никифорова КВ, Кинд НВ, Краснов ИИ. Хроностратиграфическая шкала четвертичной системы (антропогена). В: Богданов НА, редактор. *Доклады 27-го Международного геологического конгресса СССР; 4–14 августа 1984 г.; Москва, РСФСР. Секция 3. Том 3, Четвертичная геология и геоморфология*. Москва: Наука; 1984. с. 22–32.
24. Shackleton NJ. New data on the evolution of Pliocene climatic stability. In: Vrba ES, Denton GH, Partridge TC, Burckle LH, editors. *Paleoclimate and evolution with emphasis on human origins*. New Haven: Yale University Press; 1995. p. 242–248.
25. Shackleton NJ. The 100 000 year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science*. 2000;289(5486):1897–1902. DOI: 10.1126/science.289.5486.1897.
26. Писаревский СА. *Исследование тонкой структуры палеомагнитного поля с целью разработки детальной магнито-стратиграфической шкалы* [диссертация]. Ленинград: Ленинградский государственный университет имени А. А. Жданова; 1982. 199 с.
27. Храмов АН, Гончаров ГИ, Комиссарова РА, Писаревский СА, Погарская ИА, Ржевский ЮС и др. *Палеомагнитология*. Храмов АН, редактор. Ленинград: Недра; 1982. 312 с.
28. Kukla GJ, Heller F, Liu Xiu Ming, Xu Tong Chun, Liu Tung Sheng, An Zhi Sheng. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*. 1988;16(9):811–814. DOI: 10.1130/0091-7613(1988)016<0811:PCICDB>2.3.CO;2.
29. Kukla GJ, An Zhi Sheng, Melice JL, Gavin J, Jule Xiao. Magnetic susceptibility record of Chinese Loess. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*. 1990;81(4):263–268. DOI: 10.1017/S0263593300020794.
30. An Zhi Sheng, Kukla GJ, Porter SC, Jule Xiao. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130 000 years. *Quaternary Research*. 1991;36(1):29–36. DOI: 10.1016/0033-5894(91)90015-W.
31. Зубаков ВА, Кочегура ВВ. Магнитохронологическая шкала новейшего этапа (5 млн лет). *Геомагнитные исследования*. 1976;4:37–43.
32. Petit JR, Jouzel J, Raynaud D, Barkov NI, Barnola JM, Basile I, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999;399:429–436. DOI: 10.1038/20859.
33. Moore TC Jr, Pisias NG, Dunn OA. Carbonate time series of the Quaternary and Late Miocene sediments in the Pacific Ocean: a spectral comparison. *Marine Geology*. 1982;46(3–4):217–233.
34. Bassinot FC, Labeyrie LD, Vincent E, Quidelleur X, Shackleton NJ, Lancelot V. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes – Matuyama magnetic reversal. *Earth and Planetary Science Letters*. 1994;126(1–3):91–108. DOI: 10.1016/0012-821X(94)90244-5.
35. Ощепкова АВ. *Физико-химическое моделирование минерального состава озерных осадков Байкальской рифтовой зоны* [диссертация]. Иркутск: Институт геохимии имени А. П. Виноградова Сибирского отделения РАН; 2018. 131 с.
36. Карабанов ЕБ, Кузьмин МИ, Вильямс ДФ, Хурсевич ГК, Безрукова ЕВ, Прокопенко АА и др. Глобальные похолодания Центральной Азии в позднем кайнозое согласно осадочной записи из озера Байкал. *Доклады Академии наук*. 2000;370(1):61–66. EDN: UCEJYE.

37. Карабанов ЕБ, Прокопенко АА, Кузьмин МИ, Вильямс ДФ, Гвоздков АН, Кербер ЕВ. Оледенения и межледниковья Сибири – палеоклиматическая запись озера Байкал и ее корреляция с западносибирской стратиграфией (эпоха прямой полярности Брюнес). *Геология и геофизика*. 2001;42(1–2):48–63. EDN: MQERLJ.
38. Безрукова ЕВ, Кулагина НВ, Летунова ПП, Шестакова ОН. Направленность изменений растительности и климата Байкальского региона за последние 5 миллионов лет (по данным палинологического исследования осадков озера Байкал). *Геология и геофизика*. 1999;40(5):739–749. EDN: MQERHN.
39. Безрукова ЕВ, Летунова ПП. Высокорастворимая запись палеоклиматов Восточной Сибири для раннего и среднего плейстоцена по материалам палинологического исследования байкальских осадков (глубоководная скважина BDP-96-1). *Геология и геофизика*. 2001;42(1–2):98–107. EDN: LJJKLC.
40. Безрукова ЕВ, Летунова ПП, Абзаева АА, Кулагина ЕВ, Белов АВ. Ответ растительности бассейна озера Байкал на изменения климата в позднем кайнозое. В: Афонин СА, Токарев ПИ, редакторы. *Палинология: теория и практика. Материалы XI Всероссийской палинологической конференции; 27 сентября – 1 октября 2005 г.; Москва, Россия*. Москва: Палеонтологический институт РАН; 2005. с. 27–28.
41. Безрукова ЕВ, Кузьмин МИ, Белов АВ. Природная среда квартера: отражение глобальных и региональных событий в палеоклиматических архивах Центральной Азии. В: Институт географии имени В. Б. Сочавы СО РАН. *Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований. Материалы IX Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода; 15–20 сентября 2015 г.; Иркутск, Россия*. Иркутск: Институт географии имени В. Б. Сочавы СО РАН; 2015. с. 47–49.
42. Rossignol-Streek M. Mediterranean Quaternary sapropels, an immediate response of the African monsoon to variation of insolation. *Paleogeographer, Paleoecologist, Paleoecologist*. 1985;49(3):237–263. DOI: 10.1016/0031-0182(85)90056-2.
43. Parisi E, Cita MB. Late Quaternary paleoceanographic changes recorded by deep-sea benthos in the western Mediterranean Ridge. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. 1982;5:102–114.
44. Салтыков ВФ. Стратиграфическая схема плейстоцена североприкаспийской провинции. *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*. 2011;71:95–111.
45. Свиточ АА, Селиванов АО, Янина ТА. *Палеогеографические события плейстоцена Понто-Каспия и Средиземноморья (материалы по реконструкции и корреляции)*. Москва: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова; 1998. 288 с.
46. Величко АА, Маркова АК, Морозова ТД, Ударцев ВП. Проблемы геохронологии и корреляции лессов и ископаемых почв Восточной Европы. *Известия Академии наук СССР. Серия географическая*. 1984;6:5–19.
47. Величко АА, Климанов ВА, Беляев АВ. Каспий и Волга 5,5 и 125 тысяч лет назад. *Природа*. 1987;3:60–66.
48. Velichko AA. Loess-paleosol formation on the Russian Plain. *Quaternary International*. 1990;7–8:103–114. DOI: 10.1016/1040-6182(90)90044-5.
49. Болиховская НС. Палинология лессов и погребенных почв Русской равнины. В: Агаджанян АК, Добродеев ОП, редакторы. *Проблемы общей физической географии и палеогеографии*. Москва: Издательство Московского университета; 1976. с. 257–277.
50. Болиховская НС. *Эволюция лессово-почвенной формации Северной Евразии*. Москва: Издательство Московского университета; 1995. 270 с.
51. Molodkov AN, Bolikhovskaya NS. Long-term palaeoenvironmental changes recorded in palynologically studied loess-paleosol and ESR-dated marine deposits of Northern Eurasia: implications for sea-land correlation. *Quaternary International*. 2006;152–153:48–58. DOI: 10.1016/j.quaint.2005.12.010.
52. Molodkov AN, Bolikhovskaya NS. Climate change dynamics in Northern Eurasia over the last 200 ka: evidence from the mollusk-based ESR-chronostratigraphy and vegetation succession of the loess-paleosol records. *Quaternary International*. 2009;201:67–76. DOI: 10.1016/j.quaint.2008.05.028.
53. Шелкопляс ВН, Морозов ВГ. *Применение термолюминесцентного метода для изучения антропогенных отложений*. Киев: Институт геологических наук; 1981. 42 с.
54. Зубаков ВА. *Глобальные климатические события плейстоцена*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1986. 286 с.
55. Зубаков ВА. *Ледниково-межледниковые циклы плейстоцена Русской и Сибирской равнин в спорово-пыльцевых диаграммах*. Санкт-Петербург: Государственный гидрологический институт; 1992. 122 с.
56. Зубаков ВА. Современное состояние климатостратиграфии: о привязке климатом Европы к астрохронометрической шкале. *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*. 2005;66:42–64. EDN: WFLNKX.
57. Zubakov VA, Borzenkova II. *Global palaeoclimate of the Late Cenozoic*. New York: Elsevier; 1990. 476 p.
58. Шелкопляс ВН, Гожик ПФ, Христофорова ТФ. *Антропогенные отложения Украины*. Макаренко ДЕ, редактор. Киев: Наукова думка; 1988. 152 с.
59. Гожик ПФ. Стратиграфические схемы верхнего протерозоя и фанерозоя Украины. В: Институт геологических наук НАН Украины. *Стратиграфия осадочных образований верхнего протерозоя и фанерозоя. Материалы Международной научной конференции; 23–26 сентября 2013 г.; Киев, Украина*. Киев: LAT & K; 2013. с. 46–47.
60. Еловичева ЯК. *Опорные разрезы плейстоцена Украины и их корреляция с территорией Беларуси*. Минск: БГУ; 2003. 109 с.
61. Еловичева ЯК. *Разрезы гляциоплейстоцена и голоцена Украины в палинологической базе данных Беларуси*. Минск: БГУ; 2013. 162 с.
62. Beartschi P. Absolute ¹⁸O content of standard mean ocean water. *Earth and Planetary Science Letters*. 1976;31(3):341–344. DOI: 10.1016/0012-821X(76)90115-1.
63. Budd WF, Morgan VI. Isotopes, climate and ice sheet dynamics from core studies on Law Dome, Antarctica. In: International Association of Hydrological Sciences. *International Symposium on isotopes and impurities in snow and ice; 1975 August – September; Grenoble, France*. Dorking: Adlard & Son; 1977. p. 312–321. (IAHS-AISH publication; volume 118).
64. Котляков ВМ, Гордиенко ФГ, Барков НИ, Короткевич ЕС. Изотопные исследования керн со станции «Восток» и их палеогляциологическая интерпретация. В: Авсюк ГА, редактор. *Антарктика. Выпуск 19*. Москва: Академия наук СССР; 1980. с. 45–53.
65. Котляков ВМ, Лориус К. Четыре климатических цикла по данным ледяного керн из глубокой скважины на станции «Восток» в Антарктиде. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2000;1:7–19.
66. Большаков ВА, Федин ВА. Орбитальные факторы воздействия на криосферу Земли (на примере анализа антарктических кернов). *Криосфера Земли*. 2015;19(2):87–97. EDN: TWMXNP.

67. Dansgaard W, Johnsen SJ, Clausen HB, Gundestrup N. *Stable isotope glaciology*. København: C. A. Reitzel; 1973. 53 p. (Meddelelser om Gronland; Band 197, Nummer 2).
68. Cuffey KM, Alley RB, Grootes PM, Bolzan JM, Anandakrishnan S. Calibration of the $\delta^{18}\text{O}$ isotopic paleothermometer for central Greenland, using borehole temperatures. *Journal of Glaciology*. 1994;40(135):341–349. DOI: 10.1017/s0022143000007425.
69. Stuiver M, Grootes PM, Braziunas TF. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16 500 years and the role of the Sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Research*. 1995;44(3):341–354. DOI: 10.1006/qres.1995.1079.
70. Stuiver M, Reimer PJ, Bard E, Beck JW, Burr GS, Hughen KA, et al. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24 000–0 cal BP. *Radiocarbon*. 1998;40(3):1041–1084. DOI: 10.1017/S0033822200019123.
71. Панин АВ. *Методы палеогеографических исследований: четвертичная геохронология*. Москва: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова; 2014. 116 с. EDN: OZEJDX.
72. Болиховская НС, Молодьков АН. Корреляция лессово-почвенной формации и морских отложений Северной Евразии (по результатам палинологического и ЭПР анализов). В: Каплин ПА, Судакова НГ, редакторы. *Проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена*. Москва: Издательство Московского университета; 2000. с. 149–178.
73. Болиховская НС, Молодьков АН. Схема периодизации, корреляция и возраст климатических событий плейстоцена. В: Конторович АЭ, редактор. *Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований. Материалы VI Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода; 19–23 октября 2009 г.; Новосибирск, Россия*. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН; 2009. с. 75–78.
74. Молодьков АН, Болиховская НС. Климато-хронологическая схема неоплейстоцена Северной Евразии (по данным палинологического, ЭПР и ИК-ОСЛ анализов отложений). В: Болиховская НС, редактор. *Проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена. Материалы Всероссийской научной конференции «Марковские чтения 2010 года»; 13 мая 2010 г.; Москва, Россия. Выпуск 3*. Москва: Географический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова; 2011. с. 44–76.
75. Молодьков АН. Опыт использования метода ЭПР-датирования раковин моллюсков четвертичных отложений. В: Алексеев МН, Никифорова КВ, редакторы. *Четвертичный период. Стратиграфия*. Москва: Наука; 1989. с. 204–213.
76. Molodkov AN. ESR dating evidence on early man's dwelling at a Lower Palaeolithic cave site in the Northern Caucasus. *Geologija*. 1996;19:67–75.
77. Molodkov AN, Bolikhovskaya NS. Climato-chronostratigraphic framework of Pleistocene terrestrial and marine deposits of Northern Eurasia, based on pollen, electron spin resonance, and infrared optically stimulated luminescence analyses. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2010;59:49–62. DOI: 10.3176/earth.2010.1.04.
78. Большаков ВА. Об интерпретации палеомагнитных данных по моренам. *Физика Земли*. 2011;9:48–56. EDN: NYHQAT.
79. Большаков ВА. Некоторые хроностратиграфические результаты сопоставления орбитально-климатической диаграммы с глобально осредненной изотопно-кислородной записью LR04 для интервала времени 0–1,5 млн лет назад. В: Журавков МА, редактор. *Проблемы региональной геологии и поисков полезных ископаемых. Материалы VII Университетских геологических чтений; 4–6 апреля 2013 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2013. с. 71–72.
80. Большаков ВА. О количестве ледниковых циклов, выделяемых в лессовой формации в пределах хрона Брюнес. В: Институт географии имени В. Б. Сочавы СО РАН. *Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований. Материалы IX Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода; 15–20 сентября 2015 г.; Иркутск, Россия*. Иркутск: Институт географии имени В. Б. Сочавы СО РАН; 2015. с. 64–66.
81. Большаков ВА, Каревская ИА. О наличии 400-тысячелетнего эксцентриситетного цикла в изменениях природной среды плейстоцена. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2013;2:83–90. EDN: PZFPNV.
82. Lisiecki LE. Links between eccentricity forcing and the 100 000 year glacial cycle. *Nature Geoscience*. 2010;3:349–352. DOI: 10.1038/geo828.
83. Lisiecki LE, Raymo ME. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*. 2005; 20(1):PA1003. DOI: 10.1029/2004PA001071.
84. Anderson ARA, Young IM, Sleeman BD, Griffiths BS, Robertson WM. Nematode movement along a chemical gradient in a structurally heterogeneous environment. 1. Experiment. *Fundamental and Applied Nematology*. 1997;20(2):157–163.
85. Anderson ARA, Sleeman BD, Young IM, Griffiths BS. Nematode movement along a chemical gradient in a structurally heterogeneous environment. 2. Theory. *Fundamental and Applied Nematology*. 1997;20(2):165–172.
86. Наурызбаев ММ, Ваганов ЕА, Сидорова ОВ. Изменчивость приземной температуры воздуха на севере Евразии по данным тысячелетних древесно-кольцевых хронологий. *Криосфера Земли*. 2003;7(2):84–91. EDN: MPQSOJ.
87. Махнач НА. *Этапы развития растительности Белоруссии в антропогене*. Левков ЭА, редактор. Минск: Наука и техника; 1971. 212 с.
88. Чеботарева НС. Новый разрез с днепровско-валдайскими межледниковыми отложениями на р. Каспля у с. Верхняя Боярщина. В: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. *Материалы по палеогеографии. Выпуск 1*. Москва: Издательство Московского университета; 1954. с. 69–81.
89. Shackleton NJ. The last interglacial in the marine and terrestrial records. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*. 1969;174(1034):135–154. DOI: 10.1098/rspb.1969.0085.
90. Litt T, Gibbard P. Definition of a global stratotype section and point (GSSR) for the base of the Upper (Late) Pleistocene subseries (Quaternary system/period). *Episodes*. 2008;31(2):260–263. DOI: 10.18814/epiugs/2008/v31i2/015.
91. Величко АА, редактор. *Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен – голоцен*. Москва: ГЕОС; 2009. 120 с.
92. de Beaulieu JL, Yelovicheva YaK, Gruger E, Kalnina L, Liivrand E, Chomutova V, et al. Macrosuccessional plantseries of the Eemian in Europe. In: Gibbard PL, van Kolfschoten T, editors. *The Eemian: local sequences, global perspectives. Abstracts of International INQUA – SEQS symposium; 1998 September 6–11; Kerkrade, The Netherlands*. Kerkrade: INQUA – SEQS; 1998. p. 93.
93. Еловичева ЯК, де Белио ЖЛ, Грюгер Э, Калнина Л, Лийвранд Э, Хомутова В и др. Макросукцессии палеофитоценозов эемского межледниковья в Европе (по палинологическим данным). В: Болиховская НС, Ровнина ЛВ, редакторы. *Актуальные проблемы палинологии на рубеже третьего тысячелетия*. Москва: Институт геологии и разработки горючих ископаемых; 1999. с. 98–100.

94. Яловічэва ЯК. Асаблівасці паліналагічнай характарыстыкі муравінскіх (эемскіх) міжледавіковых адкладаў Падняпроўя. У: Каліцкі Т, рэдактар. *Палеагеаграфія верхняга плейстацэну і галацэну Усходняй Польшчы і Беларусі. Тэзісы Польска-беларускага семінара; 5–7 кастрычніка 1998 г.; Кракаў, Польшча*. Кракаў: [б. в.]; 1998. с. 57–58.
95. Yelovicheva YaK. Rozbiezności palynologicznej charakterystyki murawinskiх (eemskich) interglacialnych osadów Podnieprowia. W: Kalicki T, redaktor. *Paleogeografia gornego Plejstocenu i Holocenu Wschodniej Polski i Białorusi. Streszczenia referatów, posterów i przewodnik wycieczki; 5–7 października 1998 r.; Krakow, Polska*. Krakow: [s. n.]; 1998. s. 14.
96. Yelovicheva YaK. Rozbiezności palynologicznej charakterystyki murawinskiх (eemskich) interglacialnych osadów Podnieprowia. W: Polska Akademia Umiejetności. *Sprawozdania z czynności i posiedzeń Polskiej akademii umiejetności. Tom 62*. Krakow: Polska Akademia Umiejetności; 1998. s. 162–163.
97. Еловичева ЯК, де Белио ЖЛ, Грюгер Э, Калнина Л, Лийвранд Э, Хомутова В и др. *Макросукцессии палеофитоценозов эемского межледникового в Европе на основе палинологического анализа*. Минск: БГУ; 2006. 75 с.
98. Bowen DQ. *Quaternary geology: a stratigraphic framework for multidisciplinary work*. Oxford: Pergamon Press; 1978. 221 p.
99. Еловичева ЯК. *Эволюция природной среды антропогена Беларуси (по палинологическим данным)*. Минск: Белээн; 2001. 292 с.
100. Еловичева ЯК. *Палинология Беларуси (к 100-летию Белорусского государственного университета)*. Минск: БГУ; 2018. 831 с.
101. Балобаев ВТ, Шепелев ВВ. Терморезонансный эффект в колебаниях глобального климата. *Наука и техника в Якутии*. 2003;2:7–10. EDN: VRVQON.
102. Imbrie J, Berger A, Boyle EA, Clemens SC, Duffy A, Howard WR, et al. On the structure and origin of major glaciation cycles. 2. The 100 000 year cycle. *Paleoceanography*. 1993;8(6):699–735. DOI: 10.1029/93PA02751.
103. Болиховская НС, Молодьков АН. К корреляции континентальных и морских четвертичных отложений Северной Евразии по палинологическим данным и результатам ЭПР-датирования. В: Болиховская НС, Ровнина ЛВ, редакторы. *Актуальные проблемы палинологии на рубеже третьего тысячелетия*. Москва: Институт геологии и разработки горючих ископаемых; 1999. с. 25–53.
104. Болиховская НС, Молодьков АН. Вторая половина МИС-5 (100–70 тысяч лет назад): ледниковье или межледниковье. В: Болиховская НС, Клювиткина ТС, Янина ТА, редакторы. *Актуальные проблемы палеогеографии плейстоцена и голоцена. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Марковские чтения 2020 года», посвященной 115-летию со дня рождения академика К. К. Маркова; 5–9 ноября 2020 г.; Москва, Россия*. Москва: Географический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова; 2020. с. 63–70.
105. Максимов ФЕ, Кузнецов ВЮ, Савельева ЛА, Григорьев ВА, Петров АЮ, Фоменко АП и др. К вопросу о временных границах микулинского межледниковья и его отдельных фаз. В: Панин АВ, Борисова ОК, Константинов ЕИ, Тимирева СН, Кононов ЮМ, редакторы. *Пути эволюционной географии. Материалы II Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А. А. Величко; 22–25 ноября 2021 г.; Москва, Россия. Том 2, выпуск 2*. Москва: Институт географии РАН; 2021. с. 812–816.
106. Савельева ЛА, Фоменко АП, Максимов ФЕ, Петров АЮ, Григорьев ВА, Попова СС и др. Новые данные о геохронологии микулинского межледниковья на основе изучения разрезов северо-запада Русской равнины. *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2021;8:355–358. DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-355-358.
107. Санько АФ, Литвинюк ГИ, Савченко ИЕ. Неоплейстоценовые отложения Суражско-Велижской низины и ее геохронология. In: National Academy of Sciences of Belarus. *Quaternary deposits and neotectonics in the area of Pleistocene glaciations. Proceedings of the symposium; 1997 May 12–13; Minsk, Belarus*. Minsk: [s. n.]; 1997. p. 62–63.
108. Цапенко ММ, Махнач НА. *Антропогеновые отложения Белоруссии*. Минск: Издательство Академии наук БССР; 1959. 223 с.
109. Еловичева ЯК, Писарчук НМ. Макросукцессии растительности муравинского (микулинского) межледниковья в пределах запада Восточно-Европейской равнины. В: Еловичева ЯК, редактор. *Региональная физическая география в новом столетии. Выпуск 10*. Минск: Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка; 2017. с. 15–51.
110. Санько АФ, Фрехен М, Арсланов ХА, Величквич ФЮ, Еловичева ЯК, Кузнецов ВЮ и др. Абсолютное датирование отложений верхнего плейстоцена Беларуси. В: Матвеев АВ, Санько АФ, редакторы. *Плейстоцен Беларуси и сопредельных территорий. Материалы Международной научной конференции, посвященной 75-летию со дня рождения Л. Н. Вознячука; 29 октября 2004 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка; 2004. с. 59.
111. San'ko AF, Arslanov KhA, Yelovicheva YaK, Velichkevich FYu, Kuznetsov VYu, Maksimov FE, et al. The first U/Th dating of the Muravian interglacial deposits in Belarus. In: Sikorski J, editor. *Abstracts of the 8th International conference «Methods of absolute chronology»; 2004 May 17–19; Ustron, Poland*. Gliwice: [s. n.]; 2004. p. 132–133.
112. Maksimov FE, Arslanov KhA, Kuznetsov VYu, Chernov SB. ²³⁰Th/U and ¹⁴C dating of Upper and Middle Pleistocene interglacial and interstadial organic deposits from the East European Plain and Siberia. In: INTAS. *INTAS Final Workshop. Pleistocene Environments in Eurasia – Chronology, Paleoclimate and Teleconnection; 2006 November 2–3; Hannover, Germany*. Hannover: Geozentrum; 2006. p. 45–49.
113. Еловичева ЯК, Санько АФ. Новые данные по стратотипу муравинского межледниковья Беларуси. В: Аношко ЯИ, редактор. *Проблемы водных ресурсов, геотермии и геоэкологии. Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Г. В. Богомолова; 1–3 июня 2005 г.; Минск, Беларусь. Том 2*. Минск: Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси; 2005. с. 240–242.
114. Максимов ФЕ, Кузнецов ВЮ. Новая версия ²³⁰Th/U-датирования верхне- и среднеплейстоценовых погребенных органогенных отложений. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7, Геология. География*. 2010;4:94–107. EDN: NCFGWB.
115. Кузнецов ВЮ, Максимов ФЕ. *Методы четвертичной геохронометрии в палеогеографии и морской геологии*. Санкт-Петербург: Наука; 2012. 191 с.
116. Rusakov AV, Nikonov AA, Savelieva LA, Simakova AN, Sedov SN, Maksimov FE, et al. Landscape evolution in the periglacial zone of Eastern Europe since MIS-5: proxies from paleosols and sediments of the Cheremoshnik key site (Upper Volga, Russia). *Quaternary International*. 2015;365(3):26–41. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.09.029.

117. Гричук ВП. *История флоры и растительности Русской равнины в плейстоцене*. Заклинская ЕД, редактор. Москва: Наука; 1989. 183 с.
118. Максимов ФЕ, Савельева ЛА, Левченко СБ, Григорьев ВА, Петров АЮ, Фоменко АП и др. К вопросу о хронологии микулинского межледникового на северо-западе Русской равнины. *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2020;7:322–326. DOI: 10.24411/2687-1092-2020-10752.
119. Максимов ФЕ, Савельева ЛА, Попова СС, Зюганова ИС, Григорьев ВА, Левченко СБ и др. Хроностратиграфическое положение микулинских отложений (на примере опорного разреза у д. Нижняя Боярщина, Смоленская область). *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2022;86(3):447–469. DOI: 10.31857/S2587556622030116.
120. Писарчук НМ, Еловичева ЯК. Новые данные о разрезе микулинского межледникового «Нижняя Боярщина». В: Халиков АР, редактор. *Fundamental science and technology. Материалы X Международной научно-практической конференции; 20 декабря 2022 г.; Уфа, Россия*. Уфа: Вестник науки; 2022. с. 153–160. EDN: CIBECN.
121. Гитерман РЕ, Куприна НП, Шанцер ЕВ. О микулинском возрасте межледниковых слоев у д. Килешино (Верхняя Волга). *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*. 1975;44:84–88.
122. Lasberg K, Kalm V, Kihno K. Ice-free interval corresponding to marine isotope stages 4 and 3 at the last glacial maximum position at Kileshino, Valdaj Upland, Russia. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2014;63(2):88–96. DOI: 10.3176/earth.2014.08.
123. Сычева СА. Эволюция представлений о возрасте, продолжительности и стадийности развития почвы микулинского межледникового. *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*. 2018;76:99–109.
124. Гричук ВП. Ископаемые флоры как палеонтологическая основа стратиграфии четвертичных отложений. В: Марков КК, редактор. *Рельеф и стратиграфия четвертичных отложений северо-запада Русской равнины*. Москва: Издательство Академии наук СССР; 1961. с. 25–71.
125. Фоменко АП, Савельева ЛА, Максимов ФЕ, Петров АЮ, Григорьев ВА, Попова СС и др. Термический максимум микулинского межледникового по результатам палинологического изучения отложений разреза на р. Большая Дубенка (Тверская область). В: Панин АВ, Борисова ОК, Константинов ЕИ, Тимирева СН, Кононов ЮМ, редакторы. *Пути эволюционной географии. Материалы II Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А. А. Величко; 22–25 ноября 2021 г.; Москва, Россия. Том 2, выпуск 2*. Москва: Институт географии РАН; 2021. с. 852–855.
126. Фоменко АП, Савельева ЛА, Максимов ФЕ, Петров АЮ, Григорьев ВА, Попова СС и др. Особенности растительного покрова и уранториевый возраст микулинского межледникового на Русской равнине. *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2022;9:355–357. DOI: 10.24412/2687-1092-2022-9-355-357.

References

1. Penck A, Bruckner E. *Die Alpen im Eiszeitalter*. Leipzig: C. H. Tauchnitz; 1909. 1199 p.
2. Antevs E. *The last glaciation, with special reference to the ice retreat in Northeastern North America*. New York: American Geographical Society; 1928. 292 p. (American geographical society research series).
3. Koppen W, Wegener A. *Die Klimate der geologischen Vorzeit*. Berlin: Borntraeger; 1924. 226 p.
4. Milankovich M. *Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebanii klimata* [Mathematical climatology and astronomical theory of climate fluctuations]. Khrgian AKh, translator; Bastamov SL, editor. Moscow: Gosudarstvennoe ob'edinennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo; 1939. 207 p. Russian.
5. Moskvitin AI. *Stratigrafiya pleistotsena Tsentral'noi i Zapadnoi Evropy* [Pleistocene stratigraphy of Central and Western Europe]. Moscow: Nauka; 1970. 287 p. Russian.
6. Emiliani C. Pleistocene temperatures. *The Journal of Geology*. 1955;63(6):538–578. DOI: 10.1086/626295.
7. Emiliani C. Paleotemperature analysis of the Caribbean cores P6304-8 and P6304-9 and a generalized temperature curve for the past 425 000 years. *The Journal of Geology*. 1966;74(2):109–126. DOI: 10.1086/627150.
8. Krasnov II. [Experience in forecasting the geological and physical-geographical development of the Earth using rhythmostratigraphic schemes and astronomical calculations]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geograficheskaya*. 1973;2:9–20. Russian.
9. Krasnov II. [Curve of solar radiation and changes in natural conditions of the landscape envelope in the anthropogene]. In: Kramenko NN, Chepalyga AL, editors. *Kosmos i evolyutsiya organizmov. Materialy soveshchaniya «Kosmicheskie faktory i evolyutsiya organicheskogo mira»* [Space and the evolution of organisms. Proceedings of the meeting «Cosmic factors and the evolution of the organic world»]. Moscow: Paleontological Institute of Russian Academy of Sciences; 1974. p. 83–97. Russian.
10. Krasnov II, Nikiforova KV. [Scheme of the stratigraphy of the Quaternary (anthropogenic) system, updated based on materials from recent years]. In: Nikiforova KV, editor. *Stratigrafiya, paleogeografiya, litogenez antropogena Evrazii* [Stratigraphy, paleogeography, lithogenesis of the Anthropocene of Eurasia]. Moscow: [s. n.]; 1973. p. 157–188. Russian.
11. Vangengeim EA, Ganeshin SA, Zarrina EP, Krasnov II, Nikiforova KV, Shantser EV, editors. *Stratigrafiya SSSR. Tom 14, Chetvertichnaya sistema. Polutom 2* [Stratigraphy of the USSR. Volume 14, Quaternary system. Half volume 2]. Moscow: Nedra; 1984. 556 p. Russian.
12. Shnitnikov AV. [The centuries-old rhythm of development of the landscape shell]. In: Zubakov VA, editor. *Khronologiya pleistotsena i klimaticheskaya stratigrafiya* [Pleistocene chronology and climate stratigraphy]. Moscow: [s. n.]; 1973. p. 7–38. Russian.
13. Sharaf ShG, Budnikova NA. [Secular changes in the elements of the Earth's orbit and the astronomical theory of climate fluctuations]. *Trudy Instituta teoreticheskoi astronomii AN SSSR*. 1969;14:48–115. Russian.
14. Monin AS. *Istoriya Zemli* [History of the Earth]. Leningrad: Nauka; 1977. 228 p. Russian.
15. Schakleton NJ, Opdyke ND. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperature and ice volume on a 10^5 year and 10^6 year scale. *Quaternary Research*. 1973;3(1):39–55. DOI: 10.1016/0033-5894(73)90052-5.
16. Schakleton NJ, Opdyke ND. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of Pacific core V28-238, late Pliocene to latest Pleistocene. In: Cline RM, Hays JD, editors. *Investigations of late Quaternary paleogeography and paleoclimatology*. Boulder: Geological Society of America; 1976. p. 449–464 (Memoir – Geological Society of America; issue 145).
17. Schakleton NJ, Opdyke ND. Oxygen isotope and paleomagnetic evidence for early Northern Hemisphere glaciation. *Nature*. 1977;270:216–219. DOI: 10.1038/270216a0.

18. van Donk J. ^{18}O record of the Atlantic Ocean for the entire Pleistocene epoch. In: Cline RM, Hays JD, editors. *Investigations of late Quaternary paleogeography and paleoclimatology*. Boulder: Geological Society of America; 1976. p. 147–164 (Memoir – Geological Society of America; issue 145).
19. Pisias NG, Moore TC Jr. The evolution of the Pleistocene climate: a time series approach. *Earth and Planetary Science Letters*. 1981;52(2):450–458. DOI: 10.1016/0012-821X(81)90197-7.
20. Pisias NG, Martinson DG, Moore TC Jr, Shackleton NJ, Prell W, Hays JD, et al. High resolution stratigraphic correlation of benthic oxygen isotopic records spanning the last 300 000 years. *Marine Geology*. 1984;56(1–2):119–136. DOI: 10.1016/0025-3227(84)90009-4.
21. Martinson DG, Pisias NG, Hays JD, Imbrie J, Moore TC Jr, Shackleton NJ. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300 000 year chronostratigraphy. *Quaternary Research*. 1987;27(1):1–29. DOI: 10.1016/0033-5894(87)90046-9.
22. Prell WL. Oxygen and carbon isotope stratigraphy for the Quaternary of hole 502B: evidence for two modes of isotopic variability. In: Prell WL, Gardner JV, editors. *Deep Sea Drilling Project initial reports. Volume 68*. Washington: U. S. Government Printing Office; 1982. p. 455–464. DOI: 10.2973/dsdp.proc.68.120.1982.
23. Nikiforova KV, Kind NV, Krasnov II. [Chronostratigraphic scale of the Quaternary system (Anthropocene)]. In: Bogdanov NA, editor. *Doklady 27-go Mezhdunarodnogo geologicheskogo kongressa SSSR; 4–14 avgusta 1984 g.; Moskva, RSFSR. Sektsiya 3. Tom 3, Chetvertichnaya geologiya i geomorfologiya* [Reports of the 27th International geological congress of the USSR; 1984 August 4–14; Moscow, RSFSR. Section 3. Volume 3, Quaternary geology and geomorphology]. Moscow: Nauka; 1984. p. 22–32. Russian.
24. Shackleton NJ. New data on the evolution of Pliocene climatic stability. In: Vrba ES, Denton GH, Partridge TC, Burckle LH, editors. *Paleoclimate and evolution with emphasis on human origins*. New Haven: Yale University Press; 1995. p. 242–248.
25. Shackleton NJ. The 100 000 year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science*. 2000;289(5486):1897–1902. DOI: 10.1126/science.289.5486.1897.
26. Pisarevskii SA. *Issledovanie tonkoi struktury paleomagnetnogo polya s tsel'yu razrabotki detal'noi magnitostatigraficheskoi shkaly* [Study of the fine structure of the paleomagnetic field with the aim of developing a detailed magnetostratigraphic scale] [dissertation]. Leningrad: Leningradskii gosudarstvennyi universitet imeni A. A. Zhdanova; 1982. 199 p. Russian.
27. Khramov AN, Goncharov GI, Komissarova RA, Pisarevskii SA, Pogarskaya IA, Rzhnevskii YuS, et al. *Paleomagnetologiya* [Paleomagnetology]. Khramov AN, editor. Leningrad: Nedra; 1982. 312 p. Russian.
28. Kukla GJ, Heller F, Liu Xiu Ming, Xu Tong Chun, Liu Tung Sheng, An Zhi Sheng. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*. 1988;16(9):811–814. DOI: 10.1130/0091-7613(1988)016<0811:PCICDB>2.3.CO;2.
29. Kukla GJ, An Zhi Sheng, Melice JL, Gavin J, Jule Xiao. Magnetic susceptibility record of Chinese Loess. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*. 1990;81(4):263–268. DOI: 10.1017/S0263593300020794.
30. An Zhi Sheng, Kukla GJ, Porter SC, Jule Xiao. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130 000 years. *Quaternary Research*. 1991;36(1):29–36. DOI: 10.1016/0033-5894(91)90015-W.
31. Zubakov VA, Kochegura VV. [Magnetochronological scale of the newest stage (5 mln years)]. *Geomagnitnye issledovaniya*. 1976;4:37–43. Russian.
32. Petit JR, Jouzel J, Raynaud D, Barkov NI, Barnola JM, Basile I, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999;399:429–436. DOI: 10.1038/20859.
33. Moore TC Jr, Pisias NG, Dunn OA. Carbonate time series of the Quaternary and Late Miocene sediments in the Pacific Ocean: a spectral comparison. *Marine Geology*. 1982;46(3–4):217–233.
34. Bassinot FC, Labeyrie LD, Vincent E, Quidelleur X, Shackleton NJ, Lancelot V. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes – Matuyama magnetic reversal. *Earth and Planetary Science Letters*. 1994;126(1–3):91–108. DOI: 10.1016/0012-821X(94)90244-5.
35. Oshchepkova AV. *Fiziko-khimicheskoe modelirovanie mineral'nogo sostava ozernykh osadkov Baikalskoi riftovoi zony* [Physicochemical modelling of the mineral composition of lake sediments of the Baikal rift zone] [dissertation]. Irkutsk: A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS; 2018. 131 p. Russian.
36. Karabanov EB, Kuz'min MI, Williams DF, Khursevich GK, Bezrukova EV, Prokopenko AA, et al. Global cooling of Central Asia during the Late Cenozoic as recorded in the sedimentary succession from the Lake Baikal. *Doklady Akademii nauk*. 2000; 370(1):61–66. Russian. EDN: UCEJYE.
37. Karabanov EB, Prokopenko AA, Kuz'min MI, Williams DF, Gvozdkov AN, Kerber EV. Glacial and interglacial periods of Siberia: paleoclimate record of Lake Baikal and correlation with west Siberian stratigraphic scheme (the Brunhes chron). *Geologiya i geofizika*. 2001;42(1–2):48–63. Russian. EDN: MQERLJ.
38. Bezrukova EV, Kulagina NV, Letunova PP, Shestakova ON. Climatic and vegetation changes in the Baikal Region for the last 5 MA (according to palynological data on the Baikal sediments). *Geologiya i geofizika*. 1999;40(5):739–749. Russian. EDN: MQERHN.
39. Bezrukova EV, Letunova PP. A high-resolution record of east Siberian paleoclimates in the Early and Middle Pleistocene by palynological studies of Baikal sediments from the deep borehole BDP-96-1. *Geologiya i geofizika*. 2001;42(1–2):98–107. Russian. EDN: LJJKLC.
40. Bezrukova EV, Letunova PP, Abzaeva AA, Kulagina EV, Belov AV. [Response of vegetation in the Lake Baikal basin to climate change in the Late Cenozoic]. In: Afonin SA, Tokarev PI, editors. *Palynology: theory & applications. Proceedings of the 11th All-Russian palynological conference; 2005 September 27 – October 1; Moscow, Russia*. Moscow: Paleontological Institute of Russian Academy of Sciences; 2005. p. 27–28. Russian.
41. Bezrukova EV, Kuz'min MI, Belov AV. [Natural environment of the Quaternary: reflection of global and regional events in the paleoclimatic archives of Central Asia]. In: V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS. *Fundamental problems of Quaternary, results of the study and the main trends of further research. Proceedings of the 9th All-Russian conference on Quaternary research; 2015 September 15–20; Irkutsk, Russia*. Irkutsk: V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS; 2015. p. 47–49. Russian.
42. Rossignol-Streek M. Mediterranean Quaternary sapropels, an immediate response of the African monsoon to variation of insolation. *Paleogeographer, Paleoclimatologist, Paleoecologist*. 1985;49(3):237–263. DOI: 10.1016/0031-0182(85)90056-2.
43. Parisi E, Cita MB. Late Quaternary paleoceanographic changes recorded by deep-sea benthos in the western Mediterranean Ridge. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. 1982;5:102–114.

44. Saltykov VF. Pleistocene stratigraphy for the North Caspian Area. *Bulletin of Comission for Study of the Quaternary*. 2011; 71:95–111. Russian.
45. Svitoch AA, Selivanov AO, Yanina TA. *Pleistocene palaeogeographic events in the Ponto-Caspian and Mediterranean basins*. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1998. 288 p. Russian.
46. Velichko AA, Markova AK, Morozova TD, Udartsev VP. [Problems of geochronology and correlation of loess and fossil soils of Eastern Europe]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geograficheskaya*. 1984;6:5–19. Russian.
47. Velichko AA, Klimanov VA, Belyaev AV. [Caspian Sea and Volga River 5.5 and 125 thousands years before present]. *Priroda*. 1987;3:60–66. Russian.
48. Velichko AA. Loess-paleosol formation on the Russian Plain. *Quaternary International*. 1990;7–8:103–114. DOI: 10.1016/1040-6182(90)90044-5.
49. Bolikhovskaya NS. [Palynology of loess and buried soils of the Russian Plain]. In: Agadzhanian AK, Dobrodeev OP, editors. *Problemy obshchei fizicheskoi geografii i paleogeografii* [Problems of general physical geography and paleogeography]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta; 1976. p. 257–277. Russian.
50. Bolikhovskaya NS. *Evolutsiya lessovo-pochvennoi formatsii Severnoi Evrazii* [Evolution of the loess-soil formation of Northern Eurasia]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta; 1995. 270 p. Russian.
51. Molodkov AN, Bolikhovskaya NS. Long-term palaeoenvironmental changes recorded in palynologically studied loess-paleosol and ESR-dated marine deposits of Northern Eurasia: implications for sea-land correlation. *Quaternary International*. 2006;152–153: 48–58. DOI: 10.1016/j.quaint.2005.12.010.
52. Molodkov AN, Bolikhovskaya NS. Climate change dynamics in Northern Eurasia over the last 200 ka: evidence from the mollusk-based ESR-chronostratigraphy and vegetation succession of the loess-paleosol records. *Quaternary International*. 2009;201:67–76. DOI: 10.1016/j.quaint.2008.05.028.
53. Shelkopyas VN, Morozov VG. *Primenenie termoluminescentnogo metoda dlya izucheniya antropogenovykh otlozhenii* [Application of thermoluminescent method for studying anthropogenic sediments]. Kyiv: Institut geologicheskikh nauk; 1981. 42 p. Russian.
54. Zubakov VA. *Global'nye klimaticheskie sobytiya pleistotsena* [Global climatic events of the Pleistocene]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1986. 286 p. Russian.
55. Zubakov VA. *Lednikovo-mezhlednikovye tsikly pleistotsena Russkoi i Sibirskoi ravnin v sporovo-pyl'tsevykh diagrammakh* [Glacial-interglacial cycles of the Pleistocene of the Russian and Siberian plains in spore-pollen diagrams]. Saint Petersburg: Gosudarstvennyi gidrologicheskii institut; 1992. 122 p. Russian.
56. Zubakov VA. The recent state of climatostratigraphy: about correlation of the European climates to the astrochronological scale. *Bulletin of Comission for Study of the Quaternary*. 2005;66:42–64. Russian. EDN: WFLNKX.
57. Zubakov VA, Borzenkova II. *Global palaeoclimate of the Late Cenozoic*. New York: Elsevier; 1990. 476 p.
58. Shelkopyas VN, Gozhik PF, Khristoforova TF. *Antropogenovye otlozheniya Ukrainy* [Anthropogenic sediments of Ukraine]. Makarenko DE, editor. Kyiv: Naukova dumka; 1988. 152 p. Russian.
59. Gozhik PF. [Stratigraphic schemes of the Upper Proterozoic and Phanerozoic of Ukraine]. In: Institute of Geological Science of Ukraine National Science Academy. *Stratigrafiya osadochnykh obrazovaniy verkhnego proterozoya i fanerozoya. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii; 23–26 sentyabrya 2013 g.; Kiev, Ukraina* [Stratigraphy of sedimentary formations of the Upper Proterozoic and Phanerozoic. Proceedings of the International scientific conference; 2013 September 23–26; Kyiv, Ukraine]. Kyiv: LAT & K; 2013. p. 46–47. Russian.
60. Yelovicheva YaK. *Opornye razrezy pleistotsena Ukrainy i ikh korrelyatsiya s territoriei Belarusi* [Reference sections of the Pleistocene of Ukraine and their correlation with the territory of Belarus]. Minsk: Belarusian State University; 2003. 109 p. Russian.
61. Yelovicheva YaK. *Razrezy glytsiopleistotsena i golotsena Ukrainy v palinologicheskoi baze dannykh Belarusi* [Sections of the Glaciopleistocene and Holocene of Ukraine in the palynological database of Belarus]. Minsk: Belarusian State University; 2013. 162 p. Russian.
62. Beartschi P. Absolute ¹⁸O content of standard mean ocean water. *Earth and Planetary Science Letters*. 1976;31(3):341–344. DOI: 10.1016/0012-821X(76)90115-1.
63. Budd WF, Morgan VI. Isotopes, climate and ice sheet dynamics from core studies on Law Dome, Antarctica. In: International Association of Hydrological Sciences. *International Symposium on isotopes and impurities in snow and ice; 1975 August – September; Grenoble, France*. Dorking: Adlard & Son; 1977. p. 312–321 (IAHS-AISH publication; volume 118).
64. Kotlyakov VM, Gordienko FG, Barkov NI, Korotkevich ES. [Isotope studies of core from Vostok station and their paleoglaciological interpretation]. In: Avsyuk GA, editor. *Antarktika. Vypusk 19* [Antarktika. Issue 19]. Moscow: Akademiya nauk SSSR; 1980. p. 45–53. Russian.
65. Kotlyakov VM, Lorius K. [Four climatic cycles according to ice core data from a deep well at Vostok station in Antarctica]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2000;1:7–19. Russian.
66. Bol'shakov VA, Fedin VA. Orbital factors of impact on Earth's cryosphere (on the example of analysis of the Antarctic cores). *Kriosfera Zemli*. 2015;19(2):87–97. Russian. EDN: TWMXNP.
67. Dansgaard W, Johnsen SJ, Clausen HB, Gundestrup N. *Stable isotope glaciology*. Kobenhavn: C. A. Reitzel; 1973. 53 p. (Meddelelser om Grønland; Band 197, Nummer 2).
68. Cuffey KM, Alley RB, Grootes PM, Bolzan JM, Anandakrishnan S. Calibration of the $\delta^{18}\text{O}$ isotopic paleothermometer for central Greenland, using borehole temperatures. *Journal of Glaciology*. 1994;40(135):341–349. DOI: 10.1017/s0022143000007425.
69. Stuiver M, Grootes PM, Braziunas TF. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16 500 years and the role of the Sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Research*. 1995;44(3):341–354. DOI: 10.1006/qres.1995.1079.
70. Stuiver M, Reimer PJ, Bard E, Beck JW, Burr GS, Hughen KA, et al. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24 000–0 cal BP. *Radiocarbon*. 1998;40(3):1041–1084. DOI: 10.1017/S0033822200019123.
71. Panin AV. *Metody paleogeograficheskikh issledovaniy: chetvertichnaya geokhronologiya* [Methods of paleogeographic research: Quaternary geochronology]. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2014. 116 p. Russian. EDN: OZEJDX.
72. Bolikhovskaya NS, Molod'kov AN. [Correlation of loess-soil formation and marine sediments of Northern Eurasia (based on the results of palynological and EPR analyses)]. In: Kaplin PA, Sudakova NG, editors. *Problemy paleogeografii i stratigrafii pleistotsena* [Problems of paleogeography and stratigraphy of the Pleistocene]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta; 2000. p. 149–178. Russian.

73. Bolikhovskaya NS, Molodkov AN. [Periodisation scheme, correlation and age of Pleistocene climatic events]. In: Kontorovich AE, editor. *Fundamental'nye problemy kvartera: itogi izucheniya i osnovnye napravleniya dal'neishikh issledovaniy. Materialy VI Vserossiiskogo soveshchaniya po izucheniyu chetvertichnogo perioda: 19–23 oktyabrya 2009 g.*; Novosibirsk, Rossiya. *Vypusk 3* [Fundamental problems of the quarter: results of the study and main directions for further research. Proceedings of the 6th All-Russian meeting on the study of the Quaternary period; 2009 October 19–23; Novosibirsk, Russia]. Novosibirsk: Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya RAN; 2009. p. 75–78. Russian.
74. Molodkov AN, Bolikhovskaya NS. [Climatic-chronological scheme of the Neopleistocene of Northern Eurasia (according to palynological, EPR and IR-OSL analyses of sediments)]. In: Bolikhovskaya NS, editor. *Problemy paleogeografii i stratigrafii pleistotsena. Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Markovskie chteniya 2010 goda»*; 13 maya 2010 g.; Moskva, Rossiya. *Vypusk 3* [Problems of paleogeography and stratigraphy of the Pleistocene. Proceedings of the All-Russian scientific conference «Markov Readings 2010»; 2010 May 13; Moscow, Russia. Issue 3]. Moscow: Geographical faculty of Lomonosov Moscow State University; 2011. p. 44–76. Russian.
75. Molodkov AN. [Experience of using the EPR dating method of mollusk shells from Quaternary deposits]. In: Alekseev MN, Nikiforova KV, editors. *Chetvertichnyi period. Stratigrafiya* [Quaternary period. Stratigraphy]. Moscow: Nauka; 1989. p. 204–213. Russian.
76. Molodkov AN. ESR dating evidence on early man's dwelling at a Lower Palaeolithic cave site in the Northern Caucasus. *Geologiya*. 1996;19:67–75.
77. Molodkov AN, Bolikhovskaya NS. Climato-chronostratigraphic framework of Pleistocene terrestrial and marine deposits of Northern Eurasia, based on pollen, electron spin resonance, and infrared optically stimulated luminescence analyses. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2010;59:49–62. DOI: 10.3176/earth.2010.1.04.
78. Bol'shakov VA. On the interpretation of paleomagnetic data on moraines. *Fizika Zemli*. 2011;9:48–56. Russian. EDN: NYHQAT.
79. Bol'shakov VA. [Some chronostratigraphic results of comparison of the orbital-climatic diagram with the globally averaged oxygen isotope record LR04 for the time interval 0–1.5 mln years ago]. In: Zhuravkov MA, editor. *Problemy regional'noi geologii i poiskov poleznykh iskopaemykh. Materialy VII Universitetskikh geologicheskikh chtenii*; 4–6 aprelya 2013 g.; Minsk, Belarus' [Problems of regional geology and mineral exploration. Proceedings of the 7th University geological readings; 2013 April 4–6; Minsk, Belarus]. Minsk: Belarusian State University; 2013. p. 71–72. Russian.
80. Bol'shakov VA. [On the number of glacial cycles identified in the loess formation within the Brunhes chron]. In: V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS. *Fundamental problems of Quaternary, results of the study and the main trends of further research. Proceedings of the 9th All-Russian conference on Quaternary research; 2015 September 15–20; Irkutsk, Russia*. Irkutsk: V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS; 2015. p. 64–66. Russian.
81. Bol'shakov VA, Karevskaya IA. On the existence of the eccentricity's 400-kyr cyclicality during the Pleistocene environment changes. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2013;2:83–90. Russian. EDN: PZFPNV.
82. Lisiecki LE. Links between eccentricity forcing and the 100 000 year glacial cycle. *Nature Geoscience*. 2010;3:349–352. DOI: 10.1038/ngeo828.
83. Lisiecki LE, Raymo ME. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*. 2005; 20(1):PA1003. DOI: 10.1029/2004PA001071.
84. Anderson ARA, Young IM, Sleeman BD, Griffiths BS, Robertson WM. Nematode movement along a chemical gradient in a structurally heterogeneous environment. 1. Experiment. *Fundamental and Applied Nematology*. 1997;20(2):157–163.
85. Anderson ARA, Sleeman BD, Young IM, Griffiths BS. Nematode movement along a chemical gradient in a structurally heterogeneous environment. 2. Theory. *Fundamental and Applied Nematology*. 1997;20(2):165–172.
86. Naurzbaev MM, Varanov EA, Sidorova OV. Variability of the air temperature in the north of Eurasia inferred from millennial tree-ring chronologies. *Kriosfera Zemli*. 2003;7(2):84–91. Russian. EDN: MPQSOJ.
87. Makhnach NA. *Etapy razvitiya rastitel'nosti Belorussii v antropogene* [Stages of development of vegetation in Belarus in the Anthropogene]. Levkov EA, editor. Minsk: Nauka i tekhnika; 1971. 212 p. Russian.
88. Chebotareva NS. [A new section with Dnieper – Valdai interglacial deposits on the Kasplya River near the Verkhnyaya Boyarshchina Village]. In: Lomonosov Moscow State University. *Materialy po paleogeografii. Vypusk 1* [Materials on paleogeography. Issue 1]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta; 1954. p. 69–81. Russian.
89. Shackleton NJ. The last interglacial in the marine and terrestrial records. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*. 1969;174(1034):135–154. DOI: 10.1098/rspb.1969.0085.
90. Litt T, Gibbard P. Definition of a global stratotype section and point (GSSR) for the base of the Upper (Late) Pleistocene subseries (Quaternary system/period). *Episodes*. 2008;31(2):260–263. DOI: 10.18814/epiugs/2008/v31i2/015.
91. Velichko AA, editor. *Paleoklimaty i paleolandshafty vnetropicheskogo prostranstva Severnogo polushariya. Pozdnii pleistotsen – golotsen* [Paleoclimates and paleolandscapes of the extratropical space of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene – Holocene]. Moscow: GEOS; 2009. 120 p. Russian.
92. de Beaulieu JL, Yelovicheva YaK, Gruger E, Kalnina L, Liivrand E, Chomutova V, et al. Macrosuccessional plantseries of the Eemian in Europe. In: Gibbard PL, van Kolfschoten T, editors. *The Eemian: local sequences, global perspectives. Abstracts of International INQUA – SEQS symposium; 1998 September 6–11; Kerkrade, The Netherlands*. Kerkrade: INQUA – SEQS; 1998. p. 93.
93. Yelovicheva YaK, de Beaulieu JL, Gruger E, Kalnina L, Liivrand E, Chomutova V, et al. [Macrosuccession of paleophytocenoses of the Eemian interglacial in Europe (according to palynological data)]. In: Bolikhovskaya NS, Rovnina LV, editors. *Aktual'nye problemy palinologii na rubezhe tret'ego tysyacheletiya* [Current problems of palynology at the turn of the third millennium]. Moscow: Institute of Geology and Development of Combustible Fossils; 1999. p. 98–100. Russian.
94. Yelovicheva YaK. [Peculiarities of the palynological characteristics of the Muravin (Eemian) interglacial sediments of the Dnieper Region]. In: Kalicki T, editor. *Paleogeografija verhnjaga plejstacjenu i galacjenu Ushodnjaj Pol'shchy i Belarusi. Tjezisy Pol'ska-belaruskaga seminaru; 5–7 kastychnika 1998 g.*; Krakaw, Pol'shcha [Paleogeography of the Upper Pleistocene and Holocene of eastern Poland and Belarus. Theses of the Polish-Belarusian seminar; 1998 October 5–7; Krakow, Poland]. Krakow: [s. n.]; 1998. p. 57–58. Belarusian.
95. Yelovicheva YaK. Rozbiezności palynologicznej charakterystyki murawinskih (eemskich) interglacjalnych osadow Podnieprowia. W: Kalicki T, redaktor. *Paleogeografia gornego Plejstocenu i Holocenu Wschodniej Polski i Bialorusi. Streszczenia referatow, posterow i przewodnik wycieczki; 5–7 pazdziernika 1998 r.*; Krakaw, Polska. Krakow: [s. n.]; 1998. s. 14.

96. Yelovicheva YaK. Rozbiezności palynologicznej charakterystyki murawinskih (eemskih) interglacjalnych osadów Podnieprowia. W: Polska Akademia Umiejętności. *Sprawozdania z czynności i posiedzeń Polskiej akademii umiejętności. Tom 62*. Kraków: Polska Akademia Umiejętności; 1998. s. 162–163.
97. Yelovicheva YaK, de Beaulieu JL, Gruger E, Kalnina L, Liivrand E, Chomutova V, et al. *Makrosuktsessii paleofitotsenozov eemskogo mezhdunodnikov'ya v Evrope na osnove palinologicheskogo analiza* [Macrosuccession of paleophytocenoses of the Eemian interglacial in Europe according to palynological data]. Minsk: Belarusian State University; 2006. 75 p. Russian.
98. Bowen DQ. *Quaternary geology: a stratigraphic framework for multidisciplinary work*. Oxford: Pergamon Press; 1978. 221 p.
99. Yelovicheva YaK. *Evolutsiya prirodnoi sredy antropogena Belarusi (po palinologicheskim dannym)* [Evolution of the natural environment of the anthropogene of Belarus (according to palynological data)]. Minsk: Belsens; 2001. 292 p. Russian.
100. Yelovicheva YaK. *Palinologiya Belarusi (k 100-letiyu Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta)* [Palynology of Belarus (to the 100th anniversary of the Belarusian State University)]. Minsk: Belarusian State University; 2018. 831 p. Russian.
101. Balobaev VT, Shepelev VV. [Thermal resonance effect in global climate fluctuations]. *Nauka i tekhnika v Yakutii*. 2003;2: 7–10. Russian. EDN: VRVQON.
102. Imbrie J, Berger A, Boyle EA, Clemens SC, Duffy A, Howard WR, et al. On the structure and origin of major glaciation cycles. 2. The 100 000 year cycle. *Paleoceanography*. 1993;8(6):699–735. DOI: 10.1029/93PA02751.
103. Bolikhovskaya NS, Molodkov AN. [On the correlation of continental and marine Quaternary deposits of Northern Eurasia based on palynological data and ESR dating results]. In: Bolikhovskaya NS, Rovnina LV, editors. *Aktual'nye problemy palinologii na rubezhe tret'ego tysyacheletiya* [Current problems of palynology at the turn of the third millennium]. Moscow: Institute of Geology and Development of Combustible Fossils; 1999. p. 25–53. Russian.
104. Bolikhovskaya NS, Molodkov AN. [The second half of MIS-5 (100–70 thousand years ago): glacial or interglacial]. In: Bolikhovskaya NS, Klyuvitkina TS, Yanina TA, editors. *Aktual'nye problemy paleogeografii pleistotsena i golotsena. Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Markovskie chteniya 2020 goda», posvyashchennoi 115-letiyu so dnya rozhdeniya akademika K. K. Markova; 5–9 noyabrya 2020 g.; Moskva, Rossiya* [Current problems of paleogeography of the Pleistocene and Holocene. Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation «Markov Readings 2020», dedicated to the 115th anniversary of the birth of academician K. K. Markov; 2020 November 5–9; Moscow, Russia]. Moscow: Geographical faculty of Lomonosov Moscow State University; 2020. p. 63–70. Russian.
105. Maksimov FE, Kuznetsov VYu, Savel'eva LA, Grigor'ev VA, Petrov AYU, Fomenko AP, et al. [On the question of the time boundaries of the Mikulin interglacial and its individual phases]. In: Panin AV, Borisova OK, Konstantinov EI, Timireva SN, Kono-nov YuM, editors. *Puti evolyutsionnoi geografii. Materialy II Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati professora A. A. Velichko; 22–25 noyabrya 2021 g.; Moskva, Rossiya. Tom 2, vypusk 2* [Paths of evolutionary geography. Materials of the 2nd All-Russian scientific conference dedicated to the memory of professor A. A. Velichko; 2021 November 22–25; Moscow, Russia. Volume 2, issue 2]. Moscow: Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences; 2021. p. 812–816. Russian.
106. Savelieva LA, Fomenko AP, Maksimov FE, Petrov AYU, Grigoriev VA, Popova SS, et al. New data on the geochronology of the Mikulin (Eemian) interglacial according to the study of the northwestern Russian Plain sections. *Relief and Quaternary Deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2021;8:355–358. Russian. DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-355-358.
107. San'ko AF, Litvinyuk GI, Savchenko IE. [Neopleistocene deposits of the Surazh-Velizh Lowland and its geochronology]. In: National Academy of Sciences of Belarus. *Quaternary deposits and neotectonics in the area of Pleistocene glaciations. Proceedings of the symposium; 1997 May 12–13; Minsk, Belarus*. Minsk: [s. n.]; 1997. p. 62–63. Russian.
108. Tsapenko MM, Makhnach NA. *Antropogenovye otlozheniya Belorussii* [Anthropogenic proposals of Belarus]. Minsk: Izdatel'stvo Akademii nauk BSSR; 1959. 223 p. Russian.
109. Yelovicheva YaK, Pisarchuk NM. [Macrosuccession of vegetation of the Muravin (Mikulin) interglacial within the western Eastern European Plain]. In: Yelovicheva YaK, editor. *Regional'naya fizicheskaya geografiya v novom stoletii. Vypusk 10* [Regional physical geography in the new century. Issue 10]. Minsk: Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank; 2017. p. 15–51. Russian.
110. San'ko AF, Frekhen M, Arslanov KhA, Velichkevich FYu, Yelovicheva YaK, Kuznetsov VYu, et al. [Absolute dating of Upper Pleistocene deposits in Belarus]. In: Matveev AV, San'ko AF, editors. *Pleistotsen Belarusi i sopredel'nykh territorii. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 75-letiyu so dnya rozhdeniya L. N. Voznyachuka; 29 oktyabrya 2004 g.; Minsk, Belarus* [Pleistocene of Belarus and adjacent territories. Proceedings of the International scientific conference dedicated to the 75th anniversary of the birth of L. N. Voznyachuk; 2004 October 29; Minsk, Belarus]. Minsk: Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank; 2004. p. 59. Russian.
111. San'ko AF, Arslanov KhA, Yelovicheva YaK, Velichkevich FYu, Kuznetsov VYu, Maksimov FE, et al. The first U/Th dating of the Muravian interglacial deposits in Belarus. In: Sikorski J, editor. *Abstracts of the 8th International conference «Methods of absolute chronology»; 2004 May 17–19; Ustron, Poland*. Gliwice: [s. n.]; 2004. p. 132–133.
112. Maksimov FE, Arslanov KhA, Kuznetsov VYu, Chernov SB. ²³⁰Th/U and ¹⁴C dating of Upper and Middle Pleistocene interglacial and interstadial organic deposits from the East European Plain and Siberia. In: INTAS. *INTAS Final Workshop. Pleistocene Environments in Eurasia – Chronology, Paleoclimate and Teleconnection; 2006 November 2–3; Hannover, Germany*. Hannover: Geozentrum; 2006. p. 45–49.
113. Yelovicheva YaK, San'ko AF. [New data on the stratotype of the Muravin interglacial in Belarus]. In: Anoshko YaI, editor. *Problemy vodnykh resursov, geotermii i geoekologii. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika G. V. Bogomolova; 1–3 iyunya 2005 g.; Minsk, Belarus*. Tom 2 [Problems of water resources, geothermal and geocology. Proceedings of the International scientific conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of academician G. V. Bogomolov; 2005 June 1–3; Minsk, Belarus. Volume 2]. Minsk: Institute of Geochemistry and Geophysics of the National Academy of Sciences of Belarus; 2005. p. 240–242. Russian.
114. Maksimov FE, Kuznetsov VYu. The new version of the ²³⁰Th/U-dating method of Upper and Middle Pleistocene buried organogenic sediments. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7, Geologiya. Geografiya*. 2010;4:94–107. Russian. EDN: NCFGWB.
115. Kuznetsov VYu, Maksimov FE. *Metody chetvertichnoi geokhronometrii v paleogeografii i morskoi geologii* [Methods of Quaternary geochronometry in paleogeography and marine geology]. Saint Petersburg: Nauka; 2012. 191 p. Russian.

116. Rusakov AV, Nikonov AA, Savelieva LA, Simakova AN, Sedov SN, Maksimov FE, et al. Landscape evolution in the periglacial zone of Eastern Europe since MIS-5: proxies from paleosols and sediments of the Cheremoshnik key site (Upper Volga, Russia). *Quaternary International*. 2015;365(3):26–41. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.09.029.
117. Grichuk VP. *Istoriya flory i rastitel'nosti Russkoi ravniny v pleistotsene* [History of flora and vegetation of the Russian Plain in the Pleistocene]. Zaklinskaya ED, editor. Moscow: Nauka; 1989. 183 p. Russian.
118. Maksimov FE, Savelieva LA, Levchenko SB, Grigoriev VA, Petrov AYU, Fomenko AP, et al. On the chronology of the Mikulin interglacial in the North-West Russian Plain. *Relief and Quaternary Deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2020;7:322–326. Russian. DOI: 10.24411/2687-1092-2020-10752.
119. Maksimov FE, Savelieva LA, Popova SS, Zyuganova IS, Grigoriev VA, Levchenko SB, et al. Chronostratigraphic position of the Mikulin deposits (case of the reference section near Nizhnyaya Boyarshchina Village, Smolensk Region). *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2022;86(3):447–469. Russian. DOI: 10.31857/S2587556622030116.
120. Pisarchuk NM, Yelovicheva YaK. [New data on the section of the Mikulin interglacial Nizhnyaya Boyarshchina]. In: Khalikov AR, editor. *Fundamental science and technology. Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii; 20 dekabrya 2022 g.; Ufa, Rossiya* [Fundamental science and technology. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference; 2022 December 20; Ufa, Russia]. Ufa: Vestnik nauki; 2022. p. 153–160. Russian. EDN: CIBECN.
121. Giterman RE, Kuprina NP, Shantser EV. [On the Mikulin age of interglacial layers near the village of Kileshino (Upper Volga)]. *Bulletin of Comission for Study of the Quaternary*. 1975;44:84–88. Russian.
122. Lasberg K, Kalm V, Kihno K. Ice-free interval corresponding to marine isotope stages 4 and 3 at the last glacial maximum position at Kileshino, Valdaj Upland, Russia. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2014;63(2):88–96. DOI: 10.3176/earth.2014.08.
123. Sycheva SA. [Evolution of ideas about the age, duration and stages of soil development of the Mikulin interglacial]. *Bulletin of Comission for Study of the Quaternary*. 2018;76:99–109. Russian.
124. Grichuk VP. [Fossil floras as a paleontological basis for the stratigraphy of Quaternary deposits]. In: Markov KK, editor. *Rel'ef i stratigrafiya chetvertichnykh otlozhenii severo-zapada Russkoi ravniny* [Relief and stratigraphy of Quaternary deposits of the North-West Russian Plain]. Moscow: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR; 1961. p. 25–71. Russian.
125. Fomenko AP, Savelieva LA, Maksimov FE, Petrov AYU, Grigoriev VA, Popova SS, et al. [The thermal maximum of the Mikulin interglacial according to the results of a palynological study of sediments of the section on the Bolshaya Dubenka River (Tver Region)]. In: Panin AV, Borisova OK, Konstantinov EI, Timireva SN, Kononov YuM, editors. *Puti evolyutsionnoi geografii. Materialy II Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati professora A. A. Velichko; 22–25 noyabrya 2021 g.; Moskva, Rossiya. Tom 2, vypusk 2* [Paths of evolutionary geography. Materials of the 2nd All-Russian scientific conference dedicated to the memory of professor A. A. Velichko; 2021 November 22–25; Moscow, Russia. Volume 2, issue 2]. Moscow: Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences; 2021. p. 852–855. Russian.
126. Fomenko AP, Savelieva LA, Maksimov FE, Petrov AYU, Grigoriev VA, Popova SS, et al. Features of vegetation cover and uranium-thorium age of the Mikulin (Eemian) interglacial on the Russian Plain. *Relief and Quaternary Deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2022;9:355–357. Russian. DOI: 10.24412/2687-1092-2022-9-355-357.

Получена 14.12.2023 / исправлена 05.03.2024 / принята 05.03.2024.
Received 14.12.2023 / revised 05.03.2024 / accepted 05.03.2024.

УДК 528.88.044.1:630.1(476) + 528.94:630.1.004(476)

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Н. А. ШЕСТАКОВ¹⁾, А. А. ТОПАЗ¹⁾

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

Аннотация. Представлены методика и результаты картографирования лесной растительности путем автоматизированного дешифрирования по данным дистанционного зондирования Земли (изображений «Landsat-8», «Landsat-9», «Sentinel-2»). С использованием средств программных комплексов *ENVI* (версия 5.6) и *ArcMap* (версия 10.7) произведена комплексная цифровая обработка космических снимков. На основе результатов тематической обработки мультиспектральных спутниковых данных и математико-статистического анализа получены значения коэффициентов спектральной яркости шести лесообразующих пород: сосны, ели, березы, ольхи черной, осины и дуба. Анализ спектральной отражательной способности, выполненный в программах *Statistica* (версия 10) и *Microsoft Office Excel*, позволил установить спектральные дешифровочные признаки исследуемых пород с учетом сезонных изменений и определить оптимальные для дешифрирования временные сроки. На основе результатов автоматизированного дешифрирования по данным спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» выполнено среднemasштабное (1 : 125 000) картографирование лесной растительности на примере территории республиканского ландшафтного заказника «Озёры». Путем анализа разновременных данных дистанционного зондирования Земли произведено автоматизированное обнаружение изменений лесного покрова с 2013 по 2022 г. (по данным снимка «Landsat-8») и с 2018 по 2022 г. (по данным снимка «Sentinel-2»). Составлены 12 карт лесной растительности, отражающих актуальное состояние и динамику лесного покрова заказника, 2 из которых представлены в статье. Картографическое оформление результатов тематической обработки мультиспектральных спутниковых изображений осуществлено в программах *ArcGIS (ArcMap)* (версия 10.7) и *Adobe Illustrator* (версия 2019 г.).

Ключевые слова: лесная растительность; картографирование; дешифрирование; данные дистанционного зондирования Земли; «Landsat-8»; «Landsat-9»; «Sentinel-2».

Образец цитирования:

Шестаков НА, Топаз АА. Картографирование лесной растительности на основе автоматизированного дешифрирования по данным дистанционного зондирования Земли. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;1:98–112.
EDN: EBGHCK

For citation:

Shastakou MA, Tapaz AA. Mapping of the forest vegetation on automated interpretation of remote sensing data. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;1:98–112. Russian.
EDN: EBGHCK

Авторы:

Никита Алексеевич Шестаков – аспирант кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики. Научный руководитель – А. А. Топаз.
Антонина Анатольевна Топаз – кандидат географических наук, доцент; заведующий кафедрой геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Mikita A. Shastakou, postgraduate student at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.
nishestakov23@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

MAPPING OF THE FOREST VEGETATION BASED
ON AUTOMATED INTERPRETATION OF REMOTE SENSING DATAM. A. SHASTAKOU^a, A. A. TAPAZ^a^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: M. A. Shastakou (nishestakov23@gmail.com)

Abstract. The article presents the technique and results of forest vegetation mapping based on automated interpretation of «Landsat-8», «Landsat-9», and «Sentinel-2» remote sensing data. The comprehensive digital processing of the satellite data was done using the tools of *ENVI* (version 5.6) and *ArcMap* (version 10.7) software packages. The values of spectral reflectance coefficients for six forest-forming species (pine, spruce, birch, black alder, aspen, oak) were obtained from the results of thematic data processing and mathematical and statistical analysis. The analysis of the spectral reflectance was performed in *Statistica* (version 10) and *Microsoft Office Excel* programmes. It allowed to establish the spectral deciphering signs of the studied species considering seasonal changes and determine the optimal times for the classification. The forest cover of the territory of Republican Landscape Reserve «Ozyory» was mapping on the medium-scale (1 : 125 000) level on the basis of the results of automated interpretation «Landsat-8», «Landsat-9», and «Sentinel-2» images. The automated detection of changes in the forest cover condition was based on multi-temporal remote sensing data – «Landsat-8» (2013–2022) and «Sentinel-2» (2018–2022) data. The article contains 2 of 12 maps of forest vegetation that show the current state and dynamics of the forest cover of the reserve territory. Cartographic design of the results of thematic processing of multispectral satellite images was carried out in *ArcGIS (ArcMap)* (version 10.7) and *Adobe Illustrator* (version 2019) programmes.

Keywords: forest vegetation; mapping; interpretation; remote sensing data; «Landsat-8»; «Landsat-9»; «Sentinel-2».

Введение

Леса и лесные ресурсы имеют важное значение для устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь, обеспечения ее экономической, энергетической, промышленной, экологической и продовольственной безопасности. По информации Национального статистического комитета Республики Беларусь, в 2021 г. на долю лесопокрытых территорий приходилось 40,1 % площади страны.

С учетом сформировавшейся системы ведения лесного хозяйства и имеющихся подходов к картографированию лесов в Беларуси внимание уделено в первую очередь крупномасштабному картографированию (1 : 10 000 – 1 : 50 000), для реализации которого используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) главным образом высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (как правило, материалы аэрофотосъемок) [1; 2]. При этом картографирование лесов в масштабе 1 : 100 000 и мельче выполняется путем генерализации содержания крупномасштабных карт. Применение современных данных ДЗЗ высокого и относительно высокого пространственного разрешения, а также технологий и методов геоинформационного анализа позволяет проводить тематическое картографирование на средне- и мелкомасштабном уровне на основе результатов цифровой обработки данных ДЗЗ. С опорой на опыт картографирования лесов на различном масштабном уровне в России [3–6], странах Европейского союза [7–9], Китае [10], Канаде, США, ряде других государств и регионов предполагается возможным и эффективным использование данных космического ДЗЗ в целях среднемасштабного картографирования лесов Беларуси.

Среди всего разнообразия современных данных ДЗЗ на сегодняшний день можно выделить мультиспектральные спутниковые снимки «Landsat-8», «Landsat-9» (Геологическая служба США) и «Sentinel-2» (Европейское космическое агентство), получившие широкое практическое применение в исследованиях наземных (в том числе растительных) покровов [3; 5–10]. Обеспеченность территории Беларуси данными ДЗЗ, отсутствие необходимости в проведении их полной фотограмметрической обработки и финансовых затрат на выполнение разносезонных съемок (в отличие от аэросъемок), обращение к специализированному программному обеспечению позволяют использовать эти изображения в качестве источника информации при составлении среднемасштабных карт лесной растительности.

Таким образом, цель исследования состояла в оценке возможностей среднемасштабного картографирования лесной растительности на основе результатов цифровой обработки мультиспектральных спутниковых данных (снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2»).

Материалы и методы исследования

В качестве объекта картографирования выбран лесной покров республиканского ландшафтного заказника «Озёры», расположенного на северо-востоке Гродненского района и в западной части Щучинского района Гродненской области. По состоянию на 2018 г. лесами было покрыто 90,6 % природоохранной

территории¹. Среди лесобразующих пород, получивших наибольшее распространение в этой местности, можно выделить шесть пород (семь видов): 1) сосну обыкновенную (*Pinus sylvestris*); 2) ель европейскую (*Picea abies*); 3) березу повислую (*Betula pendula*) и березу пушистую (*B. pubescens*); 4) ольху черную (*Alnus glutinosa*); 5) осину, или тополь дрожащий (*Populus tremula*); 6) дуб черешчатый (*Quercus robur*). С учетом информации о породном составе лесонасаждений, представленной в материалах лесоустройства Гродненского и Скидельского лесхозов, вычленены пять тестовых участков (ТУ) в пределах заказника (рис. 1).

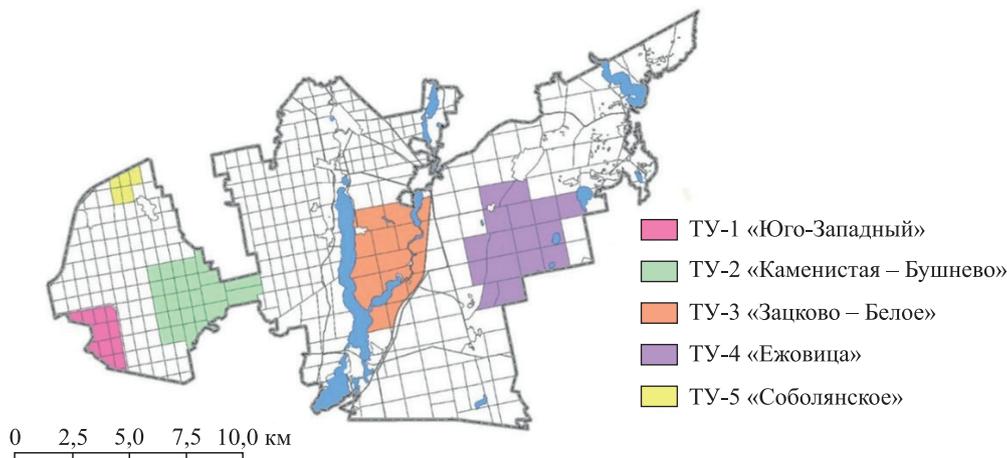


Рис. 1. ТУ в пределах территории республиканского ландшафтного заказника «Озёры»

Fig. 1. Test sites within Republican Landscape Reserve «Ozyory»

Исходными данными ДЗЗ послужили мультиспектральные спутниковые снимки, полученные с космических летательных аппаратов «Landsat-8», «Landsat-9»² и «Sentinel-2A», «Sentinel-2B»³. Следует отметить, что сходство в спектральном диапазоне съемки каналов съемочных систем позволяет задействовать данные спутниковых снимков при решении задач в рамках общей тематики, а разница в пространственном разрешении (30 м для снимков «Landsat-8», «Landsat-9», 10 м для снимков «Sentinel-2») дает возможность картографировать объект на различном масштабном уровне, а также изучать и оценивать влияние аэрокосмической генерализации на изобразительные свойства снимка и результаты тематической обработки (табл. 1).

Таблица 1

Сопоставление съемочных систем спутников «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» по спектральному и пространственному разрешению

Table 1

Comparing of «Landsat-8», «Landsat-9», and «Sentinel-2» satellite sensors by spectral and geometric resolution

«Landsat-8» (OLI), «Landsat-9» (OLI-2)			«Sentinel-2A» (MSI), «Sentinel-2B» (MSI)		
Канал	Спектральное разрешение, мкм	Пространственное разрешение, м	Канал	Спектральное разрешение, мкм	Пространственное разрешение, м
В-1 «Coastal aerosol»	0,443	30	В-1 «Ultra blue»	0,443	60
В-2 «Blue»	0,482	30	В-2 «Blue»	0,490	10
В-3 «Green»	0,561	30	В-3 «Green»	0,560	10
В-8 «Panchromatic»	0,590	15	–	–	–

¹План управления республиканским ландшафтным заказником «Озёры»: отчет о НИР / Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по биоресурсам; рук. Н. А. Юргенсон. Минск, 2017. 157 с.

²«Landsat» levels of processing [Electronic resource] // United States Geological Survey. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-levels-processing> (date of access: 10.08.2023).

³«Sentinel-2» mission guide [Electronic resource] // Sentinel online. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (date of access: 10.08.2023).

Окончание табл. 1
Ending of the table 1

«Landsat-8» (OLI), «Landsat-9» (OLI-2)			«Sentinel-2A» (MSI), «Sentinel-2B» (MSI)		
Канал	Спектральное разрешение, мкм	Пространственное разрешение, м	Канал	Спектральное разрешение, мкм	Пространственное разрешение, м
B-4 «Red»	0,654	30	B-4 «Red»	0,665	10
–	–	–	B-5 «VRE-1»	0,705	20
–	–	–	B-6 «VRE-2»	0,740	20
–	–	–	B-7 «VRE-3»	0,783	20
–	–	–	B-8 «NIR»	0,842	10
B-5 «NIR»	0,864	30	B-8A «NIR narrow»	0,865	20
–	–	–	B-9 «Water vapor»	0,945	60
B-9 «Cirrus»	1,374	30	B-10 «SWIR cirrus»	1,375	60
B-6 «SWIR-1»	1,609	30	B-11 «SWIR»	1,610	20
B-7 «SWIR-2»	2,201	30	B-12 «SWIR»	2,190	20

Примечания: 1. Прочерком обозначены каналы, которые не имеют аналогов; светло-серым и серым фоном выделены каналы, используемые в исследовании, только серым фоном – каналы, наиболее информативные для изучения лесной растительности. 2. В скобках указаны названия съемочных систем (сенсоров) космических аппаратов (OLI – operational land imager, MSI – multispectral imager).

Отбор данных ДЗЗ как основы для картографирования лесной растительности требует учета ряда факторов, связанных с физиологическими особенностями объекта исследования, физико-географическими условиями местности, а также с техническими возможностями съемочных систем. К наиболее значимым факторам можно отнести: специфику вегетационного периода лесной растительности, разнообразной по типу (хвойная и лиственная) и породному составу (шесть пород); присутствие, характер размещения облаков, их теней; периодичность съемки; сопоставимость дат проведения съемки для четырех съемочных систем.

В результате приобретения снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» из источников открытого доступа были сформированы два блока исходных данных ДЗЗ: первый блок включает актуальные разнотемпературные снимки (2021, 2022), необходимые для исследования сезонных изменений спектральной отражательной способности лесонасаждений пород, проведения автоматизированного дешифрирования и картографирования породного состава лесонасаждений, а второй блок – архивные снимки (2013–2019), предназначенные для картографирования динамики лесного покрова по результатам обнаружения изменений. Общее число полученных снимков составило 45 ед., из них снимков «Landsat-8» насчитывается 16 ед., снимков «Landsat-9» – 3 ед., снимков «Sentinel-2A» – 16 ед., снимков «Sentinel-2B» – 10 ед.

Особое внимание в работе уделено методам обработки данных ДЗЗ, которые можно разделить на методы предварительной обработки и методы тематической обработки⁴. Цифровая обработка мультиспектральных спутниковых снимков производилась на базе программного комплекса (ПК) *ENVI* (версия 5.6) и геоинформационной системы (ГИС) *ArcGIS (ArcMap)* (версия 10.7). Методика картографирования лесной растительности на основе цифровой обработки данных ДЗЗ (изображений «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2») представлена на рис. 2.

Цель подготовки и предобработки данных ДЗЗ – формирование набора разновременных многоканальных изображений, полученных на основе снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» исследуемой территории и пригодных для выполнения тематической обработки. В ПК *ENVI* (версия 5.6) получены фрагменты мультиспектральных спутниковых изображений путем вырезания исходных снимков по границе республиканского ландшафтного заказника «Озёры». Для части снимков «Landsat-8», «Landsat-9» выполнена геометрическая коррекция, заключающаяся в трансформировании спутниковых изображений, в результате чего был произведен пересчет координат для 10 снимков с номенклатурным обозначением центра сцены 187/022 в системе разграфки WRS-2 из зоны 34N в зону 35N.

⁴Тоназ А. А. Методы дистанционных исследований : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 1-31 02 01 «География (по направлениям)», 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-33 01 02 «Геоэкология», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)». Минск : БГУ, 2022. 127 с.



Рис. 2. Технологическая схема обработки данных ДЗЗ для картографирования лесной растительности
 Fig. 2. Technological scheme of remote sensing data processing for mapping of the forest vegetation

Актуальной проблемой при количественном анализе данных ДЗЗ, полученных в оптическом диапазоне электромагнитного спектра, является грамотный учет преобразований проходящего через атмосферную толщу излучения, а также помех, вызванных возможными дефектами съемочной аппаратуры (радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция)⁵. Высокий уровень обработки используемых данных ДЗЗ (L2SP для снимков «Landsat-8», «Landsat-9», L2A для снимков «Sentinel-2») предусматривает устранение технических ошибок сенсора и нивелирование влияния атмосферной среды. Следовательно, в проведении пользователем атмосферной коррекции они не нуждались. Подготовленные в ПК *ENVI* (версия 5.6) изображения «Landsat-8», «Landsat-9» включают 7 спектральных каналов ($\lambda = 0,43\text{--}2,29$ мкм) с пространственным разрешением 30 м, изображения «Sentinel-2» – 11 спектральных каналов ($\lambda = 0,43\text{--}2,28$ мкм) с пространственным разрешением 10–60 м.

Центральное место в схеме тематической обработки данных ДЗЗ занимает дешифрирование – комплекс мероприятий, направленных на получение информации об объектах местности и явлениях географической среды по их изображению на данных ДЗЗ. Современные методы дешифрирования основываются на знании закономерностей воспроизведения оптических, геометрических, спектральных свойств изображаемых объектов и явлений на материалах дистанционных наблюдений, а также их пространственного размещения⁶. Дешифрирование лесного покрова (как и любых других объектов земной поверхности) базируется на использовании дешифровочных признаков – наиболее характерных свойств объектов или их взаимосвязей, нашедших отражение на материалах дистанционных съемок и позволяющих распознавать исследуемый объект⁷.

⁵Тоназ А. А., Шестаков Н. А. Цифровая обработка космических снимков : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 1-31 02 03 «Космоаэрокартография». Минск : БГУ, 2023. 95 с.

⁶Тоназ А. А. Методы дистанционных исследований... 127 с.

⁷Шихов А. Н., Герасимов А. П., Пономарчук А. И. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения : учеб. пособие. Пермь : Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2020. 191 с.

Дешифрирование лесной растительности республиканского ландшафтного заказника «Озёры» по снимкам «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» включало три этапа: на первом этапе проводилось визуальное дешифрирование породного состава лесонасаждений, на втором этапе выполнялся анализ спектральных дешифровочных признаков лесной растительности на основе значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), на третьем этапе осуществлялось автоматизированное дешифрирование лесной растительности путем анализа величин КСЯ. Визуальное дешифрирование подразумевало решение двух задач: 1) получение эталонных изображений лесонасаждений за разные сезоны (табл. 2); 2) выделение областей интереса по изображению лесонасаждений для последующего извлечения из них спектральной информации в виде значений КСЯ.

Таблица 2

Эталонные изображения лесообразующих пород по данным спутникового снимка «Sentinel-2» за 18 января 2021 г.

Table 2

Reference images of forest-forming species based on «Sentinel-2» satellite image data for 18 January 2021

Диапазон съемки (канал)	Порода					
	Сосна	Ель	Береза	Ольха черная	Осина	Дуб
RGB (4-3-2)						
NRG (8-4-3)						
NIR (8)						

Получение спектральной информации об исследуемых породах в ПК *ENVI* (версия 5.6) осуществлялось путем извлечения средних значений яркости изображения в пределах указанных областей интереса. Местоположение областей интереса определялось рядом критериев: они располагались в пределах ТУ; отбирались участки с однородным спектральным откликом, свободные от дымки, облаков, а также их теней; для снимков за февраль и март во внимание принималось присутствие снежного покрова. Размеры областей интереса подбирались с учетом размеров выделов и пространственного разрешения используемых данных ДЗЗ. Каждая область интереса представляла собой квадрат размером 3 × 3 пк для изображений «Landsat-8», «Landsat-9» и квадрат размером 9 × 9 пк для изображений «Sentinel-2A», «Sentinel-2B», что соответствует в действительности области размером 90 × 90 м (рис. 3).

Извлечение спектральной информации из областей интереса выполнялось в ПК *ENVI* (версия 5.6) инструментом *statistics for all ROIs*. Получены значения КСЯ шести исследуемых пород (сосны, ели, березы, ольхи черной, осины и дуба) за установленный период наблюдений (с февраля по ноябрь) в 2021 и 2022 гг. Эти величины подверглись математико-статистической обработке (анализу нормальности распределения данных (рис. 4, табл. 3), корреляционному анализу (см. рис. 4)).

В ходе статистического анализа спектральных данных (на примере величин КСЯ сосны за вторую декаду июня) был установлен нормальный одномодальный тип распределения, о чем свидетельствуют значения базовых описательных статистик (см. табл. 3), а также проведенные в ПК *Statistica* (версия 10) тесты на нормальность (см. рис. 4) с использованием критерия нормальности Колмогорова – Смирнова ($p > 0,2$), критерия Лиллиефорса и критерия Шапиро – Уилка ($p > 0,05$).

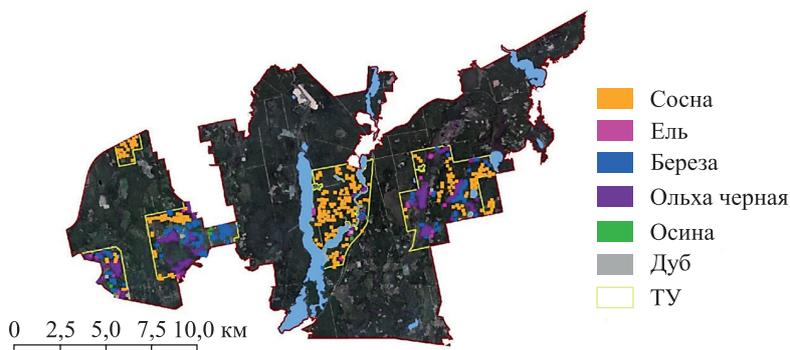


Рис. 3. Области интереса для шести лесобразующих пород республиканского ландшафтного заказника «Озёры»

Fig. 3. Regions of interest for six forest-forming species of the Republican Landscape Reserve «Ozyory»

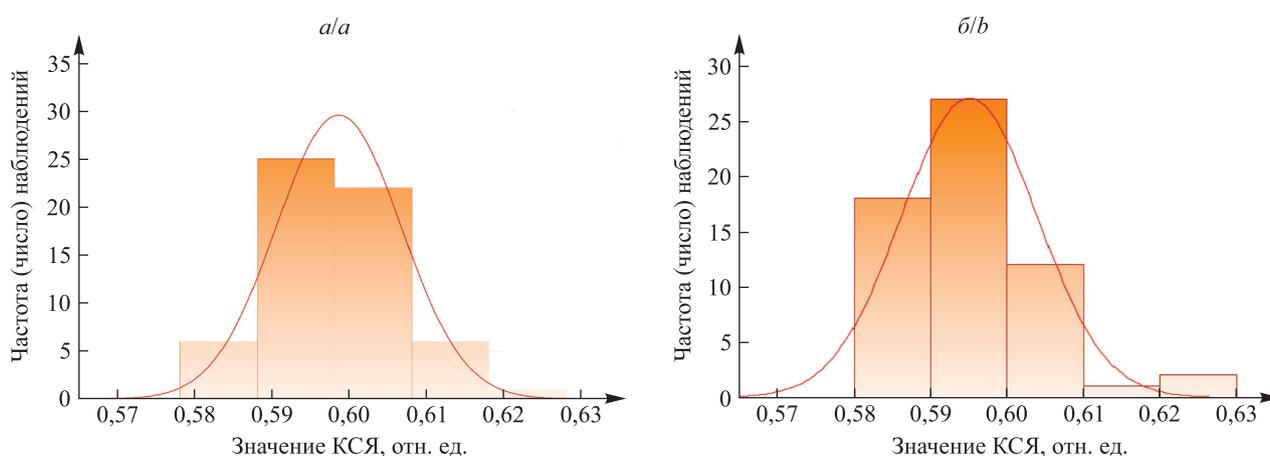


Рис. 4. Гистограмма распределения спектральных данных (значений КСЯ сосны в ИК-диапазоне):

a – данные спутникового снимка «Landsat-8» за 19 июня 2021 г.;
б – данные спутникового снимка «Sentinel-2B» за 18 июня 2021 г.

Fig. 4. Histogram of spectral data distribution (spectral reflectance values of pine in the NIR range):

a – «Landsat-8» satellite image data for 19 June 2021;
b – «Sentinel-2B» satellite image data for 18 June 2021

Таблица 3

**Результаты анализа распределения данных
на примере средних значений КСЯ сосны в ИК-диапазоне
за вторую декаду июня**

Table 3

**The results of the data distribution analysis
on the example of the average reflectance values of pine in the NIR range
for the second decade of June**

Показатели	Спутниковый снимок «Landsat-8» (NIR (канал 5)) за 19 июня 2021 г.	Спутниковый снимок «Sentinel-2» (NIR (канал 8)) за 18 июня 2021 г.
Объем выборки	60	60
Среднее арифметическое	0,601	0,595
Среднее геометрическое	0,600	0,595
Среднее гармоническое	0,600	0,594
Медиана	0,599	0,595
Минимум	0,584	0,589

Окончание табл. 3
Ending of the table 3

Показатели	Спутниковый снимок «Landsat-8» (NIR (канал 5)) за 19 июня 2021 г.	Спутниковый снимок «Sentinel-2» (NIR (канал 8)) за 18 июня 2021 г.
Максимум	0,627	0,620
Дисперсия	0,001	0,001
Стандартное отклонение	0,008	0,009
Коэффициент вариации	1,349	1,487
Асимметрия	0,599	0,001
Стандартная ошибка асимметрии	0,309	0,709
Экссесс	1,031	0,309
Стандартная ошибка эксцесса	0,608	0,779

На основе корреляционного анализа (рис. 5) была установлена прямая линейная связь между количественными значениями яркости пикселей лесообразующих пород, извлеченными в фиолетовой ($\lambda = 0,43-0,45$ мкм), синей ($\lambda = 0,45-0,51$ мкм), зеленой ($\lambda = 0,53-0,59$ мкм), красной ($\lambda = 0,64-0,68$ мкм) зонах видимого диапазона, а также в ближней ($\lambda = 0,85-0,88$ мкм) и средней ($\lambda = 1,56-2,29$ мкм) зонах ИК-диапазона спектра по данным спутниковых снимков «Landsat-8» (каналы 1–7) и «Sentinel-2В» (каналы 1–4, 8, 11, 12) за 18–19 июня 2021 г. Величина коэффициента корреляции по Пирсону ($r = 0,929$) указывает на то, что связь наблюдается, она прямая и сильная. Наличие зависимости между значениями яркости, полученными по данным спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» в общих спектральных диапазонах (каналах), доказано⁸.

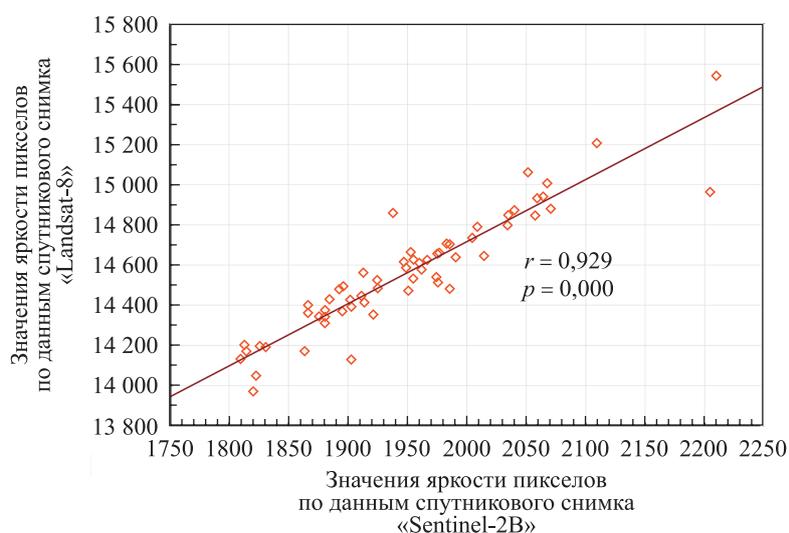


Рис. 5. Установление корреляции между количественными значениями яркости пикселей сосны, полученными по данным спутниковых снимков «Landsat-8» (за 19 июня 2021 г.) и «Sentinel-2В» (за 18 июня 2021 г.) в ИК-диапазоне

Fig. 5. Calculation of the correlation between digital number quantitative values of pine obtained from «Landsat-8» (for 19 June 2021) and «Sentinel-2В» (for 18 June 2021) satellite images data in the NIR range

Спектральная отражательная способность – одна из главных характеристик, непосредственно проявляющихся на данных ДЗЗ. Она выступает физической основой дешифрирования объектов⁹. Анализ спектральной отражательной способности лесной растительности на основе значений КСЯ показал, что этот параметр может быть использован в качестве надежного спектрального дешифровочного признака при дешифрировании типов леса (хвойного, лиственного) и породного состава насаждений. Отмечается высокая разделяемость хвойных и лиственных пород, однако в разрезе групп пород уровень разделяемости

⁸Аладьев В. З., Харитонов В. Н. Курс общей теории статистики. Palo Alto : Fultus Corp., 2006. 256 с.

⁹Чертко Н. К., Карпиченко А. А. Математические методы в географии : учеб.-метод. пособие. Минск : БГУ, 2009. 199 с. ; Топаз А. А. Методы дистанционных исследований... 127 с.

ниже (рис. 6). Оптимальными сроками дешифрирования лиственных пород являются летний, осенний периоды, для дешифрирования хвойных пород подходит также весенний период.

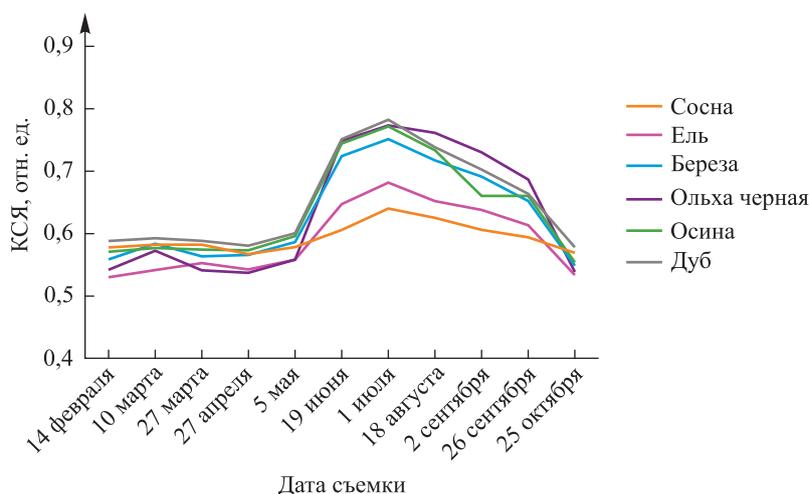


Рис. 6. Сезонные изменения в спектральной отражательной способности лесообразующих пород по данным спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» (NIR (канал 5)) за 2021 г.

Fig. 6. Seasonal changes in the spectral brightness of forest-forming species based on «Landsat-8», «Landsat-9» satellite images data (NIR (band 5)) for 2021

При компьютерной обработке данных ДЗЗ особое значение имеют методы автоматизированного дешифрирования, в частности так называемая классификация изображения. Исходя из опыта проведения классификаций по спутниковым изображениям относительно высокого пространственного разрешения, для автоматизированного дешифрирования лесной растительности территории республиканского ландшафтного заказника «Озёры» был выбран алгоритм классификации с обучением по методу максимального правдоподобия. Он предполагает, что статистические данные для каждого класса подчиняются закону нормального распределения, а плотность вероятности принадлежности пиксела к определенному классу вычисляется с использованием теоремы Байеса в качестве решающего правила классификации [11].

Автоматизированное дешифрирование территории республиканского ландшафтного заказника «Озёры» выполнялось по актуальным (2022) и разновременным (2013–2022) снимкам «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» в направлении дешифрирования породного состава лесонасаждений (сосны, ели, березы, ольхи черной), обнаружения изменений лесного покрова. Для проведения классификации по снимкам за 2022 г. был определен набор тематических классов, включающий водные поверхности (класс 1), почвенный покров (класс 2), травяной покров (класс 3), лесной покров, в том числе сосну (класс 4), ель (класс 5), березу (класс 6), ольху черную (класс 7). Оценка точности результатов дешифрирования породного состава лесонасаждений, травяного, почвенного покровов и водных поверхностей по данным ДЗЗ за 2022 г. (табл. 4 и 5) выполнена в ГИС ArcGIS (ArcMap (версия 10.7)) на основе 250 произвольно расположенных точек (группы инструментов сегментация и классификация) с использованием информации о лесоустройстве на территории заказника (картосхем лесонасаждений Гродненского и Скидельского лесхозов (1 : 100 000), планов лесонасаждений лесничеств (1 : 25 000), содержащих сведения о лесоустройстве за 2015, 2018 и 2021 гг.).

Автоматизированное обнаружение изменений на основе сопоставления результатов классификации по двум разновременным снимкам выполнялось в ПК ENVI (версия 5.6) с помощью набора инструментов change detection¹⁰ в несколько этапов: на первом этапе осуществлялась классификация изображения (по снимку за начальную дату, по снимку за конечную дату), на втором этапе – оценка точности результатов классификации, на третьем этапе – постклассификационная обработка, на четвертом этапе реализовывалось обнаружение изменений путем сравнения результатов классификации. Обнаружение изменений лесного покрова территории заказника проводилось за 9-летний (по данным изображения «Landsat-8» за 2013–2022 гг.) и 4-летний (по данным изображения «Sentinel-2» за 2018–2022 гг.) периоды. Отсутствие снимков «Sentinel-2» с уровнем обработки L2A ранее 2018 г. обусловило меньший интервал наблюдений. Результаты представлены в табл. 6.

¹⁰ENVI [Electronic resource] // NV5 geospatial solutions. URL: <https://www.nv5geospatialsoftware.com/Products/ENVI> (date of access: 10.08.2023).

Таблица 4

Оценка точности классификации спутникового снимка «Landsat-8» за 2022 г.

Table 4

Accuracy assessment for «Landsat-8» satellite image classification for 2022

Показатели	Показатели									
	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5	Класс 6	Класс 7	Суммарное значение	Пользовательская точность	κ-Коэффициент Коэна
Класс 1	10	0	0	0	0	0	0	10	1,000	0
Класс 2	0	10	0	0	0	0	0	10	1,000	0
Класс 3	0	0	15	0	0	0	0	15	1,000	0
Класс 4	0	0	5	111	1	0	0	117	0,948	0
Класс 5	0	0	0	14	24	2	0	40	0,600	0
Класс 6	0	0	0	3	2	27	4	36	0,750	0
Класс 7	0	0	2	0	0	3	17	22	0,772	0
Суммарное значение	10	10	22	128	27	32	21	250	0	0
Производственная точность	1,000	1,000	0,682	0,867	0,889	0,844	0,809	0	0,856	0
κ-Коэффициент Коэна	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,797

Таблица 5

Оценка точности классификации спутникового снимка «Sentinel-2B» за 2022 г.

Table 5

Accuracy assessment for «Sentinel-2B» satellite image classification for 2022

Показатели	Показатели									
	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5	Класс 6	Класс 7	Суммарное значение	Пользовательская точность	κ-Коэффициент Коэна
Класс 1	9	0	0	0	0	0	0	9	1,000	0
Класс 2	0	9	0	1	0	0	0	10	0,900	0
Класс 3	0	0	11	0	0	0	1	12	0,917	0
Класс 4	0	0	0	125	1	0	0	126	0,992	0
Класс 5	0	0	0	13	22	2	0	37	0,594	0
Класс 6	0	0	1	0	0	26	3	30	0,866	0
Класс 7	0	0	0	0	0	3	23	26	0,884	0
Суммарное значение	9	9	12	139	23	31	27	250	0	0
Производственная точность	1,000	1,000	0,917	0,899	0,956	0,839	0,850	0	0,900	0
κ-Коэффициент Коэна	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,851

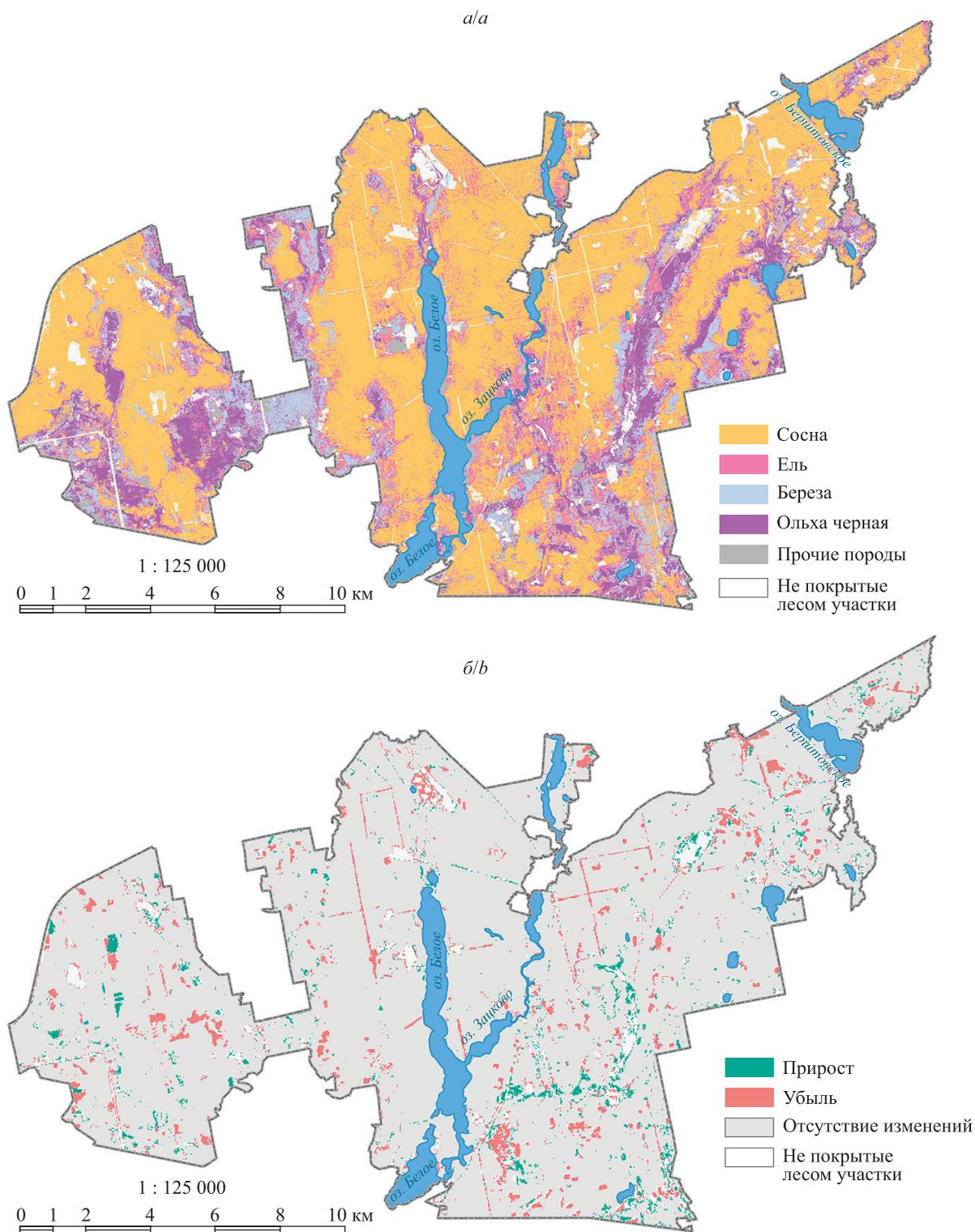


Рис. 7. Карты лесной растительности республиканского ландшафтного заказника «Озёры»:
а – карта породного состава лесонасаждений
(по данным спутникового снимка «Sentinel-2» за 2022 г.);
б – карта изменений в состоянии лесного покрова
(по данным спутникового снимка «Landsat-8» за 2013–2022 гг.)

Fig. 7. Maps of the forest vegetation of Republican Landscape Reserve «Ozyory»:
a – map of the species composition of forests
(based on «Sentinel-2» satellite image data for 2022);
b – map of the forest cover changes
(based on «Landsat-8» satellite image data for 2013–2022)

Таблица 6

Расчет количественных изменений лесного покрова территории республиканского ландшафтного заказника «Озёры» по данным спутниковых снимков «Sentinel-2» (за 4 года) и «Landsat-8» (за 9 лет)

Table 6

Calculation of quantitative changes in the forest cover of the territory of the Republican Landscape Reserve «Ozyory» based on «Sentinel-2» (for 4 years) and «Landsat-8» (for 9 years) satellite images data

Период	Класс	Количество пикселей	Лесной покров	
			Доля, %	Площадь, га
4 года	Прирост	116 153	1,11	150,53
	Отсутствие изменений	5 105 692	96,69	13 232,41
	Убыль	58 728	2,20	301,08
9 лет	Прирост	7 135	1,21	165,59
	Отсутствие изменений	565 245	96,19	13 137,98
	Убыль	15 284	2,60	355,82

На основе результатов автоматизированного дешифрирования безоблачных спутниковых снимков «Landsat-8» (за 18 августа 2022 г.) и «Sentinel-2B» (за 12 августа 2022 г.) составлены 12 карт лесной растительности республиканского ландшафтного заказника «Озёры» в масштабе 1 : 125 000, а именно 6 карт распространения хвойных и лиственных пород, 2 карты породного состава лесонасаждений заказника, 2 карты динамики распространения хвойных и лиственных пород (с 2013 по 2022 г.), а также 2 карты обнаружения изменений в состоянии лесного покрова за 9 лет (по данным изображения «Landsat-8») и 6 лет (по данным изображения «Sentinel-2»). На рис. 7 представлен оформленный результат тематической обработки данных ДЗЗ – карта породного состава лесонасаждений (по данным снимка «Sentinel-2» за 2022 г.) и карта изменений в состоянии лесного покрова (по данным снимка «Landsat-8» за 2013–2022 гг.).

Составление и оформление карт выполнено в плавающей компоновке. Для картографического изображения элементов тематического содержания карт (распространения лесной растительности, изменений в пространственном размещении лесов) выбран способ ареалов. Масштаб приведенных на рис. 7 карт изменен (уменьшен).

Результаты и их обсуждение

Анализ значений КСЯ шести лесообразующих пород республиканского ландшафтного заказника «Озёры» на основе данных спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» позволил сделать ряд заключений об особенностях их спектрально-отражательных свойств.

1. Отмечается закономерный ход спектральных кривых для хвойных и лиственных пород: фиксируются низкие величины КСЯ в фиолетовой и синей зонах видимого спектра, максимальные величины в зеленой зоне и минимальные величины в красной зоне, наблюдаются резкий рост значений КСЯ с общим максимумом в ближней зоне ИК-диапазона и их понижение в средней зоне.

2. Отчетливо прослеживаются различия между хвойными и лиственными породами: хвойные породы характеризуются более низкими величинами КСЯ. В зоне «красного края» ($\lambda = 0,69-0,79$ мкм) усиливаются различия в значениях КСЯ для лиственных и хвойных пород, достигая пика в ближней зоне ИК-диапазона (увеличение интервала показателей до 0,1 отн. ед.). Каналы 5–7 и 8А (снимок «Sentinel-2») позволяют установить различия внутри лиственных пород: во второй декаде июня спектральные кривые для березы, ольхи черной, осины находятся ниже, чем спектральные кривые для дуба.

3. Имеются сезонные изменения в ходе кривых спектральной яркости пород. Наименьшие значения КСЯ хвойных пород наблюдаются в зимний (февраль), весенний и осенний (сентябрь, октябрь) периоды, наибольшие – в летний период с максимумом в июне и июле. В конце лета и начале осени отмечается заметное снижение спектральной яркости (величины КСЯ в конце сентября и октябре сопоставимы с показателями весеннего периода). Самые низкие значения КСЯ для лиственных пород также регистрируются в зимний, весенний и осенний периоды. Спектральные кривые за март и май

характеризуются слабой выраженностью максимума в зеленой зоне и минимума в красной зоне. В июне и июле фиксируются максимальные значения КСЯ листвы, которые постепенно снижаются в августе. В феврале – апреле и ноябре спектральная яркость лиственных пород ниже, чем спектральная яркость хвойных пород (отсутствие активной фотосинтезирующей лиственной массы). Стоит отметить более выраженное разделение спектральных кривых в ближней зоне ИК-диапазона в сравнении с хвойными породами, что объясняется высокой динамичностью изменений в структуре и внешней окраске листвы, протекающих на протяжении всего вегетационного периода растений. Для березы характерны самые низкие значения КСЯ среди лиственных пород в течение большей части вегетационного периода. Для ольхи черной максимальные значения КСЯ отмечаются в конце июля – начале сентября. Спектральная кривая осины занимает промежуточное положение, а пик яркости для листвы дуба наблюдается в июне и июле.

4. На основе сопоставления значений КСЯ шести лесобразующих пород за исследуемый период установлено, что высокий уровень достоверности распознавания лесных пород фиксируется при наиболее типичном ходе кривых спектральной яркости, т. е. в летний период (июнь, июль), а также в начале осени. Для хвойных пород уровень делимости выше, чем для лиственных пород, они дешифрируются увереннее на фоне лиственных пород и в остальные сезоны. При дешифрировании лиственных пород необходимо брать во внимание также осенние снимки, поскольку морфологические изменения листвы различных пород наступают в разное время, что может быть использовано в качестве индикатора при определении той или иной породы. Весенние снимки могут применяться при дешифрировании хвойных пород, выгодно выделяющихся в сравнении с лиственными породами в данное время года.

Оценка точности результатов автоматизированного дешифрирования (см. табл. 4 и 5) показала следующее: для данных спутникового снимка «Landsat-8» общая точность классификации составляет 85,6 %, к-коэффициент Коэна – 0,797, максимальные значения производственной и пользовательской точности характерны для водных поверхностей, травяного и почвенного покровов, а также для хвойных лесобразующих пород (свыше 85 %). Для данных спутникового снимка «Sentinel-2» общая точность классификации равняется 90,0 %, к-коэффициент Коэна – 0,851, максимумы производственной и пользовательской точности свойственны водным поверхностям, травяному и почвенному покровам, а среди лесобразующих пород они типичны для сосны (свыше 85 %, за исключением ели).

По результатам автоматизированного обнаружения изменений за 9 лет и 4 года (см. табл. 6) отмечается общее сокращение площади лесопокрываемых земель заказника на 2,2 % за 2018–2022 гг. и на 2,6 % за 2013–2022 гг. Данный факт связан с проведением санитарных рубок (сведением участков, пораженных насекомыми-вредителями, болезнями, рубками ухода за лесом (осветлением, прочисткой, прореживанием, проходными рубками), реконструкции, обновления, формирования (переформирования) насаждений). Регистрируется увеличение площади лесопокрываемых земель на отдельных участках (на 1,11 % за 2018–2022 гг., на 1,21 % за 2013–2022 гг.), сопряженное с зарастанием рубок, распространением древесно-кустарниковой растительности за границы лесопокрываемых земель и проведением лесовосстановительных работ (в западной и северной частях заказника). В целом состояние лесного покрова территории оценивается как устойчивое (за 9 лет площадь лесопокрываемых земель сократилась менее чем на 3 %).

Заключение

Применение мультиспектральных данных ДЗЗ (спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2») в сочетании с комплексным подходом к их цифровой обработке и математико-статистическому анализу позволяет выполнять картографирование лесной растительности Беларуси на среднемасштабном уровне. С использованием методов предварительной и тематической обработки данных ДЗЗ установлены основные дешифровочные признаки шести наиболее распространенных на территории Беларуси лесобразующих пород, произведен анализ значений КСЯ, выполнено автоматизированное дешифрирование лесной растительности (определены типы леса и породного состава насаждений, обнаружены изменения лесного покрова), по результатам которого составлены 12 карт лесной растительности, отражающих актуальное состояние и динамику лесного покрова республиканского ландшафтного заказника «Озёры».

Наличие в свободном доступе актуальных и архивных спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» территории Беларуси дает возможность картографировать типы растительности, типы леса, породный состав лесонасаждений, нарушения лесного покрова, а также ретроспективно картографировать леса (составлять карты прошлых лет, динамики, обнаружения изменений). Регулярность

спутниковых съемок, достаточно высокое временное, пространственное и спектральное разрешение данных, значительный территориальный охват обеспечивают выполнение среднемасштабного лесного картографирования без финансовых и временных затрат на проведение аэросъемок или полевых обследований.

Библиографические ссылки

1. Груммо ДГ, Зеленкевич НА, Цвирко РВ. Инвентаризация и оценка современного состояния биологического разнообразия Национального парка «Беловежская пушча» с помощью дистанционных и геоинформационных методов. В: Кольмакова ЕГ, редактор. *Современные направления развития физической географии: научные и образовательные аспекты в целях устойчивого развития. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 65-летию Белорусского географического общества; 13–15 ноября 2019 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2019. с. 353–356.
2. Толкач ИВ, Саевич ФК. Спектральные и яркостные характеристики основных лесообразующих пород на снимках сканера Leica ADS100. *Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство*. 2016;1:24–27. EDN: WHDMBT.
3. Денисова АЮ, Кавеленова ЛМ, Корчиков ЕС, Прохорова НБ, Терентьева ДА, Федосеев БА. Пространственная классификация преобладающих древесных пород на территории Самарской области по данным Sentinel-2 и таксации леса. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019;16(4):86–101. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-86-101.
4. Жарко ВО, Барталев СА. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014;11(3):159–170. EDN: THXYBP.
5. Курбанов ЭА, Воробьев ОН, Меньшиков ЛН, Смирнова ЛН. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018;15(5):154–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166.
6. Шихов АН, Семакина АВ. Картографирование растительного покрова Пермского края по спутниковым снимкам Landsat. *Географический вестник*. 2022;1:150–164. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-1-150-164.
7. Person M, Lindberg E, Reese H. Tree species classification with multi-temporal Sentinel-2 data. *Remote Sensing*. 2018;10(11):1794. DOI: 10.3390/rs10111794.
8. Grabska E, Hostert P, Pflugmacher D, Ostapowicz K. Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*. 2019;11(10):1197. DOI: 10.3390/rs11101197.
9. Pravalie R, Sirodov I, Nita IA, Patriche C, Dumitrascu M, Rosca B, et al. NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018. *Ecological Indicators*. 2022;136:108629. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108629.
10. Mengyu Wang, Yi Zheng, Chengquan Huang, Ran Meng, Yong Pang, Wen Jia, et al. Assessing Landsat-8 and Sentinel-2 spectral-temporal features for mapping tree species of northern plantation forests in Heilongjiang Province, China. *Forest Ecosystem*. 2022;9(3):100032. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100032.
11. Зраенко СМ, Емельянов АЮ. Алгоритмы классификации изображений в пакете прикладных программ ENVI. В: Цветков АВ, редактор. *Новые образовательные технологии в вузе. Материалы Шестой Международной научно-практической конференции. Часть 2; 2–5 февраля 2009 г.; Екатеринбург, Россия*. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; 2009. с. 131–134.

References

1. Grummo DG, Zeliankevich NA, Tsvirko RV. Inventory and evaluation of the modern condition of the biological diversity of the National Park «Belovezhskaya Pushcha» using remote and geoinformational methods. In: Kol'makova EG, editor. *Sovremennyye napravleniya razvitiya fizicheskoi geografii: nauchnye i obrazovatel'nye aspekty v tselyakh ustoychivogo razvitiya. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 85-letiyu fakul'teta geografii i geoinformatiki Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta i 65-letiyu Belorusskogo geograficheskogo obshchestva; 13–15 noyabrya 2019 g.; Minsk, Belarus* [Modern directions of development of physical geography: scientific and educational aspects for sustainable development. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University and the 65th anniversary of the Belarusian Geographical Society; 2019 November 13–15; Minsk, Belarus]. Minsk: Belarusian State University; 2019. p. 353–356. Russian.
2. Tolkach IV, Sayevich FK. Spectral and brightness characteristics of the main forest-forming species on images of the scanner Leica ADS100. *Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry*. 2016;1:24–27. Russian. EDN: WHDMBT.
3. Denisova AYU, Kavelenova LM, Korchikov ES, Prokhorova NB, Terentyeva DA, Fedoseev BA. Tree species classification in Samara Region using Sentinel-2 remote sensing images and forest inventory data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019;16(4):86–101. Russian. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-86-101.
4. Zharko VO, Bartalev SA. Forest tree species recognizability assessment based on satellite data on their spectral reflectance seasonal changes. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014;11(3):159–170. Russian. EDN: THXYBP.
5. Kurbanov EA, Vorobiev ON, Menshikov LN, Smirnova LN. Identification of forest stands and dominant tree species in Penza Region using Sentinel-2 imagery. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018;15(5):154–166. Russian. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166.
6. Shikhov AN, Semakina AV. Mapping of the vegetation cover of the Perm Region based on Landsat satellite images. *Geographical Bulletin*. 2022;1:150–164. Russian. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-1-150-164.

7. Person M, Lindberg E, Reese H. Tree species classification with multi-temporal Sentinel-2 data. *Remote Sensing*. 2018;10(11):1794. DOI: 10.3390/rs10111794.
8. Grabska E, Hostert P, Pflugmacher D, Ostapowicz K. Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*. 2019;11(10):1197. DOI: 10.3390/rs11101197.
9. Pravalie R, Sirodov I, Nita IA, Patriche C, Dumitrascu M, Rosca B, et al. NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018. *Ecological Indicators*. 2022;136:108629. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108629.
10. Mengyu Wang, Yi Zheng, Chengquan Huang, Ran Meng, Yong Pang, Wen Jia, et al. Assessing Landsat-8 and Sentinel-2 spectral-temporal features for mapping tree species of northern plantation forests in Heilongjiang Province, China. *Forest Ecosystem*. 2022;9(3):100032. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100032.
11. Zraenko SM, Emel'yanov AYu. [Image classification algorithms in the *ENVI* package]. In: Tsvetkov AV, editor. *Novye obrazovatel'nye tekhnologii v vuze. Materialy Shestoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Chast' 2; 2–5 fevralya 2009 g.; Ekaterinburg, Rossiya* [New educational technologies at the university. Proceedings of the Sixth International scientific and practical conference. Part 2; 2009 February 2–5; Yekaterinburg, Russia]. Yekaterinburg: Ural State Technical University – UPI named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; 2009. p. 131–134. Russian.

Получена 15.12.2023 / исправлена 13.02.2024 / принята 29.02.2024.
Received 15.12.2023 / revised 13.02.2024 / accepted 29.02.2024.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ТИПОЛОГИЯ АКВАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ
ОЗЕР НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «НАРОЧАНСКИЙ»Б. П. ВЛАСОВ¹⁾, Н. В. КОВАЛЬЧИК¹⁾, Н. Ю. СУХОВИЛО¹⁾¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Проведены геохимическая типология и картографирование аквальных ландшафтов озер Национального парка «Нарочанский». В пределах аквальных систем озер Нарочь, Глубля, Глубелька выделены элементарные геохимические аквальные ландшафты, приуроченные к однородным участкам подводного рельефа с соответствующим типом донных осадков и растительных сообществ, распределением типоморфных химических элементов в водах и илах. При их отборе учитывались подходы А. И. Перельмана, Н. С. Касимова, А. Д. Хованского, а также О. Ф. Якушко к классификации аквальных ландшафтов малых озер Беларуси. Исследуемые водоемы различаются по генезису котловин, морфометрическим показателям, структуре водосборов. При этом оз. Нарочь входит в Нарочанскую группу озер, а озера Глубля и Глубелька являются частью Болдукской группы озер. В составе их донных осадков представлены пески завалуненные и заиленные, илы опесчаненные и глинистые карбонатные, глины, сапропели карбонатные, кремнеземистые и смешанные. Строение дна озерных котловин, определяющее механическую миграцию веществ, позволяет выделить абразионно-аккумулятивные, трансаккумулятивные и аккумулятивные позиции. На литорали и сублиторали развита высшая водная растительность гелофитной, гелогидрофитной и гидрорфитной формаций. Воды озер в основном хорошо насыщены кислородом. Указанные характеристики создают в пределах этих ландшафтов специфические условия миграции и концентрации химических элементов. Результатом типологии стало выделение 40 видов элементарных геохимических ландшафтов оз. Нарочь, 8 видов элементарных геохимических ландшафтов оз. Глубля и 15 видов элементарных геохимических ландшафтов оз. Глубелька. Элементарные геохимические ландшафты оз. Нарочь отнесены к кислородно-гидрокарбонатно-кальциевому классу, в аквальной системе оз. Глубля имеется еще кислородно-гидрокарбонатно-кальциево-глеевый класс элементарных геохимических ландшафтов, а в оз. Глубелька представлены кислородно-гидрокарбонатно-кальциевый и кислородно-гидрокарбонатно-кальциево-сероводородный классы элементарных геохимических ландшафтов. Составленные картосхемы могут быть использованы для создания комплексной картографической основы при определении антропогенной нагрузки на водоемы, прогнозировании изменений состояния и уязвимости аквальных систем.

Ключевые слова: элементарные геохимические аквальные ландшафты; Национальный парк «Нарочанский»; озерная система; типоморфные элементы; подводный рельеф; высшая водная растительность.

Образец цитирования:

Власов БП, Ковальчик НВ, Суховило НЮ. Геохимическая типология аквальных ландшафтов озер Национального парка «Нарочанский». *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;1:113–125.
EDN: XNHIMY

For citation:

Vlasov BP, Kavalchik NV, Sukhovilo NYu. Geochemical typology of aquatic landscapes of lakes in the Narochansky National Park. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;1:113–125. Russian.
EDN: XNHIMY

Авторы:

Борис Павлович Власов – доктор географических наук, профессор; главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории озераведения факультета географии и геоинформатики.

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

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

Authors:

Boris P. Vlasov, doctor of science (geography), full professor; chief researcher at the laboratory of lakes research, faculty of geography and geoinformatics.

vlasov@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0001-9755-2845>

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

<https://orcid.org/0000-0002-7136-8078>

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

sukhovilony@bsu.by

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

GEOCHEMICAL TYPOLOGY OF AQUATIC LANDSCAPES OF LAKES IN THE NAROCHANSKY NATIONAL PARK

B. P. VLASOV^a, N. V. KAVALCHYK^a, N. Yu. SUKHOVILO^a

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

Corresponding author: N. V. Kavalchyk (kovalchiknv@gmail.com)

Abstract. Geochemical typology and mapping of aquatic landscapes of the Narochansky National Park have been completed. Within the aquatic systems of lakes Naroch, Glublya, Glubelka, elementary geochemical landscapes confined to homogeneous areas of underwater relief with the corresponding type of bottom sediments and plant communities, the distribution of typomorphic chemical elements in waters and silts are identified. On the base of the approaches of A. I. Perelman, N. S. Kasimov, A. D. Khovansky and the classification of aquatic landscapes of small Belarusian lakes of O. F. Yakushko we identified elementary aquatic landscapes of different classification levels. The studied lakes differ in the genesis of the basins, morphometric indicators, and the structure of the catchment areas. Lake Naroch is part of the Naroch lake group, lakes Glublya and Glubelka are part of the Bolduk lake group. The bottom sediments of lakes include sands, bouldered and silted ones, sandy and clayey carbonate silts, clays, carbonate sapropels, siliceous and mixed ones. The structure of the bottom of lake basins determines the mechanical migration of substances. It allows us to distinguish abrasion-accumulative, transaccumulative and accumulative positions. In the littoral and sublittoral zones, higher aquatic vegetation of helophytic, helo-hydrophytic and hydrophytic formations is developed. The waters of the lakes are generally well saturated with oxygen. They are characterised by a hydrocarbonate-calcium composition. These characteristics create specific conditions for the migration and concentration of chemical elements. The result of typing was the identification of 40 types of elementary aquatic landscapes of Lake Naroch, 8 types of elementary aquatic landscapes of Lake Glublya and 15 types of elementary aquatic landscapes of Lake Glubelka. Elementary geochemical landscapes of Lake Naroch are classified as oxygen-hydrocarbonate-calcium class, in the aquatic system of Lake Glubelka, in addition to this class, the oxygen-hydrocarbonate-calcium-gley class of elementary geochemical landscapes is also distinguished, and in Lake Glubelka the oxygen-hydrocarbonate-calcium and oxygen-hydrocarbonate-calcium-sulphurous classes of elementary geochemical landscapes are represented. The compiled maps can be used to create a comprehensive cartographic basis for determining the anthropogenic load on water bodies, predicting changes in the ecological state and vulnerability of aquatic systems.

Keywords: elementary geochemical aquatic landscapes; Narochansky National Park; lake system; typomorphic elements; underwater relief; higher aquatic vegetation.

Введение

Особенности положения озер в составе каскадных геохимических систем водосбор – озеро влияют на формирование в них специфических условий. Поскольку озерные котловины занимают самые гипсометрически низкие позиции на водосборах, они выступают аккумуляторами взвешенных и растворенных веществ, а также системообразующих энергетических и информационных потоков.

Аквальные ландшафты представляют собой сложные природные образования, которые являются, с одной стороны, результатом взаимодействия всех компонентов лимнических систем, а с другой стороны, средой протекания геохимических процессов. Поэтому их изучение позволяет лучше понять локальные особенности связи озер с их водосборами и создать картографическую основу для разработки схем рационального использования ресурсов и охраны уникальных природных комплексов.

Цель работы – проведение геохимической типологии аквальных ландшафтов ряда озер Национального парка «Нарочанский».

Определения, объекты и методы исследования

Для исследования геохимических процессов в озерных природно-территориальных комплексах немаловажное значение имеет выявление пространственной иерархии элементарных аквальных ландшафтов. Аквальные ландшафты представляют собой сложные динамические системы, которые аккумулируют твердые и растворенные вещества, выносимые из расположенных гипсометрически выше автономных, транзитных и супераквальных ландшафтов. Они включают водную массу, живое вещество, донные илы и занимают различные формы подводного рельефа¹. С позиций геосистемного подхода аквальные ландшафты малых озер – конечные звенья катен, принимающие миграционные потоки вещества и энергии с водосборов. В связи с этим считается, что по состоянию аквальных ландшафтов можно оценивать

¹Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта : учеб. пособие. М. : Астрель-2000, 1999. 768 с.

интенсивность природных процессов и степень антропогенной преобразованности как озер, так и их водосборных территорий.

При изучении наземных и водных природно-территориальных комплексов как сопряженных звеньев ландшафтно-геохимических систем применяется классификация элементарных геохимических ландшафтов, разработанная Б. Б. Полюновым и углубленная М. А. Глазовской, А. И. Перельманом и их последователями² [1–4]. Геохимическая систематика водных объектов имеет свои отличия. При выделении элементарных аквальных ландшафтов учитываются особенности биогенной миграции, которые во многом зависят от видового состава, биомассы и продуктивности растительных сообществ, окислительно-восстановительных условий миграции химических соединений в водах и донных осадках, распределения типоморфных элементов в илах и водах, подводного рельефа и гидродинамического режима, определяющего механическую миграцию веществ и тип донных отложений. Закономерное сочетание данных характеристик позволяет рассматривать отдельные участки акваторий как элементарные ландшафты с одинаковыми растительными сообществами, расположенные на однородных позициях подводного рельефа, в пределах которых формируется конкретный тип донных отложений [3]. В водоемах сложного строения элементарные ландшафты последовательно сменяют друг друга в направлении от прибрежной части водоема к его внутренним частям³. При этом их геохимическая специфика вызвана комплексом процессов превращения вещества и энергии. По мнению Л. Л. Россолимо, особенность озер – водоемов замедленного водообмена – состоит в положительном балансе вещества и энергии и их накопление можно считать основным признаком своеобразия озер как звеньев в системе стока и как элементов ландшафта [5].

Аквальные ландшафты на верхнем классификационном (порядковом) уровне по динамическому критерию делятся на водотоки, водоемы и прибрежные области морей⁴. Типы и семейства элементарных ландшафтов водоемов разграничиваются в зависимости от характера биогенной миграции, термического режима и содержания растворенного органического вещества. Так, при дифференциации аквальных систем озер с точки зрения видового состава растительных сообществ различаются ландшафты планктонных водорослей (низко-, средне- и высокопродуктивные) и ландшафты высшей водной растительности (ВВР).

Классы аквальных ландшафтов определяются физико-химическим состоянием вод и илов по показателям окислительно-восстановительных условий миграции элементов в водах и донных осадках с учетом их вертикальной зональности [2]. Формирование таких условий связано с особенностями образования и разложения органического вещества разных растительных сообществ. От типоморфных химических элементов вод и илов зависит протекание процессов обмена веществом между водой и донными осадками. Окислительная обстановка в насыщенной кислородом водной толще преобладает в ландшафтах водоемов. При этом кислородная зона приповерхностных слоев может сменяться глеевой или сероводородной зоной в придонных водах или илах. Вертикальные границы геохимических обстановок проходят как в водной толще, так и в донных илах. По сочетанию окислительно-восстановительных условий в вертикальном профиле аквального ландшафта А. Д. Хованский выделил кислородный, глеевый, сероводородный классы и ряд промежуточных классов с учетом минерализации и химического состава вод, радиального распределения типоморфных элементов в водах и илах (например, кислородно-гидрокарбонатно-кальциево-глеевый класс).

На уровне рода аквальные ландшафты отличаются особенностями механической миграции элементов, определяемой размывом, переносом и отложением литогенного материала. В зависимости от соотношения седиментационно-геоморфологических признаков существуют следующие роды ландшафтов: трансерозивные ландшафты – участки интенсивного размыва берегов и поступления большого количества материалов преимущественно в минеральной форме; трансаккумулятивные ландшафты – участки с преобладанием процессов отложения механически переносимого материала; абразионно-аккумулятивные ландшафты – участки вдоль высоких крутых берегов, размыв которых вызывает поступление в водоем значительного количества элементов в минеральной форме; нейтральные ландшафты – участки у пологих берегов со слабой абразией, приводящей в основном к нивелированию поверхности дна; аквально-супераквальные ландшафты – участки, периодически затопляемые во время поднятия уровня вод в водоеме; аккумулятивные ландшафты – глубоководные участки водоема, где происходит отложение материала⁵ [2].

²Глазовская М. А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов : учеб. пособие. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1964. 230 с. ; Тихомиров О. А. Формирование, динамика и экологическое состояние аквальных комплексов равнинных водохранилищ : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.23. Тверь, 2011. 45 с.

³Глазовская М. А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов... 230 с.

⁴Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта... 768 с.

⁵Там же.

Главными факторами разделения аквальных ландшафтов на уровне вида являются гранулометрический состав донных осадков и содержание органического вещества, которые отражают условия механической миграции материала и сорбционную емкость донных отложений. В составе донных осадков малых озер Беларуси представлены пески, илы опесчаненные, глинистые, глины, сапропели смешанные, карбонатные, кремнеземистые [6].

Указанные характеристики создают в пределах элементарных аквальных ландшафтов специфические условия миграции и концентрации химических элементов.

Анализируемые водоемы располагаются на территории Национального парка «Нарочанский» (рис. 1) и, как все озера Беларуси, относятся к малым⁶. Следует отметить, что оз. Нарочь входит в Нарочанскую группу озер, озера Глубля и Глубелька являются частью Болдукской группы озер. Их выбор в качестве объектов исследования вызван разнообразием геохимических условий: кроме преобладающей в аквальных системах кислородной зоны, в придонном слое оз. Глубля присутствует глеевая зона, в придонном слое оз. Глубелька – сероводородная зона, в оз. Нарочь данные зоны отсутствуют. Основные морфометрические характеристики водообмена озер приведены в таблице.

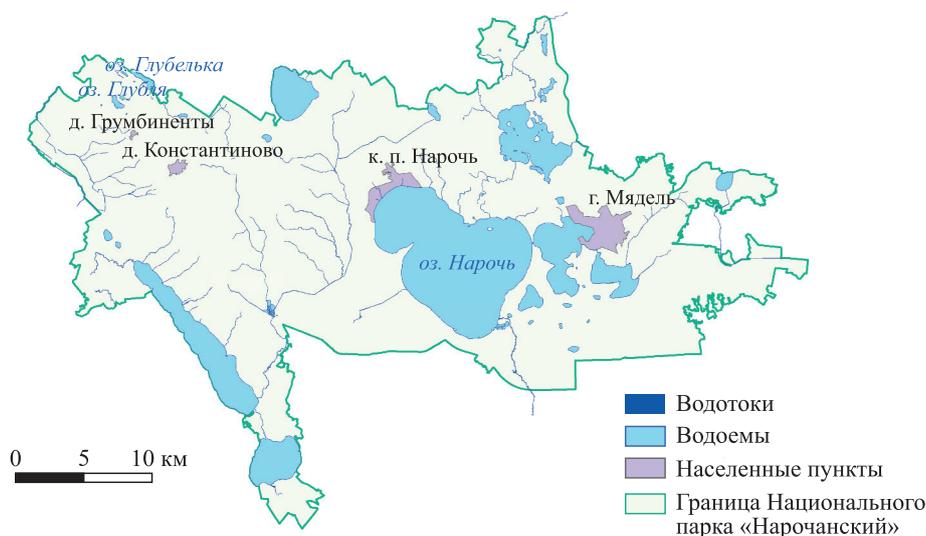


Рис. 1. Географическое положение объектов исследования

Fig. 1. Geographic situation of studied lakes

Морфометрические характеристики водообмена исследуемых озер

Morphometric characteristics of studied lakes

Озеро	Характеристики							
	Площадь, км ²	Объем воды, млн м ³	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Открытость	Глубинность	Площадь водосбора, км ²	Период водообмена, лет
Глубелька	0,09	0,55	17,0	6,10	0,01	203,30	0,40	6,41
Глубля	0,47	5,05	26,80	10,40	0,05	66,40	1,40	16,81
Нарочь	79,62	710,40	24,80	8,90	8,95	0,34	279,0	12,04

Озеро Нарочь. Водоем расположен в Мядельском районе Минской области, в 4 км к западу от г. Мяделя. Вместе с озерами Мястро, Баторино, Бледное он входит в Нарочанскую группу озер. Это озеро является самым большим естественным водоемом в Беларуси.

Котловина оз. Нарочь относится к котловинам подпрудного типа. Вдоль его северных и северо-восточных склонов развиваются типичные абразионные берега высотой до 10 м. Отвесные обрывы и мысы выступают ареной интенсивной разрушительной волновой деятельности. У их подножия скапливаются крупные валуны, вымытые из морены в процессе работы волн. Северо-западные берега водоема аккумулятивные. В его восточной части преобладают невысокие берега, а на северо-западе и западе большие

⁶Якушко О. Ф. Озероведение: география озер Беларуси : учеб. пособие. Минск : Выш. школа, 1981. 223 с.

участки представлены аккумулятивными песчаными берегами. Выступ (коса «Наносы») длиной 1,5 км разделяет оз. Нарочь на два плеса – малый (северо-западный) и большой (юго-восточный).

Ложе озера имеет сложное строение, здесь чередуются холмистые и плоские участки, далеко вытянутые подводные гряды. Почти везде, кроме участков у северного берега, широкую прибрежную полосу занимает литоральная зона с пологонаклонной поверхностью. На северо-западе ее ширина составляет 200 м, а у юго-восточного берега – до 300 м. На севере, у крутых склонов Северо-Нарочанской гряды, литораль узкая, каменистая. Изобата 2 м ограничивает 14,8 % площади водного зеркала⁷.

Пологая мелководная зона с глубинами до 5 м заполняет около 30 % площади водоема. Такая обширная литораль, густо покрытая ВВР, играет важную роль в защите озера от загрязняющих веществ, поступающих с водосбора. Лишь на коротком отрезке вдоль северных берегов, примыкающих к конечно-моренной Северо-Нарочанской гряде, литораль сложена крупными валунами.

При значительном волнении формируются валы и идет вдольбереговое перемещение наносов. Ложбины между валами являются основными трассами перемещения наносов в зоне литорали. Однако роль ложбин и валов меняется в зависимости от интенсивности ветрового волнения. Для условий штиля характерны рифели (небольшие поднятия), при сильном ветре образуются валы высотой до 30 см, их ширина может достигать 15–20 м.

Сублитораль в озере является пологой. Она постепенно переходит в ложе. Наибольшие глубины приурочены к округлым впадинам, и только впадина «Гатовичские ямы» с глубиной 24,8 м создает ложбину, вытянутую вдоль косы, которая разделяет озера Нарочь и Мястро. На глубины свыше 10 и 20 м приходится 41,5 и 1,8 % площади водоема соответственно.

В гидрологическом отношении оз. Нарочь относится к числу слабопроточных водоемов. Вода поступает в него из оз. Мястро через короткую протоку Скему. Кроме того, оно принимает воды 17 ручьев (расположенных вблизи деревень Проньки, Антонисберг, Урлики, Симоны и др.) преимущественно со стороны высоких склонов. Сток из озера идет по р. Нарочи, которая, вытекая на юго-востоке, впадает в р. Вилию – правый приток р. Неман. Малая величина удельного водосбора отражается на характере водного баланса. В средние по водности годы более 35 % приходной части составляет поверхностный сток, около 65 % озеро получает за счет атмосферных осадков, выпадающих на водное зеркало. Доля подземного притока незначительна. В расходной части водного баланса преобладают сток по р. Нарочи (56 %) и испарение с водной поверхности.

Интенсивное ветровое перемешивание не способствует температурному расслоению водной массы. В обычную погоду мощность эпилимниона достигает 15–18 м. При этом основная часть водной массы отличается высоким кислородным насыщением и комплексом окислительных условий. По химическому составу вод оз. Нарочь классифицируется как водоем гидрокарбонатного класса кальциевой группы.

Обширные мелководья, значительная прозрачность и благоприятные физико-химические характеристики содействуют развитию ВВР. В озере зарегистрированы 45 видов водных и околводных сосудистых растений и 9 видов харовых водорослей и мхов. Площадь зарастания макрофитами составляет 27,5 % общей площади водоема, максимальная глубина их распространения доходит до 8 м. Поэтому на дне образовались густые подводные луга из рдестов, элодей, роголистника, харовых водорослей. Широко представлен нителлопсис притупленный (*Nitellopsis obtusa*) – редкий охраняемый вид зеленой водоросли, занесенный в Красную книгу Республики Беларусь [7]. Надводные растения, в отличие от погруженных, не образуют сплошной зоны распространения, а размещаются отдельными пятнами различной площади в литорали на глубине до 1,5–1,8 м, их основные заросли получили развитие вдоль юго-восточного, южного и западного берегов большого плеса, а также вдоль косы «Наносы» и западного берега малого плеса.

Среди донных отложений водоема широко распространены отложения карбонатного типа и терригенные осадки, что не совсем типично для озер Беларуси. Терригенные песчаные, песчано-глинистые, галечниковые и даже каменистые отложения слагают литоральную зону большого плеса. На значительной глубине здесь накопились смешанные кремнеземисто-карбонатные илы, в составе которых преобладают озерная известь, песок, глина. Собственно карбонатные отложения не залегают сплошным покровом, но малый плес заполнен известковистыми отложениями с содержанием оксида кальция до 48,5 %. Глубже находятся смешанные осадки с повышенной концентрацией извести (до 85 %)⁸.

В числе направлений антропогенного воздействия на экосистему оз. Нарочь можно назвать вытапывание ВВР в неорганизованных местах купания и на пляжах, поступление биогенных элементов (с плоскостным смывом, поверхностным притоком по ручьям и протоке Скеме, а также с купанием). Вытапывание ВВР проявляется до глубины 1,4 м в зонах рекреационных объектов, у автокемпингов,

⁷Якушко О. Ф. Озероведение: география озер Беларуси... 223 с.

⁸Там же.

в местах купания вблизи населенных пунктов и т. д. Наиболее сильно подвержены вытаптыванию погруженные растения – рдест пронзеннолистный и харовые водоросли. Фактическая фосфорная нагрузка на озеро в начале 2000-х гг. составляла $0,05 \text{ кг/м}^2$ в год (допустимый показатель), после создания Национального парка «Нарочанский» она, предположительно, снизилась.

Озеро Глубля. Водоем относится к среднеглубоким. Водосбор озера холмистый, покрытый лесом. Котловина ложбинного типа. По большей части крутые склоны поднимаются на высоту 30–35 м над урезом воды, лишь на востоке имеются низкие заболоченные участки. Ширина литорали не превышает 10–15 м. Сублитораль крутая. Ложе озера отличается простым строением. Точка максимальной глубины несколько смещена к югу от центра водоема. Из-за небольшой площади водосбора озеро характеризуется очень медленным водообменом (более 16 лет). В него впадает протока из оз. Глубелька, из него вытекает протока в р. Страчу.

Водоем является стратифицированным. Температурная стратификация способствует кислородной стратификации. Эпилимнион хорошо насыщен кислородом. В четко сформированном термоклине наблюдается максимальное содержание кислорода. Так, концентрация кислорода в верхнем слое (4 м) в 2018 г. составляла около $9,0 \text{ мг/дм}^3$ (100 % насыщения), в зоне термоклина на глубине 4,5–7,5 м – $10\text{--}13 \text{ мг/дм}^3$ (до 123 % насыщения). Ниже она плавно уменьшалась, глубже 15 м кислород летом отсутствовал. По химическому составу воды относятся к гидрокарбонатному классу кальциево-магниевого группы с общей минерализацией 231 мг/дм^3 , водородным показателем 8,2. Из биогенных элементов обнаружены лишь нитраты с концентрацией $0,2 \text{ мг/дм}^3$. По комплексу показателей озеро характеризуется как слабоэвтрофное.

В составе донных отложений на глубине от 1 до 10–12 м доминируют карбонатные сапропели с содержанием карбоната кальция более 70 %, имеющие густую кашеобразную консистенцию грязно-белого цвета. Ниже ложе выстилают смешанные (кремнеземисто-карбонатные) сапропели с примерно равным содержанием карбоната кальция и кремнезема (30–34 %). В скважине на глубинах до 1,2 м вскрыты сапропели карбонатные, глубже выявлены смешанные сапропели и опесчаненные карбонатные глины.

Озеро слабо зарастает ВВР, что связано с характером рельефа дна. Площадь распространения макрофитов составляет 19 % общей площади водоема, максимальной ширины пояс растительности достигает на участке в юго-западной части озера. Надводные растения, среди которых доминируют тростник (*Phragmites australis* Trin. ex Steud.) и осока (*Carex* sp.), не образуют сплошной полосы, занимая 2,1 % территории. Растения с плавающими листьями встречаются на 0,7 % площади озера, они представлены кубышкой (*Nuphar lutea* (L.) Smith.) и кувшинкой (*Nymphaea candida* J. et C. Presl). Погруженные макрофиты занимают сплошную полосу вдоль побережья и распространяются до глубины 6,7 м. Их основу составляют уруть мутовчатая (*Myriophyllum verticillatum* L.), роголистник темно-зеленый (*Ceratophyllum demersum* L.), различные виды рдестов, в том числе рдест блестящий (*Potamogeton lucens* L.), рдест пронзеннолистный (*P. perfoliatus* L.), рдест волосовидный (*P. trichoides* Cham. et Schltdl.), и харовые водоросли (*Chara* sp.). Также в составе погруженных растений повсеместно присутствуют редкие виды – наяда (*Najas* sp.), водяная сосенка (*Hippuris vulgaris* L.).

На южном берегу оз. Глубля обустроено место отдыха «Грумбинентский пляж», на северо-западном – место отдыха «Срубок», на северном побережье размещено место отдыха «Ольшевский пляж».

Озеро Глубелька. Водоем относится к числу среднеглубоких. Котловина озера эвразийского типа, глубоко врезанная, округлая. Она имеет два залива. Характерной особенностью является сплошная облесенность склонов котловины. Склоны на восточных и северо-западных участках очень крутые, высотой до 35 м. Они совпадают с берегами. На других участках они отступают от уреза воды на 60–80 м. Берега низкие, заболоченные. Ложе озера имеет форму чаши с крутыми подводными склонами. В центре расположен небольшой песчаный остров, покрытый лесом. Морфометрические особенности обуславливают открытость водоема от ветрового перемешивания и стратифицированность водной массы.

Озеро можно отнести к слабопроточным. Оно входит в систему р. Страчи (правого притока р. Вилии), соединяясь с ней протокой через оз. Глубля. В восточной части в водоем впадает небольшой ручей из оз. Ячменек. В приходной части водного баланса ключевую роль играет, по-видимому, подземный приток, а также дождевые и талые снеговые воды. Основная часть расхода – испарение с водной поверхности. Небольшой водосбор отличается крупнохолмистым рельефом, резко расчлененным, со сложным сочетанием холмов и котлообразных впадин, затрудняющих поверхностный сток. Он полностью залесен.

Морфометрические и гидрологические особенности оз. Глубелька сильно сказываются на его гидрхимическом режиме. Температурный скачок на глубине 4–7 м обычно составляет $3 \text{ }^\circ\text{C}$ на 1 м. Гиполимнион в точке максимальной глубины занимает более половины водного слоя. Придонные температуры низкие ($5,1 \text{ }^\circ\text{C}$). Температурной стратификации соответствует содержание кислорода, которое превышает в верхних слоях 100 %, в зоне температурного скачка достигает кислородного максимума (136 %), ниже быстро снижается, а с глубины 10–12 м ощущается запах сероводорода. У дна он становится очень сильным.

Озеру свойственна высокая прозрачность (до 7,3 м). Активная реакция в поверхностном слое слабощелочная, у дна нейтральная. Минерализация воды довольно высокая (230,5 мг/дм³ у поверхности). По составу воды относятся к гидрокарбонатному классу кальциево-магниевого группы. С точки зрения гидрохимических показателей (прозрачности, цветности, низкой окисляемости) озеро характеризуется как мезотрофный водоем. При этом для него типичны колебания температуры и содержания кислорода в вертикальном разрезе, повышенная минерализация и заметное ее увеличение в придонном слое (что подчеркивает значимую роль подземного питания), наличие сероводорода в гипolimнионе, зимний разогрев воды.

Донные отложения отличаются рядом особенностей, которые определяются строением котловины, богатством грунтового питания, направленностью биохимических процессов в водной массе и др. Вследствие полной залесенности водосбора поступление терригенного (песчано-глинистого) материала ограничено, поэтому минеральные донные осадки встречаются на литорали пятнами у крутых берегов. Преобладающим типом отложений, распространенным на глубинах более 7 м в восточном заливе и более 2 м в центральной части озера, является высокоорганический (тонкодетритовый и грубодетритовый) сапропель, содержащий до 50 % органического вещества. Часто встречаются белесые карбонатные сапропели кашеобразной консистенции. Высокая степень карбонатности характерна и для других осадков. Так, в тонкодетритовых сапропелях на глубине 17 м содержание оксида кальция достигает 16,2 %.

Широкое распространение получила ВВР. Полоса надводных макрофитов тянется вдоль всей береговой линии с шириной не более 10 м, а у крутых склонов – менее 1 м с разреженным покровом. Основные представители – тростник (*P. australis* Trin. ex Steud.) и камыш (*Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla), а также охраняемый вид – меч-трава (*Cladium mariscus* (L.) Pohl.). Местами прослеживается узкая полоса растений с плавающими листьями из рдеста плавающего (*P. natans* L.) и кувшинки (*N. candida* J. et C. Presl). Погруженная ВВР образует густые подводные заросли. Их основу составляют уруть мутчатая (*M. verticillatum* L.), рдест блестящий (*P. lucens* L.) и рдест длиннейший (*P. praelongus* Wulf.) и харовые водоросли (*Chara* sp.), среди которых много видов, вегетирующих и в зимнее время. Особенно мощные заросли харовые водоросли образуют в восточном заливе. Глубина их распространения доходит до 7 м. С биологической деятельностью харовых водорослей связано накопление карбонатных осадков.

Неширокой протокой соединено оз. Глубелька с оз. Глубля. В 1923–1930 гг. в целях организации прудового рыбного хозяйства уровень обоих водоемов был повышен примерно на 1 м. В настоящее время уровень оз. Глубелька почти постоянен в течение года. Весь водосборный бассейн озер, относящихся к Болдукской группе озер, входит в состав Национального парка «Нарочанский», поэтому любые работы, способные отразиться на режиме водоемов, запрещены. Допускается только организованная рекреационная деятельность.

Для выполнения типологического картографирования элементарных геохимических ландшафтов исследуемых озер использовались фондовые материалы научно-исследовательской лаборатории озераведения Белорусского государственного университета, данные Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь, литературные источники [8; 9]. В качестве исходной картографической основы были взяты батиметрические схемы озер с сечением изобат 1 м, картосхемы донных осадков, схемы зарастания озер ВВР, в том числе материалы полевых исследований авторов, проведенных в 2018 г. Распространение ВВР в озерах и ее основные свойства (густота и характер зарастания, видовой и ассоциативный состав и др.) изучались по данным дистанционного зондирования Земли (материалам аэрофотосъемки с пространственным разрешением 30 см) и полевых исследований. Картографирование элементарных аквальных ландшафтов выполнялось в геоинформационной среде ArcGIS (версия 10.4).

Результаты и их обсуждение

Результаты типологического картографирования элементарных геохимических ландшафтов исследуемых аквальных систем показаны на рис. 2–4. В целом геохимическая специфика водоемов обусловлена физико-географическими особенностями и современным состоянием систем водосбор – озеро. Условия миграции химических элементов при этом характеризуются пространственно-временной изменчивостью, вызванной локальными чертами элементарных аквальных ландшафтов.

Важная роль в аккумуляции химических элементов принадлежит биогенному фактору. По показателям биомассы и продукции исследуемые элементарные аквальные ландшафты разбиты на два типа – ландшафты планктонных водорослей и ландшафты ВВР разных формаций. Густота произрастания и видовой состав растений в водоемах определяются не только характером донных осадков, но и всей совокупностью морфометрических, гидрохимических, гидробиологических и других особенностей [10]. На уровне семейства (подсемейства) выделены элементарные ландшафты ВВР гелофитной, гелогидрофитной и гидрофитной формаций (с указанием преобладающего вида, в том числе харовых водорослей, не относящихся к ВВР), имеющей сплошной либо прерывистый покров. На рис. 2–4 также показаны места вытаптывания макрофитов на пляжах.

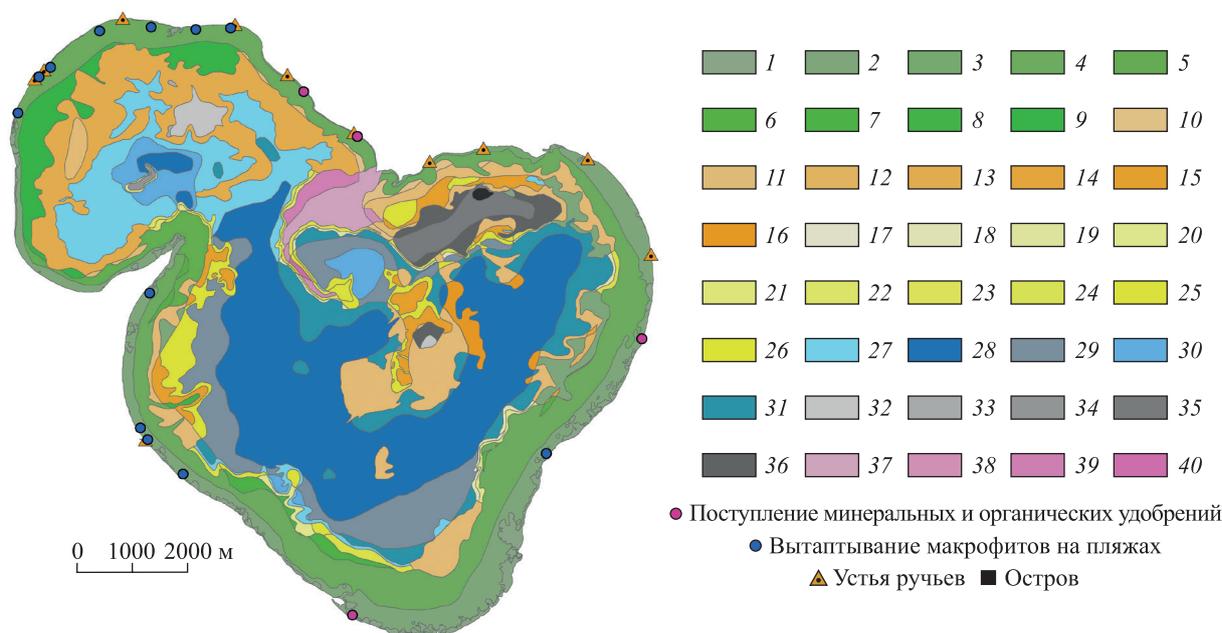


Рис. 2. Элементарные геохимические аквальные ландшафты оз. Нарочь.

Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые ландшафты литорали:

- 1 – трансаккумулятивные со сплошным покровом ВВР (с преобладанием тростника) на песках и песках заиленных; 2 – трансаккумулятивные на песках и песках заиленных;
 3 – абразионно-аккумулятивные на песках завалуненных; 4 – трансаккумулятивные со сплошным покровом ВВР (с преобладанием рдеста пронзеннолистного) на песках, песках завалуненных и заиленных; 5 – трансаккумулятивные со сплошным покровом ВВР (с преобладанием харовых водорослей) на песках заиленных;
 6 – трансаккумулятивные со сплошным покровом ВВР (с преобладанием рдеста пронзеннолистного) на глинах;
 7 – трансаккумулятивные на илах глинистых с повышенным содержанием карбонатов;
 8 – трансаккумулятивные со сплошным покровом ВВР (с преобладанием элодеи) на сапропелях смешанных;
 9 – трансаккумулятивные со сплошным покровом ВВР (с преобладанием харовых водорослей) на сапропелях карбонатных.

Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые трансаккумулятивные ландшафты сублиторали пологой:

- 10 – с прерывистым покровом ВВР (с преобладанием рдестов) на песках завалуненных; 11 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием рдестов) на песках и песках заиленных; 12 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием рдеста пронзеннолистного) на глинах;
 13 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием харовых водорослей) на сапропелях карбонатных; 14 – на глинах; 15 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием элодеи) на сапропелях смешанных;
 16 – на сапропелях кремнеземистых.

Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые трансаккумулятивные ландшафты сублиторали крутой:

- 17 – на глинах; 18 – на песках заиленных; 19 – на песках завалуненных;
 20 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием рдестов) на илах глинистых с повышенным содержанием карбонатов; 21 – на илах глинистых с повышенным содержанием карбонатов;
 22 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием харовых водорослей) на сапропелях карбонатных; 23 – на сапропелях карбонатных;
 24 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием рдестов) на песках заиленных;
 25 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием рдестов) на сапропелях смешанных;
 26 – на сапропелях смешанных.

Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые аккумулятивные ландшафты профундали:

- 27 – на сапропелях карбонатных; 28 – на сапропелях кремнеземистых;
 29 – на сапропелях смешанных; 30 – на илах глинистых с повышенным содержанием карбонатов;
 31 – на песках и песках заиленных.

- Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые трансаккумулятивные ландшафты мелей:
 32 – со сплошным покровом ВВП (с преобладанием рдестов) на песках;
 33 – с прерывистым покровом ВВП (с преобладанием харовых водорослей) на сапропелях карбонатных;
 34 – с прерывистым покровом ВВП (с преобладанием харовых водорослей) на илах глинистых с повышенным содержанием карбонатов;
 35 – с прерывистым покровом ВВП (с преобладанием рдестов) на песках завалуненных;
 36 – с прерывистым покровом ВВП (с преобладанием рдестов) на сапропелях кремнеземистых и смешанных.
- Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые ландшафты подводной гряды:
 37 – абразионно-аккумулятивные с прерывистым покровом ВВП (с преобладанием рдестов) на песках завалуненных; 38 – трансаккумулятивные со сплошным покровом ВВП (с преобладанием рдестов) на песках заиленных; 39 – трансаккумулятивные со сплошным покровом ВВП (с преобладанием харовых водорослей) на сапропелях карбонатных;
 40 – трансаккумулятивные со сплошным покровом ВВП (с преобладанием элодеи) на сапропелях смешанных

Fig. 2. Elementary geochemical landscapes in Lake Naroch.

Oxygen-hydrocarbonate-calcium landscapes of the littoral zone:

- 1 – transaccumulative with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *P. australis* Trin ex Steud.) on sands and silted sands;
 2 – transaccumulative on sands and silted sands;
 3 – abrasion-accumulative on sands filled with rubble; 4 – transaccumulative with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *P. perfoliatus* L.) on sands, bouldered and silted sands;
 5 – transaccumulative with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Chara* sp.) on silted sands;
 6 – transaccumulative with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *P. perfoliatus* L.) on clays; 7 – transaccumulative on clayey silts with a high content of carbonates; 8 – transaccumulative with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Elodea*) on mixed sapropels;
 9 – transaccumulative with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Chara* sp.) on carbonate sapropels.
- Oxygen-hydrocarbonate-calcium transaccumulative landscapes of the gently sloping sublittoral:
 10 – with intermittent cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Potamogeton*) on bouldered sands; 11 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Potamogeton*) on sands and silted sands;
 12 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Potamogeton*) on clays;
 13 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Chara* sp.) on carbonate sapropels; 14 – on clays; 15 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Elodea*) on mixed sapropels; 16 – on siliceous sapropels.
- Oxygen-hydrocarbonate-calcium transaccumulative landscapes of the steep sublittoral:
 17 – on clays; 18 – on silted sands; 19 – on sands littered with rocks;
 20 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Potamogeton*) on clayey silts with a high content of carbonates; 21 – on clayey silts with a high content of carbonates; 22 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Chara* sp.) on carbonate sapropels; 23 – on carbonate sapropels;
 24 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Potamogeton*) on silted sands; 25 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Potamogeton*) on mixed sapropels; 26 – on mixed sapropels.
- Oxygen-hydrocarbonate-calcium accumulative landscapes of the profundal:
 27 – on carbonate sapropels; 28 – on siliceous sapropels;
 29 – on mixed sapropels; 30 – on clayey silts with a high content of carbonates; 31 – on sands and silted sands.
- Oxygen-hydrocarbonate-calcium transaccumulative landscapes of shoals:
 32 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Potamogeton*) on sands;
 33 – with an intermittent cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Chara* sp.) on carbonate sapropels; 34 – with an intermittent cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Chara* sp.) on clayey silts with a high content of carbonates;
 35 – with intermittent higher aquatic plants cover (with a predominance of *Potamogeton*) on bouldered sands; 36 – with an intermittent cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Potamogeton*) on siliceous and mixed sapropels.
- Oxygen-hydrocarbonate-calcium landscapes of the underwater ridge:
 37 – abrasion-accumulative with intermittent higher aquatic plants cover (with a predominance of *Potamogeton*) on bouldered sands; 38 – transaccumulative with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Potamogeton*) on silted sands; 39 – transaccumulative with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Chara* sp.) on carbonate sapropels;
 40 – transaccumulative with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Elodea*) on mixed sapropels

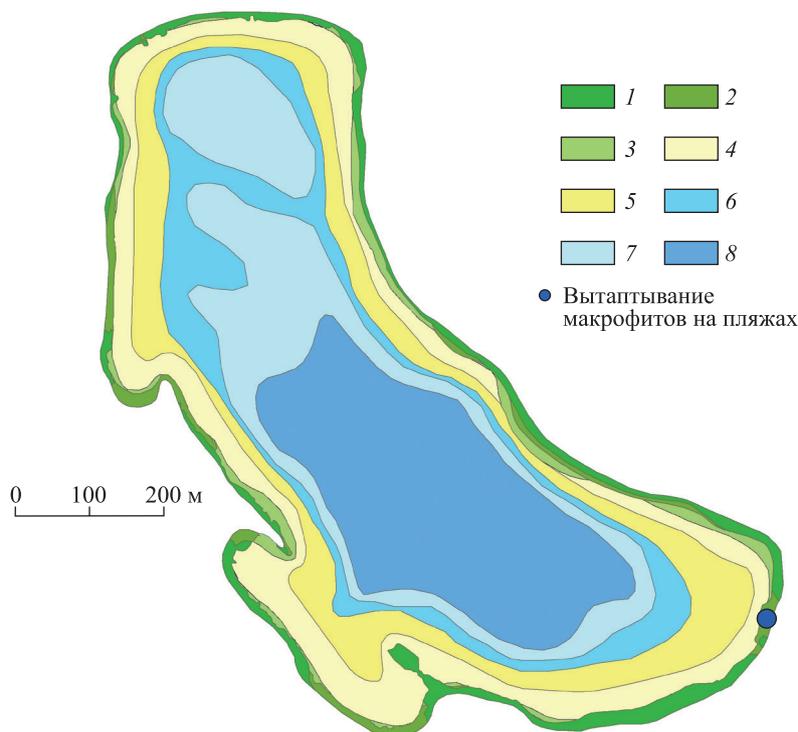


Рис. 3. Элементарные геохимические аквальные ландшафты оз. Глубля.

Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые трансаккумулятивные ландшафты литорали:

- 1 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием тростника) на песках и песках с известняками озерными;
- 2 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием роголистника темно-зеленого) на песках и песках с известняками озерными;
- 3 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием урути мутовчатой) на песках и песках с известняками озерными.

Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые трансаккумулятивные ландшафты сублиторали крутой:

- 4 – со сплошным покровом ВВР (с преобладанием харовых водорослей) на сапропелях карбонатных и сапропелях карбонатных с ракушками;
- 5 – на сапропелях карбонатных и сапропелях карбонатных с ракушками.

Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые аккумулятивные ландшафты профундали:

- 6 – на сапропелях карбонатных; 7 – на сапропелях смешанных.
- Кислородно-гидрокарбонатно-кальциево-глеевые аккумулятивные ландшафты профундали:
- 8 – на сапропелях смешанных.

Fig. 3. Elementary geochemical landscapes in Lake Glublya.

Oxygen-hydrocarbonate-calcium transaccumulative landscapes of the littoral zone:

- 1 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *P. australis* Trin. ex Steud.) on sands and sands with lacustrine limestones;
- 2 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *C. demersum* L.) on sands and sands with lacustrine limestones;
- 3 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *M. verticillatum* L.) on sands and sands with lacustrine limestones.

Oxygen-hydrocarbonate-calcium transaccumulative landscapes of the steep sublittoral:

- 4 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Chara* sp.) on carbonate sapropels and carbonate sapropels with shells; 5 – on carbonate sapropels and carbonate sapropels with shells.

Oxygen-hydrocarbonate-calcium accumulative landscapes of the profundal:

- 6 – on carbonate sapropels; 7 – on mixed sapropels.
- Oxygen-hydrocarbonate-calcium-gley accumulative landscapes of the profundal:
- 8 – on mixed sapropels

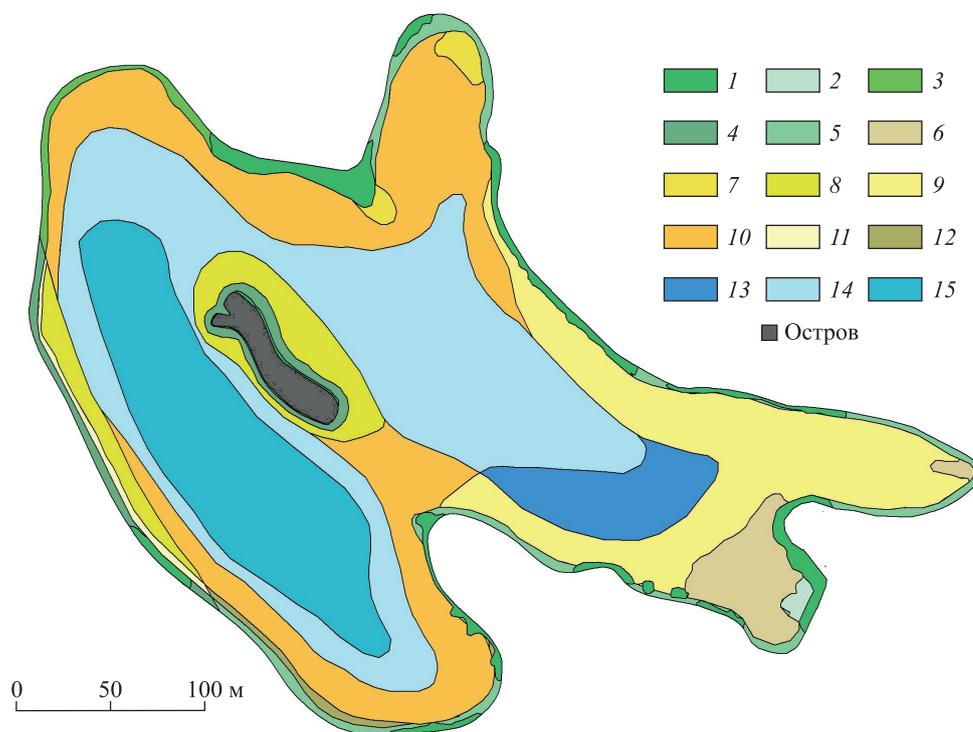


Рис. 4. Элементарные геохимические аквальные ландшафты оз. Глубелька.
 Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые трансаккумулятивные ландшафты литорали:
 1 – со сплошным покровом ВВП (с преобладанием тростника и осоки) на песках;
 2 – со сплошным покровом ВВП (с преобладанием кувшинки) на сапропелях карбонатных и известняках озерных;
 3 – со сплошным покровом ВВП (с преобладанием харовых водорослей) на сапропелях карбонатных и известняках озерных;
 4 – на сапропелях грубодетритовых; 5 – на сапропелях карбонатных.
 Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые трансаккумулятивные ландшафты сублиторали крутой:
 6 – со сплошным покровом ВВП (с преобладанием кувшинки) на сапропелях карбонатных; 7 – со сплошным покровом ВВП (с преобладанием рдестов) на сапропелях грубодетритовых; 8 – со сплошным покровом ВВП (с преобладанием харовых водорослей) на сапропелях карбонатных;
 9 – со сплошным покровом ВВП (с преобладанием харовых водорослей) на сапропелях карбонатных;
 10 – со сплошным покровом ВВП (с преобладанием харовых водорослей) на известняках озерных; 11 – на сапропелях грубодетритовых; 12 – на сапропелях карбонатных.
 Кислородно-гидрокарбонатно-кальциевые аккумулятивные ландшафты профундали:
 13 – на сапропелях карбонатных; 14 – на сапропелях карбонатных и известняках озерных.
 Кислородно-гидрокарбонатно-кальциево-сероводородные аккумулятивные ландшафты профундали:
 15 – на сапропелях карбонатных

Fig. 4. Elementary geochemical landscapes in Lake Glubelka.
 Oxygen-hydrocarbonate-calcium transaccumulative landscapes of the littoral zone:
 1 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *P. australis* Trin. ex Steud. and *Carex* sp.) on sands; 2 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *N. candida* J. et C. Presl) on carbonate sapropels and lacustrine limestones; 3 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Chara* sp.) on carbonate sapropels and lacustrine limestones; 4 – on coarse detrital sapropels; 5 – on carbonate sapropels.
 Oxygen-hydrocarbonate-calcium transaccumulative landscapes of the steep subtidal:
 6 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *N. candida* J. et C. Presl) on carbonate sapropels; 7 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *N. candida* J. et C. Presl) on lacustrine limestones; 8 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Potamogeton*) on coarse detrital sapropels; 9 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Chara* sp.) on carbonate sapropels; 10 – with a continuous cover of higher aquatic plants (with a predominance of *Chara* sp.) on lacustrine limestones; 11 – on coarse detrital sapropels; 12 – on carbonate sapropels.
 Oxygen-hydrocarbonate-calcium accumulative profundal landscapes:
 13 – on carbonate sapropels; 14 – on carbonate sapropels and lacustrine limestones.
 Oxygen-hydrocarbonate-calcium-sulphurous accumulative landscapes of profundal:
 15 – on carbonate sapropels

Классы элементарных ландшафтов определены с учетом показателей окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условий, содержания растворенного кислорода, типоморфных химических элементов с опорой на подходы А. Д. Хованского. По набору классов в исследуемых озерах наблюдаются некоторые различия. Так, все элементарные ландшафты оз. Нарочь отнесены к кислородно-гидрокарбонатно-кальциевому классу, поскольку большая часть водной массы отличается высоким кислородным насыщением и комплексом окислительных условий, в ней отсутствует температурное расслоение. В аквальной системе оз. Глубля наряду с ландшафтами кислородно-гидрокарбонатно-кальциевого класса (занимают 76,6 % площади акватории в основном в литорали и сублиторали, а также частично в профундали с глубинами менее 15 м) выделены ландшафты кислородно-гидрокарбонатно-кальциево-глеевого класса (23,4 % площади озера) в связи с формированием зоны аноксии в гипolimнионе и оглеением илов глубоководной профундали. Элементарные ландшафты оз. Глубелька отнесены к кислородно-гидрокарбонатно-кальциевому (85 % акватории) и кислородно-гидрокарбонатно-кальциево-сероводородному (15 % площади озера) классам по причине образования начиная с глубины 10–12 м в придонных водах и илах восстановительной сероводородной обстановки.

На уровне рода элементарные ландшафты исследуемых озер объединены в зависимости от геоморфологических особенностей, в значительной степени определяющих механическую миграцию элементов и их соединений. Выделены абразионно-аккумулятивные ландшафты литорали, трансаккумулятивные ландшафты литорали, сублиторали пологой и крутой, мелей и подводных гряд, аккумулятивные ландшафты профундали.

Виды элементарных ландшафтов озер Нарочь, Глубля и Глубелька отражают литологические особенности донных отложений водоемов. Они представлены песками завалуненными и заиленными, илами опесчаненными и глинистыми с повышенным содержанием карбонатов, глинами и сапропелями карбонатными, кремнеземистыми и смешанными.

Как видно из рис. 2, в литоральной зоне оз. Нарочь распространены в основном трансаккумулятивные ландшафты со сплошным покровом ВВР (с преобладанием рдеста пронзеннолистного) на песках, песках завалуненных и заиленных (10 км², или 12,6 %, площади акватории). Наибольшей мозаичностью отличаются трансаккумулятивные ландшафты сублиторали, где резко меняются глубины, литология донных отложений и видовой состав растительности. На подводной гряде, кроме трансаккумулятивных ландшафтов, представлены абразионно-аккумулятивные ландшафты с прерывистым покровом ВВР (с преобладанием рдестов) на песках завалуненных. В профундали озера доминируют аккумулятивные ландшафты на сапропелях кремнеземистых (16,2 км², или 20,4 %, площади акватории).

В оз. Глубля трансаккумулятивные ландшафты литорали со сплошным покровом ВВР на песках и песках с известняками озерными вытянуты узкой полосой вдоль берега. Они занимают глубины от уреза до 1,0–1,5 м. Трансаккумулятивные ландшафты сублиторали крутой на сапропелях карбонатных только в верхней части склонов (до глубины 6,7 м) имеют сплошной покров ВВР. Аккумулятивные ландшафты профундали озера развиваются на сапропелях карбонатных и смешанных, оглеенных на глубоководном участке (см. рис. 3).

Трансаккумулятивные ландшафты литорали и крутой сублиторали оз. Глубелька развиваются преимущественно на сапропелях карбонатных и известняках озерных со сплошным покровом ВВР с преобладанием кувшинки, харовых водорослей (см. рис. 4). Аккумулятивные ландшафты глубоководного участка профундали на сапропелях карбонатных отнесены к кислородно-гидрокарбонатно-кальциево-сероводородному классу из-за наличия сероводородной обстановки в гипolimнионе.

Систематизированные по подобной схеме элементарные ландшафты озер в разной степени подвержены трансформациям под влиянием антропогенного воздействия. Ландшафты литорали со сплошным покровом ВВР эффективно задерживают механическое поступление вещества в водоем, накапливают в тканях растений химические соединения. Прибрежное вытаптывание макрофитов, заиление донных осадков, фосфорная нагрузка в пределах рекреационных зон оз. Нарочь приводят к снижению барьерных возможностей ландшафтов литорали. Антропогенная нагрузка на ландшафты сублиторали может способствовать сокращению биомассы макрофитов, изменению видового состава растительности, подобное воздействие на ландшафты профундали – уменьшению прозрачности воды, увеличению биомассы фитопланктона, формированию восстановительных условий донных илов.

Заключение

Результатом проведенной типологии стало выделение 40 видов элементарных геохимических ландшафтов оз. Нарочь, 8 видов элементарных геохимических ландшафтов оз. Глубля и 15 видов элементарных геохимических ландшафтов оз. Глубелька. Их разнообразие определяется формой озерной котловины, строением ее подводной части, литологией донных осадков, распределением в водах и илах типоморфных химических элементов, а также видовым составом и продуктивностью растительных сообществ.

Полученные типологические картосхемы могут быть использованы в качестве комплексной картографической основы при проведении оценки антропогенной нагрузки на водоемы, определении зон накопления техногенных веществ, прогнозировании изменений состояния и уязвимости аквальных систем озер Национального парка «Нарочанский».

Библиографические ссылки

1. Полынов ББ. *Избранные труды*. Тюрин ИВ, Сауков АА, редакторы. Москва: Издательство АН СССР; 1956. 751 с.
2. Хованский АД. *Геохимия аквальных ландшафтов*. Войткевич ГВ, редактор. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета; 1993. 240 с.
3. Касимов НС, Касатенкова МС, Ткаченко АН, Лычагин МЮ, Крооненберг СБ. *Геохимия лагунно-маршевых и дельтовых ландшафтов Прикаспия*. Москва: Лига-Вент; 2016. 244 с. EDN: YWJBLV.
4. Лычагин МЮ, Касимов НС, Курьякова АН, Крооненберг СБ. Геохимические особенности аквальных ландшафтов дельты Волги. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2011;1:100–113. EDN: NSYGCB.
5. Россолимо ЛЛ. Основы типизации озер и лимнологического районирования. В: Россолимо ЛЛ, редактор. *Накопление вещества в озерах*. Москва: Наука; 1964. с. 5–46.
6. Якушко ОФ. *Белорусское Поозерье: история развития и современное состояние озер северной Белоруссии*. Минск: Вышэйшая школа; 1971. 335 с.
7. Гигевич ГС, Власов БП, Вынаев ГВ. *Высшие водные растения Беларуси: эколого-биологическая характеристика, использование и охрана*. Минск: БГУ; 2001. 236 с.
8. Курзо БВ, Гайдукевич ОМ, Ситник ГД, Кашицкий ЭС. Анализ состояния экосистемы озера Нарочь по донным осадкам для решения проблем природопользования. В: Хомич ВС, редактор. *Природопользование: экология, экономика, технологии. Материалы Международной научной конференции; 6–8 октября 2010 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Минсктиппроект; 2010. с. 151–154.
9. Власов БП, Грищенко НД, Сивенков АЮ, Суховило НЮ, Колбун ДА. Оценка современного состояния и динамики зарастания озер Национального парка «Нарочанский» с использованием данных дистанционного зондирования Земли. *Acta Geographica Silesiana*. 2019;13(4):39–55. EDN: EXYOCH.
10. Якушко ОФ. Принципы выделения и классификация аквальных ландшафтов. *Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География*. 1986;1:53–58.

References

1. Polynov BB. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Tyurin IV, Saukov AA, editors. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR; 1956. 751 p. Russian.
2. Khovanskii AD. *Geokhimiya akval'nykh landshaftov* [Geochemistry of aquatic landscapes]. Voitkevich GV, editor. Rostov-on-Don: Izdatel'stvo Rostovskogo universiteta; 1993. 240 p. Russian.
3. Kasimov NS, Kasatenkova MS, Tkachenko AN, Lychagin MYu, Kroonenberg SB. *Geokhimiya lagunno-marshevykh i del'tovykh landshaftov Prikaspiya* [Geochemistry of lagoon-marsh and delta landscapes of the Caspian Region]. Moscow: Liga-Vent; 2016. 244 p. Russian. EDN: YWJBLV.
4. Lychagin MYu, Kasimov NS, Kuryakova AN, Kroonenberg SB. Geochemical specific features of aquatic landscape of the mouth delta of the Volga River. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2011;1:100–113. Russian. EDN: NSYGCB.
5. Rossolimo LL. [Fundamentals of lake typification and limnological zoning]. In: Rossolimo LL, editor. *Nakoplenie veshchestva v ozerakh* [Accumulation of matter in lakes]. Moscow: Nauka; 1964. p. 5–46. Russian.
6. Yakushko OF. *Belorusskoe Poozer'e: istoriya razvitiya i sovremennoe sostoyanie ozer severnoi Belorussii* [Belarusian Poozerye: history of development and current state of lakes in Northern Belarus]. Minsk: Vyshhejskaja shkola; 1971. 335 p. Russian.
7. Gigevich GS, Vlasov BP, Vynaev GV. *Vysshie vodnye rasteniya Belarusi: ekologo-biologicheskaya kharakteristika, ispol'zovanie i okhrana* [Higher aquatic plants of Belarus: ecological and biological characteristics, use and protection]. Minsk: Publishing house of the Belarusian State University; 2001. 236 p. Russian.
8. Kurzo BV, Gaidukevich OM, Sitnik GD, Kashitskii ES. [Analysis of the state of the Lake Naroch ecosystem based on bottom sediments to solve environmental management problems]. In: Khomich VS, editor. *Prirodopol'zovanie: ekologiya, ekonomika, tekhnologii. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii; 6–8 oktyabrya 2010 g.; Minsk, Belarus'* [Environmental management: ecology, economics, technology. Proceedings of the International scientific conference; 2010 October 6–8; Minsk, Belarus]. Minsk: Minsktipproekt; 2010. p. 151–154. Russian.
9. Vlasov BP, Grishchenkova ND, Sivenkov AYu, Sukhovilo NYu, Kolbun DA. Assessment of the current state and dynamics of overgrowing of lakes in National Park «Narochansky» using remote sensing data. *Acta Geographica Silesiana*. 2019;13(4):39–55. Russian. EDN: EXYOCH.
10. Yakushko OF. [Principles of identification and classification of aquatic landscapes]. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 1986;1:53–58. Russian.

Получена 20.12.2023 / исправлена 28.02.2024 / принята 04.03.2024.
Received 20.12.2023 / revised 28.02.2024 / accepted 04.03.2024.

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ И СТРУКТУРЫ КЛАССОВ ЗЕМЕЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НОВОГРУДСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Д. А. КИСЛИЦЫН¹⁾, Н. В. КЛЕБАНОВИЧ¹⁾

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

Аннотация. С использованием авторской методики автоматизированного дешифрирования структуры классов земельного покрытия в программных комплексах *ENVI* (версия 5.3), *ArcGIS* (версия 10.7) для космических снимков «Landsat-5», «Landsat-7» и «Sentinel-2» рассчитаны площади классов земельного покрытия трех административных районов Новогрудской возвышенности (Кореличского, Новогрудского и Дятловского районов Гродненской области). Проанализированы ключевые особенности структуры классов земельного покрытия за период с 1986 по 2019 г., которая заметно различается внутри исследуемого региона. Данный факт вызван природными условиями, спецификой рельефа, а также уровнем плодородия почв, что отразилось на степени сельскохозяйственной освоенности административных районов. Показана возможность применения сведений о рельефе и вегетационном индексе NDVI в геоинформационной системе *ArcGIS* (версия 10.7) для повышения общей точности результатов автоматизированного дешифрирования в векторном формате. С использованием морфометрических показателей рельефа (уклона и вертикального расчленения) и вегетационного индекса NDVI выявлены ареалы почв, подверженных водной эрозии, и основные участки овражно-балочной сети на территории Новогрудской возвышенности на базе автоматизированного дешифрирования космического снимка «Sentinel-2» за 2019 г. Установлены особенности пространственного расположения пахотных земель на эродированных почвах, которые заметно чаще встречаются на восточных склонах Новогрудской возвышенности, чем на западных, что связано с различиями в значениях морфометрических показателей рельефа, спецификой генезиса почвообразующих пород и гранулометрического состава почв. Выполнена оценка точности итогового результата автоматизированного дешифрирования на основе матрицы ошибок, которая составила 80,4 %, при этом наибольшие значения пользовательской точности (более 90 %) характерны для водных объектов, а также для лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах.

Ключевые слова: автоматизированное дешифрирование; рельеф; вегетационный индекс; NDVI; земельное покрытие; эрозия почв; Новогрудская возвышенность.

Образец цитирования:

Кислицын ДА, Клебанович НВ. Геоинформационный анализ динамики и структуры классов земельного покрытия Новогрудской возвышенности. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;1:126–140.
EDN: ZHVZB

For citation:

Kislitsyn DA, Klebanovich NV. Geoinformation analysis of the dynamics and structure of land cover classes of the Novogrudok Upland. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;1:126–140. Russian.
EDN: ZHVZB

Авторы:

Дмитрий Андреевич Кислицын – преподаватель-стажер кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.

Николай Васильевич Клебанович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; профессор кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Dmitry A. Kislitsyn, trainee lecturer at the department of soil science and geographic information systems, faculty of geography and geoinformatics.

dimas_13082000@mail.ru

Nikolay V. Klebanovich, doctor of science (agricultural sciences), full professor; professor at the department of soil science and geographic information systems, faculty of geography and geoinformatics.

n_klebanovich@inbox.ru

GEOINFORMATION ANALYSIS OF THE DYNAMICS AND STRUCTURE OF LAND COVER CLASSES OF THE NOVOGRUDOK UPLAND

D. A. KISLITSYN^a, N. V. KLEBANOVICH^a

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

Corresponding author: D. A. Kislitsyn (dimas_13082000@mail.ru)

Abstract. Using the author's method of automated interpretation of the land cover classes based on the software packages *ENVI* (version 5.3), *ArcGIS* (version 10.7) for «Landsat-5», «Landsat-7», and «Sentinel-2» satellite images, the areas of various land cover classes were calculated for three administrative districts of Novogrudok Upland (Korelichy, Novogrudok and Dyatlov districts of the Grodno Region). The main features of the structure of land cover classes for the period from 1986 to 2019 are analysed, which differ markedly within the region under study, due to natural conditions, relief features, as well as the level of soil fertility, which affected the degree of agricultural development of administrative districts. The possibility of using information about the relief and the normalised difference vegetation index (NDVI) to increase the overall accuracy of the results of automated interpretation in vector format in the geographic information system *ArcGIS* (version 10.7) is shown. Based on the use of morphometric indicators of the relief (slope and vertical dissection) and the NDVI, areas of soils susceptible to water erosion and the main areas of the gully network for the territory of the Novogrudok Upland were identified based on automated interpretation of the «Sentinel-2» satellite image for 2019. Features of the spatial location were identified arable land on eroded soils, which are noticeably more common on the eastern slopes of the Novogrudok Upland than on the western ones, which is associated with differences in the values of morphometric relief parameters, as well as with the peculiarities of the genesis of soil-forming rocks and the granulometric composition of soils. The accuracy of the final result of automated interpretation was assessed based on the error matrix, which amounted to 80.4 %, while the highest values of user accuracy (more than 90 %) are typical for water bodies, as well as forest lands and lands under trees and shrubs on automorphic and semi-hydromorphic soils.

Keywords: automated interpretation; relief; normalised difference vegetation index; NDVI; land cover; soil erosion; Novogrudok Upland.

Введение

Актуальность темы исследования в значительной степени обусловлена тем, что почвы и растительный покров являются одними из ключевых компонентов природно-ресурсного потенциала любой территории. Оперативно получить представление о данных объектах и их динамике можно только с помощью современных цифровых технологий. Для комплексного изучения структуры классов земельного покрытия необходимо использовать новейшие методики с применением геоинформационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования Земли, что позволит своевременно выявлять процессы деградации почвенного покрова с их последующим картографированием. На основе результатов автоматизированного дешифрирования космических снимков можно установить тренды изменения классов земельного покрытия с учетом их пространственного распределения, а также оценить структуру землепользования на различных уровнях (в рамках районов, сельсоветов). ГИС-технологии позволяют увеличить скорость обработки пространственной информации путем автоматизации некоторых этапов при картографировании классов земельного покрытия и осуществить вычисление статистических значений для изучения динамики земельного покрытия.

Достаточно известными мировыми проектами в сфере комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли для составления и обновления карт структуры земель и изучения динамики изменений классов земельного покрытия являются базы данных «CORINE Land Cover» [1], «National Land Cover Database» [2]. Оценка ежемесячных и сезонных темпов потери почвы (в т/га) из-за влияния водной эрозии на о. Крит (Греция) за два контрастных по степени увлажнения года (2016, 2019) на основе универсального уравнения потерь почвы от эрозии (*revised universal soil loss equation*, RUSLE) представлена в исследовании [3]. Для измерения масштабов водной эрозии на территории небольшого водораздела в южной Индии использована цифровая модель рельефа, полученная на базе глобальной цифровой модели рельефа *Aster*, метеорологической карты, космического снимка «Landsat-8», топографической карты и материалов обследований почв [4]. В статье [5] дан достаточно детальный аналитический обзор использования космических снимков «Sentinel-2» для изучения земельного и почвенно-растительного покрова, а также выполнено сопоставление общего уровня точности при применении различных методов автоматизированного дешифрирования спутниковых данных «Sentinel-2».

Ряд зарубежных публикаций посвящены геоинформационному картографированию структуры земельного покрытия на основе космических снимков «Sentinel-2» [6–8]. Теоретико-методологические аспекты применения космических снимков «Landsat» для анализа динамики земельного покрытия и подробная история развития методов автоматизированного дешифрирования спутниковых данных «Landsat» приведены в зарубежных обзорах [9; 10].

Статья А. А. Яновского [11] посвящена анализу эффективности использования снимков спектрорадиометра «Aster» для дистанционного разделения торфяных и дегроторфяных почв на основе парных отношений спектральных каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах и нормализованных индексов (NDVI, NDWI). Детальная характеристика методов дистанционной диагностики нарушенных торфяных месторождений и стадий их восстановления с применением технологий визуального и автоматизированного дешифрирования космических снимков («Ikonos», «Aster» и «Landsat») в программном комплексе *ERDAS Imagine* представлена в работе [12].

В статье С. Г. Мышлякова [13] проанализированы возможности использования космических снимков «Landsat TM» и «Landsat ETM+» для осуществления контроля за сельскохозяйственным землепользованием в разрезе отдельно взятого хозяйства, а также для изучения структуры посевов сельскохозяйственных культур и их групп. Результаты автоматизированного дешифрирования космических снимков «Landsat» (за период с 1975 по 2014 г.) применены для оценки пространственной структуры природно-антропогенных ландшафтов Белорусской возвышенной провинции и проведения районирования природно-антропогенных ландшафтов по степени антропогенной преобразованности [14]. Исследование процессов автоматизации контролируемой классификации космических снимков на основе использования модели геообработки в среде *ArcGIS* (версия 10.7), созданной в программных комплексах *ModelBuilder* и *ERDAS Imagine*, и измерение точности различных методов классификации (гиперпараллелепипедного метода, а также методов минимального расстояния и максимального правдоподобия) представлены в работе [15]. В статье Е. Н. Горбачёвой [16] приведены результаты использования RUSLE для изучения территории тестового полигона в Минском районе. В качестве индикатора состояния ландшафтов и растительного покрова может применяться вегетационный индекс NDVI, который имеет высокую степень корреляции с объемом зеленой фитомассы и уровнем продуктивности экосистем [17; 18]. Анализ динамики значений этого индекса для исследования ландшафтов на территории Брестского и Гомельского Полесья приведен в работах белорусских ученых [19; 20].

Таким образом, использование технологий геоинформационного анализа материалов дистанционного зондирования Земли позволяет оперативно обработать большие объемы данных, но наличие информационного шума не дает возможности полной и однозначной идентификации объектов, поэтому можно выделить только их достаточно обобщенные классы.

Цель исследования – выявление ключевых особенностей классов земельного покрытия Новогрудской возвышенности в рамках трех административных районов с помощью геоинформационного анализа материалов космической съемки различного пространственного разрешения («Landsat-5», «Landsat-7» и «Sentinel-2»). Поставленная цель решалась путем использования ГИС-технологий и данных дистанционной съемки для автоматизированного дешифрирования классов земельного покрытия через применение цифровой модели рельефа и вегетационного индекса NDVI для повышения общей точности полученных результатов.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования выбрана территория Новогрудского, Кореличского и Дятловского районов Гродненской области, которые практически полностью входят в границы Новогрудской возвышенности.

Применялись мультиспектральные космические снимки из архивов съемочных систем «Landsat» (уровень обработки collection-2, level-2) и «Sentinel» (уровень обработки L2A), находящиеся в открытом доступе в интернет-каталогах Геологической службы США¹ и портала *Copernicus*² соответственно. Для изучения динамики трансформации классов земельного покрытия использовались три разновременных изображения серии «Landsat» (за 4 мая 1986 г., 2 мая 2000 г., 3 мая 2009 г.) с пространственным разрешением 30 м, обработанные в программном комплексе *ENVI* (версия 5.3), в котором методом максимального правдоподобия проводилось их автоматизированное дешифрирование. Для более точного выделения пахотных и луговых земель были задействованы также три снимка, необходимые для расчета значений вегетационного индекса NDVI в сентябре (реже в конце августа). Изображения «Sentinel-2» (пространственное разрешение 10 м для синего, зеленого, красного и ближнего инфракрасного каналов) использованы только за 17 апреля 2019 г., так как существенно более ранние снимки отсутствуют.

¹EarthExplorer [Electronic resource] // United States Geological Survey. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (date of access: 25.06.2023).

²Copernicus [Electronic resource]. URL: <https://scihub.copernicus.eu/> (date of access: 26.06.2023).

В данном исследовании применялись методы цифровой обработки космических снимков и геоинформационного анализа. Из четырех основных известных групп методов автоматизированного дешифрирования (контролируемая (с обучением), неконтролируемая, экспертная и объектно ориентированная классификации³) была использована прежде всего первая группа методов.

Для выполнения контролируемой классификации в программном комплексе *ENVI* (версия 5.3) был выбран метод максимального правдоподобия. Постклассификационная обработка классифицированных растров осуществлялась в среде *ArcGIS* (версия 10.7) на основе использования модели геообработки в программном комплексе *ModelBuilder*, основные принципы функционирования которой изложены в работе [21]. Цифровая модель рельефа Новогрудской возвышенности создана на базе метода интерполяции топо в растр в среде *ArcGIS* (версия 10.7), уклон рельефа определен на основе соответствующей опции из группы инструментов *spatial analyst*, а вертикальное расчленение рельефа установлено согласно методике, изложенной в статье Д. М. Курловича [22]. Использование данных о морфометрических показателях рельефа и растительности (вегетационном индексе NDVI) позволяет повысить точность итоговых изображений контуров классов земельного покрытия [23].

Результаты и их обсуждение

При анализе космических снимков серии «Landsat» были выделены восемь классов объектов с учетом видов и групп видов земель, а также групп почв по степени гидроморфизма: 1) водные объекты; 2) земли под болотами; 3) лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах; 4) лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах; 5) луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах; 6) населенные пункты, коммуникации, дороги; 7) пахотные земли на автоморфных и полугидроморфных почвах; 8) сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах. При автоматизированной обработке космического снимка «Sentinel-2» с более высоким разрешением были выявлены десять классов объектов. К восьми классам объектов, названия которых идентичны названиям классов, определенных для космических снимков «Landsat», были добавлены два класса объектов: 1) лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на овражно-балочной сети; 2) пахотные земли на эродированных почвах. Более детальное распознавание технологически трудноосуществимо, поэтому в рамках этой классификации проводилось автоматизированное дешифрирование классов земельного покрытия, обобщенных до уровня видов и групп видов земель, а также групп почв по степени гидроморфизма. Выделение автоморфных и полугидроморфных почв по отдельности в рамках пахотных земель не выполнялось, так как с учетом различных типов севооборотов (полевых, кормовых, почвозащитных и т. д.) на исследуемой территории дешифровочные признаки этих почв проблематично формализовать при автоматизированном дешифрировании. Внутри классов земельного покрытия могут быть заметны спектральные различия, что в наибольшей степени свойственно лесным землям и землям под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах, пахотным землям на автоморфных и полугидроморфных почвах. При формировании обучающей выборки необходимо создавать большее количество классов эталонов по сравнению с числом классов земельного покрытия.

Минимальные значения вертикального расчленения рельефа ($0-4 \text{ м/км}^2$) характерны в основном для северо-восточной части Новогрудского и Кореличского районов в окрестностях долины р. Неман и нижнего течения р. Сервечи, а максимальные значения ($50,1-68,5 \text{ м/км}^2$) – для небольших участков к западу от р. Сервечи на восточных склонах Новогрудской возвышенности (в южной части Кореличского района и к западу от г. Кореличи) и северо-восточнее г. Новогрудка (рис. 1).

При кластеризации изображений космических снимков для выделения классов земельного покрытия учитывался не только тон изображения, но и косвенные дешифровочные признаки (информация о рельефе и вегетационном индексе NDVI), что позволило лучше отграничить классы объектов на гидроморфных почвах от других классов почв по степени увлажнения. Для выявления участков под пахотными землями были математически формализованы величины вегетационного индекса NDVI за май и сентябрь, а затем с помощью инструмента статистика по ячейкам рассчитано его общее минимальное значение для космических снимков «Landsat» и «Sentinel-2». Эти минимальные значения использовались для уточнения и других классов объектов. Инструмент зональная статистика в таблицу применялся для вычисления средних, минимальных и максимальных величин вегетационного индекса NDVI, уклона и вертикального расчленения рельефа для каждого контура векторных результатов классификации космических снимков. Вертикальное расчленение рельефа лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах в основном не превышает $4-8 \text{ м/км}^2$,

³Лурье И. К. Геоинформационное картографирование: методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков : учебник. М. : КДУ, 2008. 424 с.

поэтому при значении данного показателя более этой величины их можно определить как лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах. Обычно значения вегетационного индекса NDVI за май и сентябрь для пахотных земель составляют преимущественно менее 0,32–0,35, а при более высоких величинах этого показателя контуры могут быть отнесены к луговым землям на автоморфных и полугидроморфных почвах. Земли под болотами идентифицируются по усредненным значениям уклона до $0,6^\circ$, тогда как сходные по морфометрии контуры с более высокими значениями уклона определяются как луговые земли.

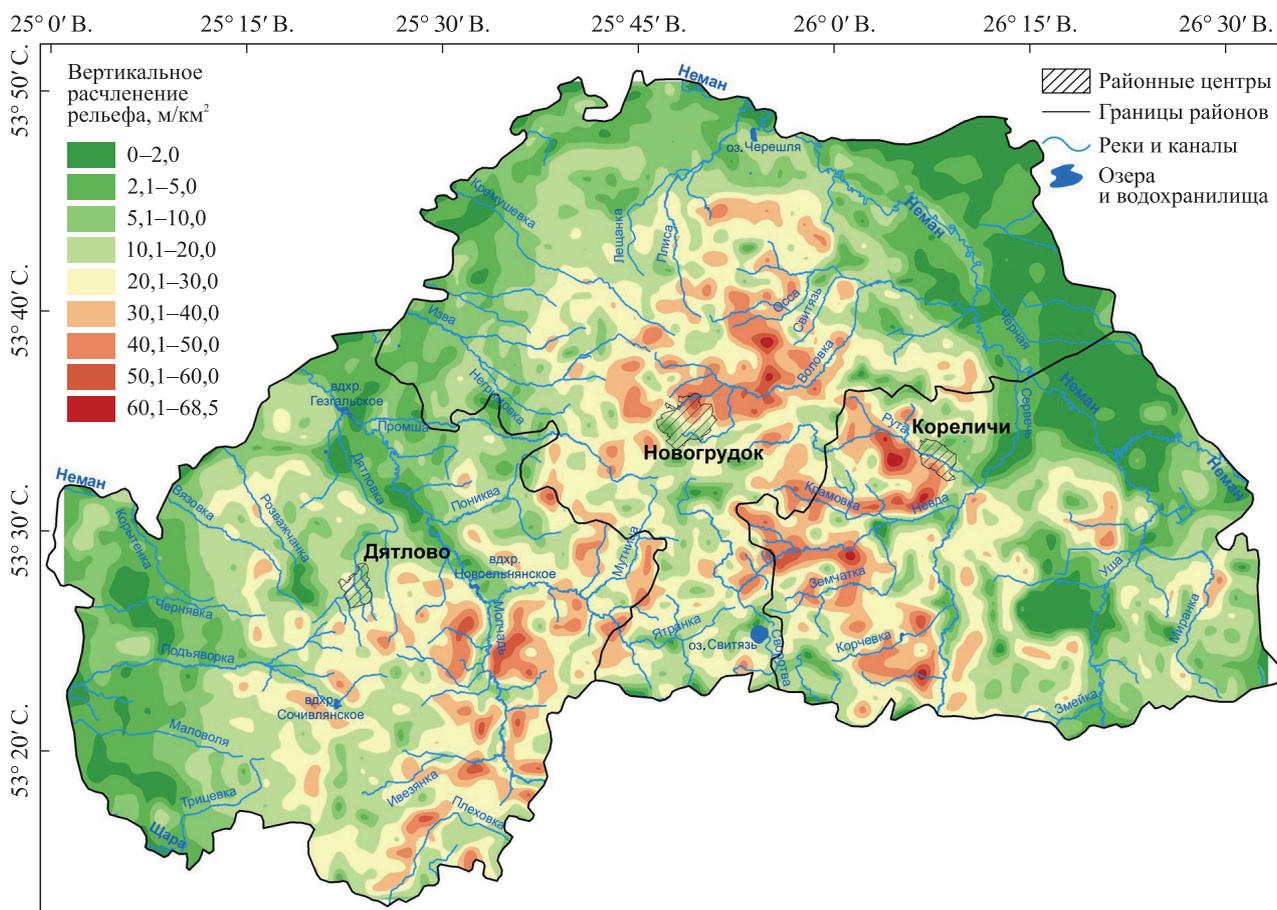


Рис. 1. Картограмма вертикального расчленения рельефа Новогрудской возвышенности

Fig. 1. Map-scheme of the vertical dissection of the relief of the Novogrudok Upland

Сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах при уклоне более $0,4–0,5^\circ$ классифицированы как луговые. Луговые земли при уклоне менее $0,07^\circ$ и вертикальном расчленении рельефа менее 2 м/км^2 отнесены к сельскохозяйственным землям на гидроморфных почвах, земли под болотами с вертикальным расчленением рельефа более 7 м/км^2 и средним значением вегетационного индекса NDVI свыше 0,35 – к луговым землям на автоморфных и полугидроморфных почвах. Луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах при уклоне более $1,0–1,5^\circ$ и значении вегетационного индекса NDVI менее 0,24–0,26 (по данным космических снимков «Landsat») с большой долей вероятности могут быть идентифицированы как пахотные земли.

Новогрудский и Дятловский районы имеют более высокий удельный вес лесных земель на автоморфных и полугидроморфных почвах по сравнению с пахотными землями на автоморфных и полугидроморфных почвах, а для Кореличского района характерно преобладание пахотных земель. Изучаемая территория отличается низкой долей водных объектов, которые занимают лишь 0,42–0,49 % от общей площади возвышенности, и самыми значимыми из них являются озера Свитязь, Черешля, водохранилища Новоельнянское и Гезгалское. Данные карт *OpenStreetMap* дополнительно использовались для выделения сельских населенных пунктов. С 1986 по 2009 г. площадь населенных пунктов немного уменьшилась (с 8,2 до 7,5 %), а к 2019 г. сокращение площади этой группы земель почти прекратилось, что обусловлено расширением застройки в таких городах, как Новогрудок, Кореличи и Дятлово (рис. 2).

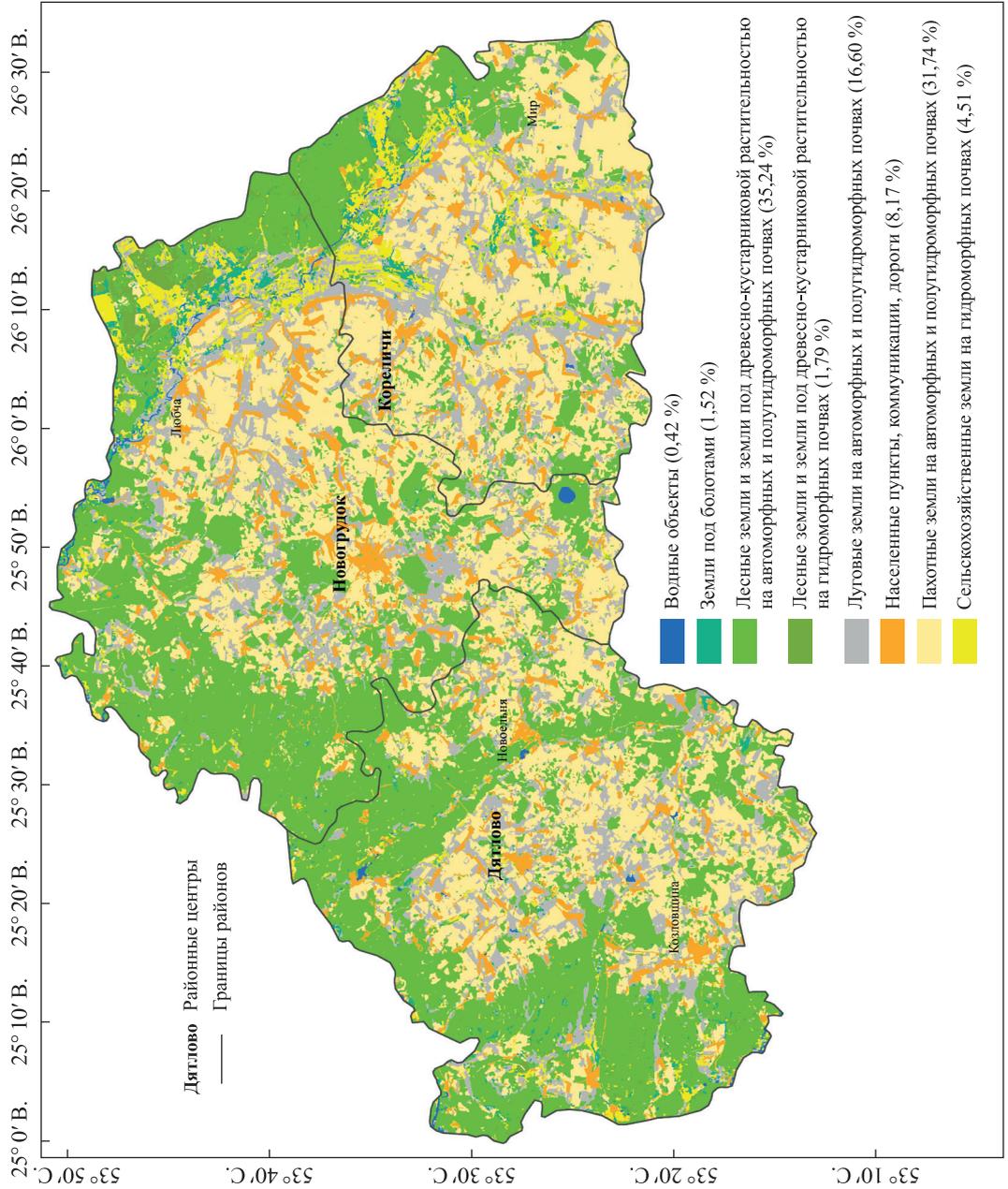


Рис. 2. Структура земельного покрытия Новоградской возвышенности в 1986 г. на основе космического снимка «Landsat-5». В скобках указана доля земельного покрытия от общей площади Новоградской возвышенности

Fig. 2. The structure of the land cover of the Novogradok Upland in 1986 based on «Landsat-5» satellite image. The share of land cover class from the total area of the Novogradok Upland is indicated in brackets

Количество пахотных земель на автоморфных и полугидроморфных почвах увеличилось с 31,7 % в 1986 г. до 32,9 % в 2000 г. (табл. 1), но к 2009 г. произошло сокращение площади пахотных земель, что определяется преимущественно переводом низкопродуктивных, по результатам кадастровой оценки, пахотных земель в состав луговых. К 2019 г. площадь пахотных земель снова выросла (с 30,8 % в 2009 г. до 32,9 % в 2019 г.), вероятно, за счет отнесения при классификации части улучшенных луговых земель, которые подверглись в этот период перезалужению, к пахотным.

Таблица 1

Площадь классов земельного покрытия административных районов в 1986 и 2000 гг. на основе космических снимков «Landsat-5» и «Landsat-7» соответственно, га

Table 1

Area of land cover classes for key districts in 1986 and 2000 based on «Landsat-5» and «Landsat-7» satellite images, respectively, ha

Класс земельного покрытия	Дятловский район		Кореличский район		Новогрудский район	
	1986 г.	2000 г.	1986 г.	2000 г.	1986 г.	2000 г.
Водные объекты	495,03	522,80	289,77	371,17	972,81	952,40
Земли под болотами	1795,98	2284,44	1887,57	3046,52	2770,31	3789,85
Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах	66 839,08	63 745,06	20 441,72	20 494,50	62 021,20	60 618,67
Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах	1675,55	2702,85	1193,08	635,79	4730,42	4048,93
Луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах	23 038,35	22 066,17	21 089,32	22 540,42	26 200,66	24 325,04
Населенные пункты, коммуникации, дороги	11 805,46	11 409,54	9245,26	9258,89	13 593,51	13 251,68
Пахотные земли на автоморфных и полугидроморфных почвах	43 733,16	46 773,36	44 280,42	42 809,79	46 489,14	49 711,40
Сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах	3091,60	2963,63	8033,70	7296,58	7975,08	8046,73

Земли под пашней и улучшенными лугами на гидроморфных почвах сконцентрированы преимущественно в северной и западной перифериях возвышенности, а также в нижнем течении р. Сервечи, и удельный вес данного класса объектов сократился с 4,5 % в 1986 г. до 3,3 % в 2019 г., что обусловлено снижением эффективности использования в сельском хозяйстве осушенных торфяно-болотных почв из-за уменьшения мощности торфяного горизонта (рис. 3).

В северной части возвышенности (Новогрудский район) зафиксировано большинство площадей луговых земель на автоморфных и полугидроморфных почвах, они приурочены к речной долине р. Неман. В ее юго-западной части (Дятловский район) выявлена устойчивая тенденция уменьшения площади луговых земель (с 23,0 тыс. га в 1986 г. до 17,9 тыс. га в 2019 г.), так как часть улучшенных луговых земель с более высоким баллом кадастровой оценки были переведены в состав пахотных, а также произошло зарастание малопродуктивных небольших участков естественных луговых земель древесно-кустарниковой растительностью. Около 1,5–2,1 % возвышенности занимают земли под болотами, что обусловлено довольно высоким гипсометрическим уровнем территории, в основном они представлены небольшими участками в поймах рек (см. рис. 3).

Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах широко распространены на территории Новогрудской возвышенности, но при этом заметна дифференциация между районами: в Кореличском районе они занимают около 21,6 % от общей площади, а в Дятловском районе – 47,5 % (рис. 4). В течение всего исследуемого периода этот класс объектов имел тенденцию к росту (табл. 2).

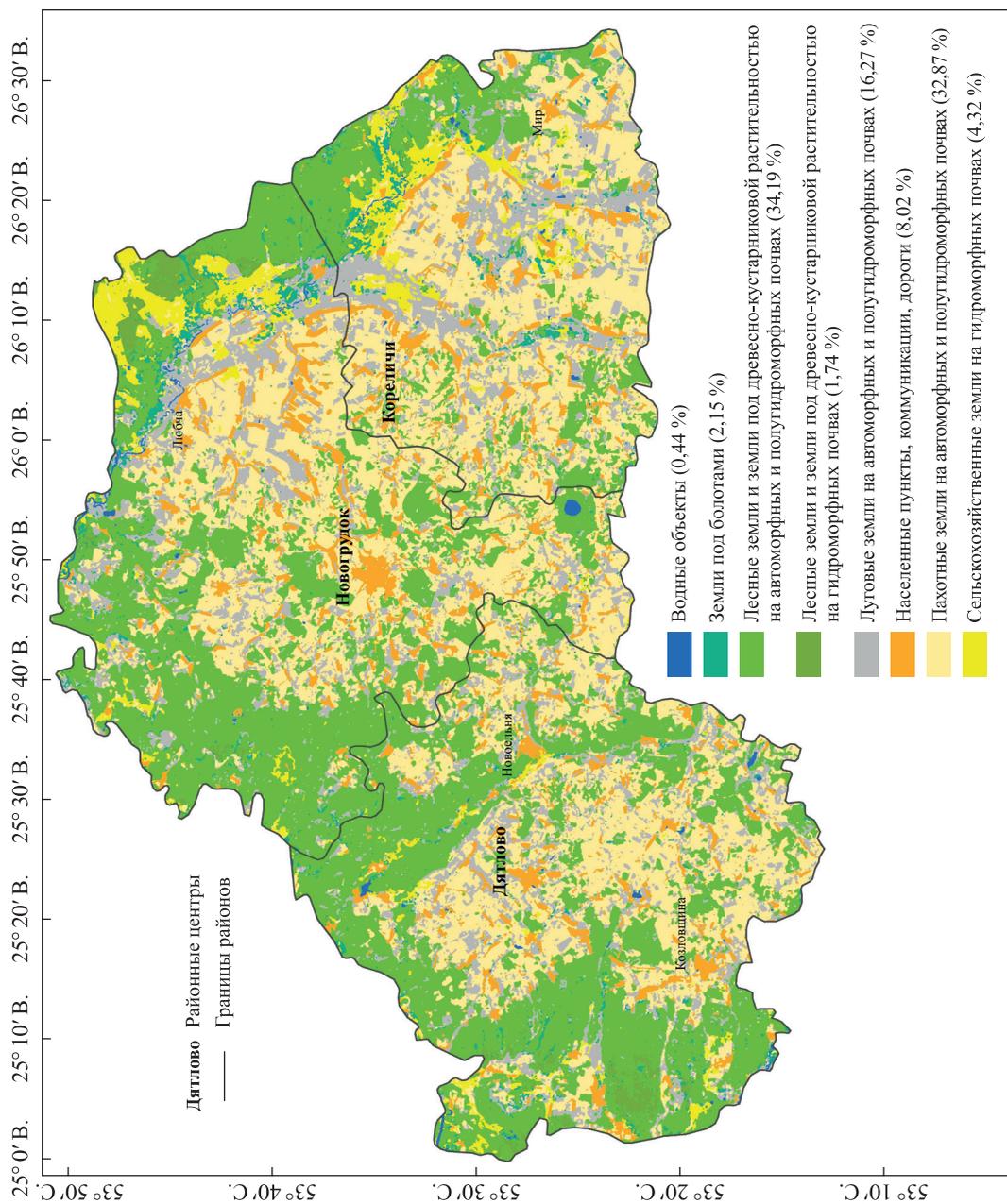


Рис. 3. Структура земельного покрытия Новогрудской возвышенности в 2000 г. на основе космического снимка «Landsat-7».

В скобках указана доля класса земельного покрытия от общей площади Новогрудской возвышенности

Fig. 3. The structure of the land cover of the Novogrudok Upland in 2000 based on «Landsat-7» satellite image.

The share of land cover class from the total area of the Novogrudok Upland is indicated in brackets

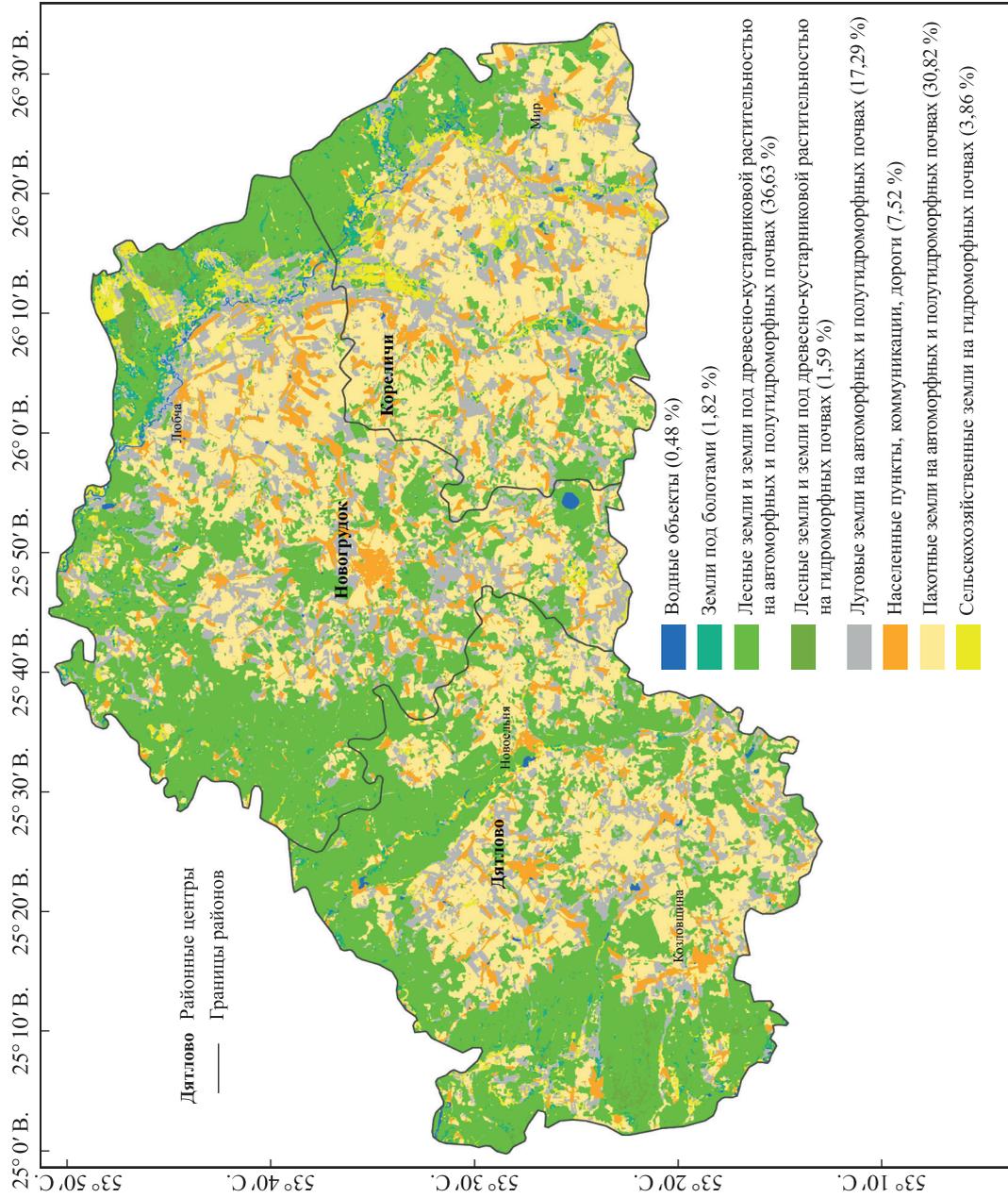


Рис. 4. Структура земельного покрытия Новоградской возвышенности в 2009 г. на основе космического снимка «Landsat-5».

Fig. 4. The structure of the land cover of the Novogradok Upland in 2009 based on «Landsat-5» satellite image.

The share of land cover class from the total area of the Novogradok Upland is indicated in brackets

Таблица 2

Площадь классов земельного покрытия административных районов в 2009 и 2019 гг.
на основе космических снимков «Landsat-5» и «Sentinel-2» соответственно, га

Table 2

Area of land cover classes for key districts in 2009 and 2019
based on «Landsat-5» and «Sentinel-2» satellite images, respectively, ha

Класс земельного покрытия	Дятловский район		Кореличский район		Новогрудский район	
	2009 г.	2019 г.	2009 г.	2019 г.	2009 г.	2019 г.
Водные объекты	544,61	326,71	451,34	164,34	1016,10	715,08
Земли под болотами	1769,77	1215,44	2272,14	1436,04	3659,05	2478,29
Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах	69 789,23	72 494,73	21 849,26	22 946,68	63 546,49	66 133,29
Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах	2287,50	3118,84	722,94	1483,91	3716,63	4693,62
Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на овражно-балочной сети*	–	198,85	–	1001,56	–	642,95
Луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах	20 203,84	17 876,01	21 688,25	17 652,68	31 371,40	24 270,14
Населенные пункты, коммуникации, дороги	10 126,55	9261,90	9144,97	9096,94	12 585,76	13 209,84
Пахотные земли на автоморфных и полугидроморфных почвах*	44 368,25	40 123,73	44 176,85	42 011,65	42 033,72	40 491,42
Пахотные земли на эродированных почвах	–	4493,06	–	5541,71	–	6579,03
Сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах	3387,32	3395,43	6156,93	5142,09	6824,44	5565,62

Примечание. Знаком * отмечены классы земельного покрытия, выделенные только на основе космического снимка «Sentinel-2».

При выполнении автоматизированного дешифрирования мозаики космических снимков «Sentinel-2» с применением данных о морфометрии рельефа и вегетационного индекса NDVI дополнительно были определены два класса объектов. Так, пахотные земли на эродированных почвах отличаются заметным уклоном (обычно более 2°), существенным вертикальным расчленением рельефа (более 25 м/км²) и значением вегетационного индекса NDVI менее 0,6. Данный класс объектов составляет около 3,9 % от общей площади Новогрудской возвышенности и заметно реже встречается на ее западных склонах, чем на восточных. Еще большими значениями вертикального расчленения рельефа (более 33 м/км²) и среднего уклона (более 2,7°) характеризуются лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на овражно-балочной сети (рис. 5).

Для оценки точности следует конвертировать отредактированные векторные результаты дешифрирования в растровый формат. Матрица ошибок рассчитана в среде ArcGIS (версия 10.7) с использованием инструмента вычислить матрицу несоответствий. Оценка точности результата автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли за 2019 г. проведена на основе 225 произвольно выбранных пунктов с применением сведений геопортала земельно-информационной системы⁴ и базы данных «Торфяники Беларуси»⁵, а также районных почвенных карт (см. рис. 5).

Общая точность составила 80,4 %, а к-коэффициент Коэна – 0,756. Наибольшие значения пользовательской и производственной точности (80 % и более) характерны для водных объектов, лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах, пахотных земель на автоморфных и полугидроморфных почвах, а также для населенных пунктов, коммуникаций и дорог (табл. 3).

⁴Открытые данные [Электронный ресурс] // Геопортал земельно-информационной системы. URL: <https://gismap.by/next/> (дата обращения: 28.06.2023).

⁵База данных «Торфяники Беларуси» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.peatlands.by/> (дата обращения: 29.06.2023).

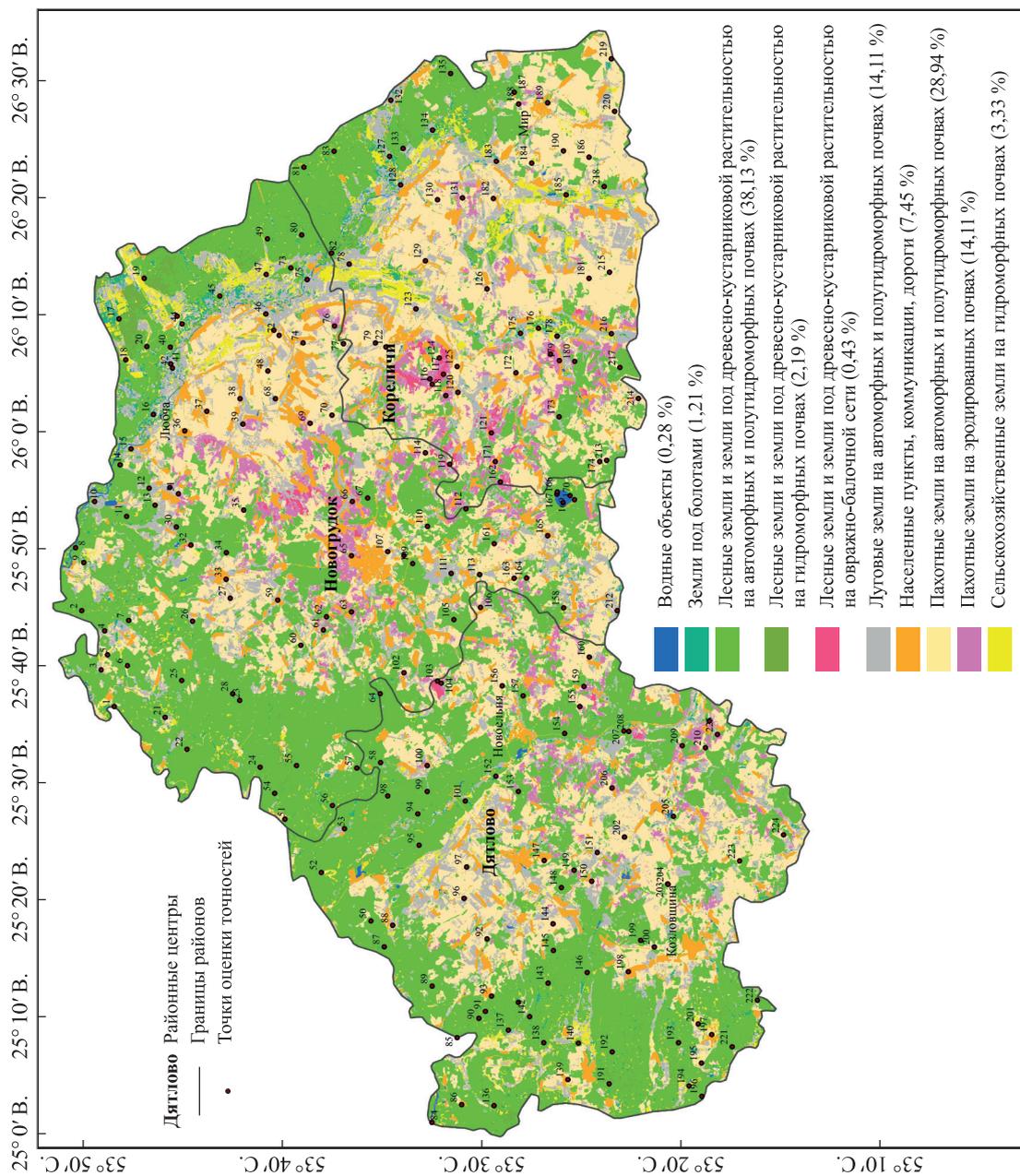


Рис. 5. Структура земельного покрытия Новоградской возвышенности в 2019 г. на основе мозаики космических снимков «Sentinel-2».

В скобках указана доля класса земельного покрытия от общей площади Новоградской возвышенности

Fig. 5. The structure of the land cover of the Novogradok Upland in 2019 based on a mosaic of «Sentinel-2» satellite images.

The share of land cover class from the total area of the Novogradok Upland is indicated in brackets

Таблица 3

Матрица ошибок результата автоматизированного дешифрирования мозаики космических снимков «Sentinel-2» в 2019 г.

Table 3

Error matrix of the result of automated interpretation of a mosaic of «Sentinel-2» satellite images in 2019

Показатели	Показатели												
	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5	Класс 6	Класс 7	Класс 8	Класс 9	Класс 10	Суммарное значение	Пользовательская точность	к-Коэффициент Коэна
Класс 1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	1	0
Класс 2	0	5	1	1	0	0	0	0	0	2	9	0,556	0
Класс 3	0	1	67	2	1	0	0	0	0	1	72	0,931	0
Класс 4	0	1	3	6	0	0	0	0	0	0	10	0,600	0
Класс 5	0	0	3	0	6	0	0	0	0	0	9	0,667	0
Класс 6	0	0	2	1	0	16	0	6	1	1	27	0,593	0
Класс 7	0	0	1	0	0	0	12	1	0	0	14	0,857	0
Класс 8	0	0	1	0	0	6	0	44	2	1	54	0,815	0
Класс 9	0	0	0	0	0	0	0	3	7	0	10	0,700	0
Класс 10	0	0	2	0	0	0	0	0	0	8	10	0,800	0
Суммарное значение	10	7	80	10	7	22	12	54	10	13	225	0	0
Производственная точность	1	0,714	0,838	0,600	0,857	0,727	1	0,815	0,700	0,615	0	0,804	0
к-Коэффициент Коэна	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,756

Примечание. Класс 1 – водные объекты; класс 2 – земли под болотами; класс 3 – лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах; класс 4 – лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах; класс 5 – лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на овражно-балочной сети; класс 6 – луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах; класс 7 – населенные пункты, коммуникации, дороги; класс 8 – пахотные земли на автоморфных и полугидроморфных почвах; класс 9 – пахотные земли на эродированных почвах; класс 10 – сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах.

Следует отметить, что структура классов земельного покрытия заметно отличается в рамках сельсоветов. Достаточно высокий удельный вес населенных пунктов, коммуникаций и дорог характерен для Новоельнянского (42,1 %) и Негневичского (24,5 %) сельсоветов, что в первом случае обусловлено расположением г. п. Новоельня в пределах небольшого по площади сельсовета, а во втором случае – высокой плотностью сельского населения.

Сельскохозяйственная освоенность имеет широкий диапазон значений (от 20,9 % в Петревичском сельсовете до 83,2 % в Турецком сельсовете), что связано с заметными различиями в уровне плодородия почв. Для трех сельсоветов, расположенных в северо-западной части Новогрудской возвышенности, характерен высокий (более 62 %) удельный вес лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью. Пахотные земли на автоморфных и полугидроморфных почвах, в том числе эродированных, составляют более 50 % от площади шести сельсоветов (в Воробьевичском сельсовете значение данного показателя достигает 65,6 %). Луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах в основном занимают порядка 10–20 % от площади сельсоветов, а более высокие значения данного показателя характерны для Щорсовского сельсовета, в пределах которого расположен крупный участок речной долины р. Неман, и четырех сельсоветов Кореличского района с очень высокой сельскохозяйственной освоенностью территории (более 75 %) (рис. 6).

Любчанский сельсовет выделяется наибольшим удельным весом лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах и земель под болотами (9,7 и 4,9 % соответственно) по сравнению с другими сельсоветами, что обусловлено особенностями рельефа. Сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах представлены в основном вдоль речных долин рек Сервечи и Неман, они характеризуются достаточно низким удельным весом (для большей части сельсоветов доля таких земель составляет менее 3 %), и только для четырех сельсоветов данный показатель равняется 8,6–9,4 %.

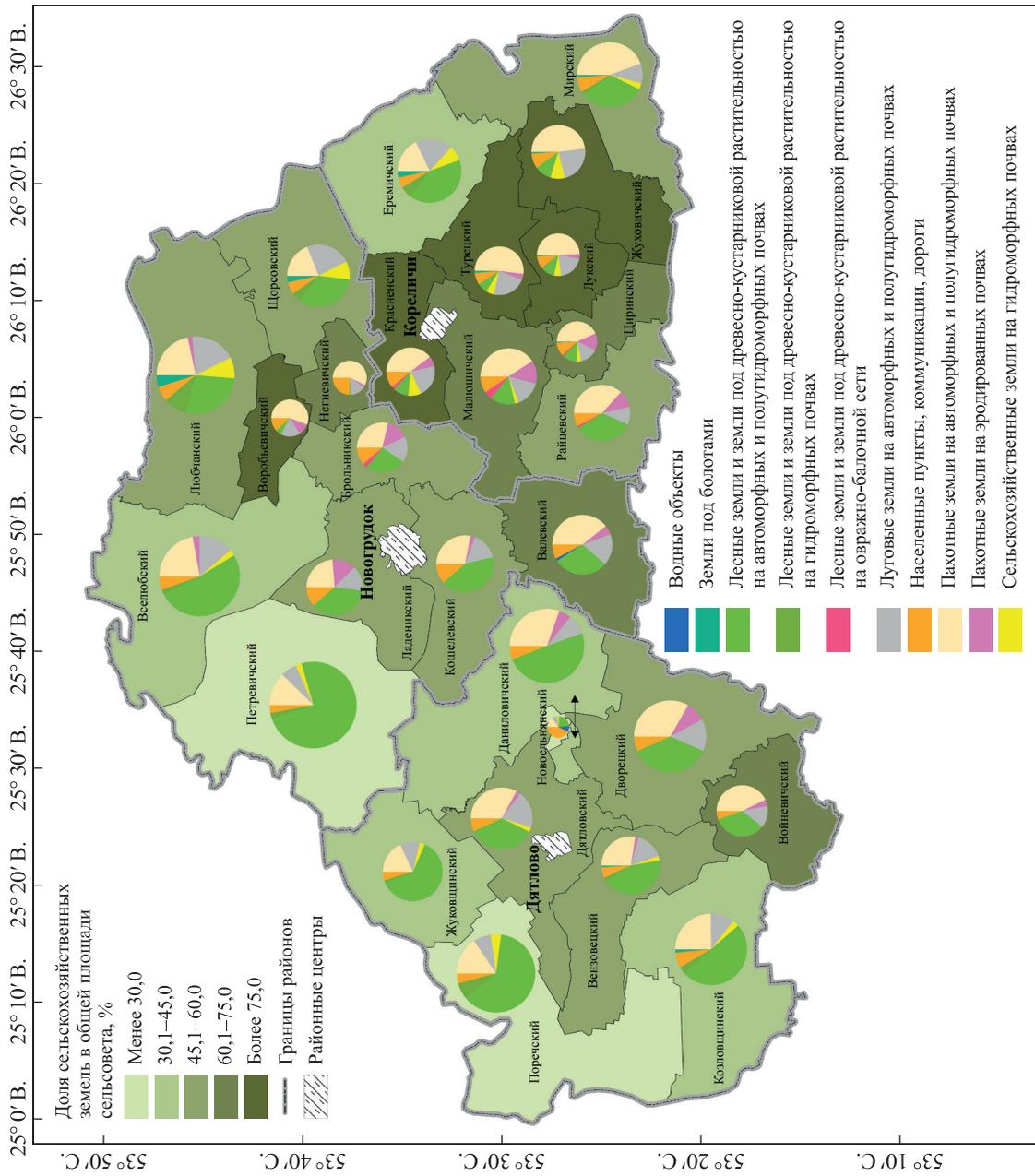


Рис. 6. Картодиаграмма структуры классов земельного покрытия Новогрудкой возвышенности по сельсоветам в 2019 г. на основе космического снимка «Sentinel-2»

Fig. 6. Map-diagram of the land of the selsoviets of the Novogrudok Upland in 2019 based on «Sentinel-2» satellite image

Заключение

Анализ особенностей структуры классов земельного покрытия трех административных районов Новогрудской возвышенности проведен на основе автоматизированного дешифрирования космических снимков в программном комплексе *ENVI* (версия 5.3), применения авторской модели геообработки в программном пакете *ModelBuilder* и различных инструментов в среде *ArcGIS* (версия 10.7). Информация о морфометрических показателях рельефа и вегетационном индексе NDVI может использоваться для повышения общей точности результатов автоматизированного дешифрирования в векторном формате. Показано, что между отдельными административными районами имеются различия, особенно по доле лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью. Применение ГИС-технологий заметно ускоряет выполнение расчетов, полученных на основе итоговых результатов дешифрирования в векторном формате. Именно применение указанных технологий позволило выявить и математически формализовать тренды изменений земельного покрытия, например рост доли лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью, уменьшение удельного веса сельскохозяйственных земель на гидроморфных почвах, снижение доли луговых земель с 2009 по 2019 г. Использование мозаики космических снимков «Sentinel-2», которая имеет более высокое пространственное разрешение по сравнению с космическими снимками «Landsat» (10 и 30 м соответственно), позволило выделить не только восемь классов земельного покрытия, но и определить участки овражно-балочной сети, а также контуры пахотных земель, подверженных водной эрозии, что имеет важное значение для изучения структуры земельного покрытия с учетом влияния на него рельефа.

Библиографические ссылки

1. Feranec J, Jaffrain G, Soukup T, Hazeu G. Determining changes and flows in European landscapes 1990–2000 using CORINE Land Cover data. *Applied Geography*. 2010;30(1):19–35. DOI: 10.1016/j.apgeog.2009.07.003.
2. Homer C, Dewitz JA, Limin Yang L, Danielson P, Xian G, Coulston JW, et al. Completion of the 2011 National Land Cover Database for the conterminous United States – representing a decade of land cover change information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2015;81(5):345–354. DOI: 10.14358/PERS.81.5.345.
3. Polykretis C, Alexakis DD, Grillakis MG, Manoudakis S. Assessment of intra-annual and inter-annual variabilities of soil erosion in Crete Island (Greece) by incorporating the dynamic «Nature» of R- and C-factors in RUSLE modeling. *Remote Sensing*. 2020;12(15):2439. DOI: 10.3390/rs12152439.
4. Sujatha ER, Sridhar V. Spatial prediction of erosion risk of a small mountainous watershed using RUSLE: a case-study of the Palar sub-watershed in Kodaikanal, South India. *Water*. 2018;10(11):1608. DOI: 10.3390/w10111608.
5. Phiri D, Simwanda M, Salekin S, Nyirenda VR, Murayama Y, Ranagalage M. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: a review. *Remote Sensing*. 2020;12(14):2291. DOI: 10.3390/rs12142291.
6. Rujoiu-Mare M-R, Olariu B, Mihai B-A, Nistor C, Savulescu I. Land cover classification in Romanian Carpathians and Subcarpathians using multi-date Sentinel-2 remote sensing imagery. *European Journal of Remote Sensing*. 2017;50(1):496–508. DOI: 10.1080/22797254.2017.1365570.
7. Hongrui Zheng, Peijun Du, Jike Chen, Junshi Xia, Erzhu Li, Zhigang Xu, et al. Performance evaluation of downscaling Sentinel-2 imagery for land use and land cover classification by spectral-spatial features. *Remote Sensing*. 2017;9(12):1274. DOI: 10.3390/rs9121274.
8. Phan Thanh Noi, Kappas M. Comparison of random forest, k-nearest neighbor, and support vector machine classifiers for land cover classification using Sentinel-2 imagery. *Sensors*. 2018;18(1):18. DOI: 10.3390/s18010018.
9. Phiri D, Morgenroth J. Developments in Landsat land cover classification methods: a review. *Remote Sensing*. 2017;9(9):967. DOI: 10.3390/rs9090967.
10. Hansen MC, Loveland TR. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*. 2012;122:66–74. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.024.
11. Яновский АА. Дистанционное разделение осушенных торфяных и деградированных торфяных почв Полесья пороговой обработкой спектральных данных. *Природопользование*. 2017;31:105–112.
12. Ничипорович ЗА, Ракович ВА, Каждан ЕН. Дистанционная диагностика состояния и динамики повторно заболочиваемых выработанных торфяных месторождений. *Природопользование*. 2013;23:94–99.
13. Мышлякоў СГ. Картаграфаванне пасаваў сельскагаспадарчых культур па касмічных здымках для ўнутрыгаспадарчага землеўпарадкавання і аўтарскага нагляду. *Земля Беларусі*. 2012;1:52–56. EDN: WCBUDV.
14. Скачкова АС, Курлович ДМ. Природно-антропогенные ландшафты Белорусской возвышенной провинции: классификация, пространственная структура, районирование. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2017;1:3–13. EDN: XYRAGD.
15. Ольшевский АВ. Разработка геоинформационной модели автоматизированной классификации многозональных космических снимков. *Земля Беларусі*. 2013;1:36–39. EDN: TRKVHP.
16. Горбачёва ЕН. Применение универсального уравнения потерь почвы от эрозии (RUSLE) при оценке интенсивности водно-эрозионных процессов на основе ГИС. *Почвоведение и агрохимия*. 2011;2:42–51. EDN: XYMPBV.
17. Phillips LB, Hansen AJ, Flather CH. Evaluating the species energy relationship with the newest measures of ecosystem energy: NDVI versus MODIS primary production. *Remote Sensing of Environment*. 2008;112(12):4381–4392. DOI: 10.1016/j.rse.2008.08.001.
18. Yengoh GT, Dent D, Olsson L, Tengberg AE, Tucker III CJ. *Use of the normalized difference vegetation index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: current status, future trends, and practical considerations*. Cham: Springer; 2015. 80 p. (Springer briefs in environmental science series). DOI: 10.1007/978-3-319-24112-8.

19. Мороз ВА. Оценка эффективности землепользования на основе анализа вегетационных индексов (на примере модельных полигонов Брестского Полесья). *Природные ресурсы*. 2018;2:5–13.
20. Гусев АП. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции). *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. 2020; 1:101–107. DOI: 10.17308/geo.2020.1/2667.
21. Кислицын ДА. Особенности генерализации результатов автоматизированного дешифрирования в ArcGIS и ENVI. В: Домась АС, Шкуратова НВ, Левковская МВ, редакторы. *Мониторинг и охрана окружающей среды. Материалы Республиканской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов; 22 марта 2023 г.; Брест, Беларусь*. Брест: Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина; 2023. с. 78–80.
22. Курлович ДМ. Морфометрический ГИС-анализ рельефа Беларуси. *Земля Беларуси*. 2013;4:42–48. EDN: WCBUNV.
23. Клебанович НВ, Кислицын ДА. Анализ особенностей почвенно-растительного покрова на основе данных дистанционного зондирования (на примере ключевых районов Брестского Полесья). *Вестник Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5, Біялогія. Навукі аб Зямлі*. 2022;1:59–66.

References

1. Feranec J, Jaffrain G, Soukup T, Hazeu G. Determining changes and flows in European landscapes 1990–2000 using CORINE Land Cover data. *Applied Geography*. 2010;30(1):19–35. DOI: 10.1016/j.apgeog.2009.07.003.
2. Homer C, Dewitz JA, Limin Yang L, Danielson P, Xian G, Coulston JW, et al. Completion of the 2011 National Land Cover Database for the conterminous United States – representing a decade of land cover change information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2015;81(5):345–354. DOI: 10.14358/PERS.81.5.345.
3. Polykretis C, Alexakis DD, Grillakis MG, Manoudakis S. Assessment of intra-annual and inter-annual variabilities of soil erosion in Crete Island (Greece) by incorporating the dynamic «Nature» of R- and C-factors in RUSLE modeling. *Remote Sensing*. 2020;12(15):2439. DOI: 10.3390/rs12152439.
4. Sujatha ER, Sridhar V. Spatial prediction of erosion risk of a small mountainous watershed using RUSLE: a case-study of the Palar sub-watershed in Kodaikanal, South India. *Water*. 2018;10(11):1608. DOI: 10.3390/w10111608.
5. Phiri D, Simwanda M, Salekin S, Nyirenda VR, Murayama Y, Ranagalage M. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: a review. *Remote Sensing*. 2020;12(14):2291. DOI: 10.3390/rs12142291.
6. Rujoiu-Mare M-R, Olariu B, Mihai B-A, Nistor C, Savulescu I. Land cover classification in Romanian Carpathians and Subcarpathians using multi-date Sentinel-2 remote sensing imagery. *European Journal of Remote Sensing*. 2017;50(1):496–508. DOI: 10.1080/22797254.2017.1365570.
7. Hongrui Zheng, Peijun Du, Jike Chen, Junshi Xia, Erzhu Li, Zhigang Xu, et al. Performance evaluation of downscaling Sentinel-2 imagery for land use and land cover classification by spectral-spatial features. *Remote Sensing*. 2017;9(12):1274. DOI: 10.3390/rs9121274.
8. Phan Thanh Noi, Kappas M. Comparison of random forest, k-nearest neighbor, and support vector machine classifiers for land cover classification using Sentinel-2 imagery. *Sensors*. 2018;18(1):18. DOI: 10.3390/s18010018.
9. Phiri D, Morgenroth J. Developments in Landsat land cover classification methods: a review. *Remote Sensing*. 2017;9(9):967. DOI: 10.3390/rs9090967.
10. Hansen MC, Loveland TR. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*. 2012;122:66–74. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.024.
11. Yanovskiy AA. The remote separation of drained peat and the degraded peat soils of Polesia by spectral reflectance thresholding. *Prirodopol'zovanie*. 2017;31:105–112. Russian.
12. Nichiporovich ZA, Rakovich VA, Kazhdan EN. Remote diagnostics of a condition and dynamics of rebogged cutover peat deposits. *Prirodopol'zovanie*. 2013;23:94–99. Russian.
13. Myshliakov SG. Mapping of crops using satellite images for land management and designer's supervision. *Zemlya Belarusi*. 2012;1:52–56. Belarusian. EDN: WCBUDV.
14. Skachkova AS, Kurlovich DM. Natural-anthropogenic landscapes of Belarusian elevated province: classification, spatial structure, zoning. *Journal of Belarusian State University. Geography. Geology*. 2017;1:3–13. Russian. EDN: XYPAGD.
15. Olshevsky AV. GIS model of the automated classification of multispectral satellite images. *Zemlya Belarusi*. 2013;1:36–39. Russian. EDN: TRKVHP.
16. Gorbacheva EN. RUSLE model implementation for estimation intensity of water erosion processes on Belarusian soil cover. *Soil Science and Agrochemistry*. 2011;2:42–51. Russian. EDN: XYMPBB.
17. Phillips LB, Hansen AJ, Flather CH. Evaluating the species energy relationship with the newest measures of ecosystem energy: NDVI versus MODIS primary production. *Remote Sensing of Environment*. 2008;112(12):4381–4392. DOI: 10.1016/j.rse.2008.08.001.
18. Yengoh GT, Dent D, Olsson L, Tengberg AE, Tucker III CJ. *Use of the normalized difference vegetation index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: current status, future trends, and practical considerations*. Cham: Springer; 2015. 80 p. (Springer briefs in environmental science series). DOI: 10.1007/978-3-319-24112-8.
19. Maroz VA. Valuation of the effectiveness of land use based on the analysis of vegetation indices (on the example of Brest Polesye's model polygons). *Natural Resources*. 2018;2:5–13. Russian.
20. Gusev AP. NDVI changes as an indicator of the dynamics of the ecological state of landscapes (on the example of the Eastern Part of the Polesie Province). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2020;1:101–107. Russian. DOI: 10.17308/geo.2020.1/2667.
21. Kislitsyn DA. [Features of generalization of results of automated interpretation in ArcGIS and ENVI]. In: Domas' AS, Shkuratova NV, Levkovskaya MV, editors. *Monitoring i okhrana okruzhayushchei sredy. Materialy Respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov; 22 marta 2023 g.; Brest, Belarus* [Monitoring and environmental protection. Proceedings of the Republican scientific and practical conference of students, undergraduates, postgraduate students; 2023 March 22; Brest, Belarus]. Brest: Brest State A. S. Pushkin University; 2023. p. 78–80. Russian.
22. Kurlovich DM. Morphometric GIS-analysis of landforms of Belarus. *Zemlya Belarusi*. 2013;4:42–48. Russian. EDN: WCBUNV.
23. Klebanovich NV, Kislitsyn DA. Analysis of soil and vegetation cover features on the remote sensing data (by the example of the Brest Polesye's key districts). *Vesnik of Brest University. Series 5, Biology. Sciences about Earth*. 2022;1:59–66. Russian.

УДК 528.85:552.578(476)

КАРТИРОВАНИЕ ГЕОФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР РАЗГРУЗКИ ГЛУБИННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

В. Н. ГУБИН¹⁾

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

Аннотация. В инновационном развитии нефтегазовой геологии осадочных бассейнов древних платформ актуальность приобретает комплексный анализ данных дистанционного зондирования Земли из космоса и сейсмогеологической информации при поисках глубинной нефти с позиций абиогенно-мантийного генезиса углеводородов. В целях повышения эффективности геолого-разведочных работ на нефть особое внимание уделяется установлению связи нефтегазоносности с мантийными очагами генерации углеводородных флюидов и зонами их локализованной разгрузки в земной коре. В результате структурно-тектонической интерпретации космической информации и данных сейсморазведки достигается возможность картирования геофлюидодинамических структур разгрузки глубинных углеводородов в осадочном чехле, что позволяет в пределах отдельных площадей нефтегазоносных бассейнов выявить нефтеперспективные участки и тем самым способствует проведению поисковых работ на нефть.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли; данные сейсморазведки; геофлюидодинамические структуры; глубинные разломы; кольцевые структуры; новейшая геодинамика; вертикальная миграция углеводородных флюидов; нефтеперспективные структуры; зоны нефтегазоаккумуляции; залежи нефти.

Образец цитирования:

Губин В.Н. Картирование геофлюидодинамических структур разгрузки глубинных углеводородов по данным дистанционного зондирования Земли и сейсморазведки. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;1:141–155.
EDN: XSPSJW

For citation:

Gubin VN. Mapping of geofluidodynamic structures of unloading of deep hydrocarbons according to remote sensing and seismic data. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;1:141–155. Russian.
EDN: XSPSJW

Автор:

Валерий Николаевич Губин – доктор географических наук, профессор; профессор кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики.

Author:

Valery N. Gubin, doctor of science (geography), full professor; professor at the department regional geology, faculty of geography and geoinformatics.
vngubin@mail.ru

Благодарность. Статья выполнена в рамках научно-технической программы Союзного государства «Разработка базовых элементов орбитальных и наземных средств в интересах создания многоспутниковых группировок малоразмерных космических аппаратов наблюдения земной поверхности и околоземного космического пространства» («Комплекс-СГ») на 2023–2026 гг. (задание «Разработать технологию геодинимического мониторинга территории при прогнозировании и освоении месторождений нефти на основе данных дистанционного зондирования Земли») (№ гос. регистрации 20230708; договор от 27 марта 2023 г. № А57/65).

MAPPING OF GEOFLUIDODYNAMIC STRUCTURES OF UNLOADING OF DEEP HYDROCARBONS ACCORDING TO REMOTE SENSING AND SEISMIC DATA

V. N. GUBIN^a

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

Abstract. In the innovative development of oil and gas geology of sedimentary basins of ancient platforms, a complex analysis of Earth remote sensing data from space and geological and geophysical information in the search for deep oil from the standpoint of the abiogenic-mantle genesis of hydrocarbons is of particular relevance. In order to increase the efficiency of geological exploration for oil, special attention is paid to identifying the relationship of oil and gas content with mantle foci of generation of hydrocarbon fluids and zones of their localised discharge in the Earth's crust. As a result of structural and tectonic interpretation of space information and seismic data, it is possible to map the geofluidodynamic structures of unloading deep hydrocarbons in the sedimentary cover. This makes it possible to identify oil-promising areas within certain areas of oil and gas basins and thereby contributes to the conduct of oil prospecting.

Keywords: remote sensing of the Earth; seismic data; geofluidodynamic structures; deep faults; ring structures; the latest geodynamics; vertical migration of hydrocarbon fluids; oil-prospective structures; oil and gas accumulation zones; oil deposits.

Acknowledgements. The article was carried out within the framework of the scientific and technical programme of the Union State «Development of basic elements of orbital and ground-based facilities in the interests of creating multi-satellite constellations of small-sized spacecraft for observing the Earth's surface and near-Earth space» («Complex-SG») for 2023–2026 (task «Develop a technology for geodynamic monitoring of the territory when forecasting and developing oil fields based on Earth remote sensing data») (state registration No. 20230708; agreement dated 27 March 2023 No. А57/65).

Введение

В нефтегазовой геологии осадочных бассейнов особое внимание уделяется созданию новых методов и технологий прогнозирования нефтегазоносности недр с позиций абиогенно-мантийного генезиса углеводородов (УВ) в целях повышения эффективности геолого-разведочных работ на нефть [1–6]. При этом важное значение имеют научно обоснованные выводы Н. А. Кудрявцева [4] о мантийно-дегазационном генезисе нефти и роли глубинных разломов в вертикальной миграции УВ-флюидов в осадочный чехол и образовании нефтегазовых месторождений. С точки зрения глубинного генезиса УВ прогноз нефтеперспективных объектов следует выполнять в зонах разломов мантийного заложения и прилегающих к ним кольцевых структурах земной коры.

При оценке перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и сейсморазведки осуществляется картирование геофлюидодинамических структур, определяющих восходящую миграцию мантийных УВ. Геофлюидодинамические структуры представляют собой активные на неотектоническом этапе (от позднего олигоцена, около 30 млн лет назад, до настоящего времени) глубинные разломы и кольцевые структуры, образующие проницаемые каналы для вертикальной миграции УВ-флюидов из верхней мантии в осадочную толщу земной коры.

Сегодня важную роль играет картирование геофлюидодинамических структур на основе комплексной интерпретации космоструктурной и сейсмогеологической информации в Припятском нефтегазовом бассейне (НГБ), где открыто 93 месторождения нефти. Годовая добыча УВ составляет порядка 1,8 млн т. Промышленные месторождения нефти связаны с подсолевыми терригенным и карбонатным, межсолевым и верхним солевым нефтеносными комплексами девонской толщи осадочного чехла. Зонами нефтегазонакопления служат приразломные поднятия, а ловушками в их пределах – блоковые, пликативно-блоковые и пликативные структуры. В отложениях вендской системы верхнего

протерозоя открыты залежи нефти на Речицкой и Тишковской площадях Речицко-Вишанской зоны нефтегазоаккумуляции.

Выявленные в Припятском НГБ залежи нефти располагаются в зонах мантийных разломов [1–3; 7; 8]. В результате сейсмогеологической интерпретации космоструктурных данных достигается возможность картирования геофлюидодинамических структур и прогнозирования нефтегазоносных участков с размещением нефтеперспективных объектов. Космоструктурное картирование играет важную роль в связи с оценкой перспектив нефтегазоносности Припятского НГБ и обоснованием дальнейших нефтепоисковых работ.

Методика исследования

Картирование глубинных разломов и кольцевых структур разгрузки мантийных УВ выполнялось на основе космической информации и данных сейсморазведки [2; 3]. При этом особое внимание уделялось прогрессивным технологиям ДЗЗ для оптимизации геолого-разведочных работ на нефть¹ [9; 10]. Выраженные в осадочном чехле листрические разломы мантийного заложения и зоны повышенной трещиноватости породных массивов проявляются на земной поверхности и космических снимках (КС) в виде линеаментов. Системы дугообразных линеаментов на КС выступают геоиндикаторами кольцевых структур, отражающих изометричные в плане структурно-вещественные неоднородности земной коры различного генезиса [11]. Активные в позднеолигоцен-четвертичное время разломы мантийного заложения и кольцевые структуры создают благоприятные условия для восходящей миграции УВ-флюидов из верхней мантии в осадочный чехол и контролируют размещение зон нефтегазоаккумуляции и месторождений нефти [3; 6; 12].

Космоструктурное картирование в Припятском НГБ выполнялось на основе структурного дешифрирования КС со спутников «Канопус-В», «Ресурс-П», «Sentinel-2В», «Landsat-8», «Spot-6» и «Spot-7» с пространственным разрешением от 30 м до нескольких метров. При прогнозировании нефтеперспективных объектов использовались также КС с Белорусского космического аппарата, оптико-электронная съемочная система которого в панхроматическом режиме позволяет получать КС в зоне электромагнитного спектра 0,54–0,86 мкм с разрешением объектов на земной поверхности 2,1 м, а в мультиспектральном режиме – в зонах электромагнитного спектра 0,46–0,52; 0,52–0,60; 0,63–0,69 и 0,75–0,84 мкм (четыре канала) с пространственным разрешением 10,5 м.

При построении космоструктурных карт выполнялись обработка и структурное дешифрирование КС на основе геоинформационного и специального программного обеспечения с использованием модулей *QGIS-GRASS*. Методические приемы обработки КС заключались в распределении изображений по близким друг к другу с точки зрения параметров яркости областям, получаемым в различных спектральных каналах [3]. Автоматически выделялись границы областей, т. е. выполнялась сегментация растровых изображений с переводом их в векторный формат с полной геодезической привязкой.

Области изображений дешифрировались на основе наземных данных, и проводилась их классификация по типам земной поверхности. При этом программой были рассчитаны сигнатуры с учетом спектральной яркости пикселей и выполнена сегментация изображений с их последующей классификацией. Такие КС отличаются значительным количеством однородных областей, занятых одним классом, они обладают достаточной информативностью для выделения линеаментных индикаторов проявлений дизъюнктивных и пликтивных дислокаций в осадочном чехле и их пространственного совмещения с сейсмическими данными.

Конечный итог обработки – получение векторной карты выделенных на местности классов с возможностью ее пространственного совмещения с цифровой моделью рельефа и сейсмогеологической информацией. Эти векторные карты использовались при картировании в пределах нефтегазоносных участков Припятского НГБ неотектонически активных глубинных разломов и кольцевых структур, определяющих восходящую миграцию мантийных УВ в осадочную толщу.

Геофлюидодинамическая интерпретация дешифрируемых на КС систем разломов и кольцевых структур в связи с прогнозом нефтеперспективных объектов выполнялась на основе данных сейсморазведки. Геологическая интерпретация сейсморазведочных материалов заключалась в привязке сейсмических границ к конкретным стратиграфическим горизонтам по скважинным данным и оценке вещественного (литологического) состава слоев по скоростной характеристике разреза и форме сейсмических сигналов. При этом осуществлялось построение сейсмогеологических разрезов по профилям, а по ним составлялись структурные карты, карты мощностей, а также выполнялись характеристика литологического расчленения разреза и прогноз нефтеперспективных объектов.

¹Межеловский Н. В. Научно-методические основы прогрессивных технологий региональных геологических исследований : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М., 1990. 40 с.

Результаты структурного дешифрирования КС сопоставлялись с временными сейсмическими разрезами, что позволило установить связь выраженных на КС линеаментов с региональными и локальными разломами, проявляющимися в смещениях волновой картины в зависимости от амплитуды нарушений. Дешифрируемые на КС кольцевые объекты, отражающие блоковые, пликативно-блоковые и пликативные структуры в верхнедевонской осадочной толще, также прослеживаются в изменениях волновой картины на сейсмических разрезах.

В Припятском НГБ при построении космоструктурных карт нефтегазоносных участков с размещением нефтесперспективных объектов в зонах мантийных разломов анализировались составленные на основе данных сейсморазведки временные сейсмические разрезы, отражающие сейсмогоризонты, и структурные карты. Выполнялся комплексный анализ существующего фактологического сейсмического материала по поверхности подсолевых терригенных отложений (отражающий горизонт IV^a), поверхности и подошве межсолевых отложений (отражающие горизонты III и III^a), поверхностям верхнесоленосной толщи и ее галитовой подтолщи (отражающие горизонты I и II).

В результате комплексной интерпретации космической и сейсмогеологической информации установлены ведущие критерии прогноза геофлюидодинамических структур в Припятском НГБ: отражение проницаемых каналов миграции глубинных УВ в новейшем структурном плане и на КС в виде зон линеаментов и отдельных сегментов кольцевых структур; связь линеаментных зон и кольцевых структур с литрическими разломами мантийного заложения, определяющими восходящую вертикальную миграцию глубинных флюидопотоков и формирование в осадочной толще земной коры зон нефтегазонакопления; повышение плотности (густоты) линеаментов в зонах мантийных разломов, выявленных методом глубинного сейсмического зондирования и методом общей глубинной точки; проявление в границах зон линеаментов и отдельных сегментов кольцевых структур участков с пониженной плотностью горных пород, уменьшенной скоростью сейсмических волн и контрастными аномалиями потенциальных геофизических полей; выраженность зон линеаментов и кольцевых структур в сейсмических горизонтах, соответствующих структурным формам в нефтеносных комплексах осадочного чехла.

Результаты и их обсуждение

С позиций тектонического районирования Припятский НГБ расположен в пределах одноименного прогиба. Здесь выделяются Северный, Центральный и Южный структурные ареалы (районы), представляющие собой тектоническую основу при обособлении зон нефтегазонакопления. При космоструктурном картировании в границах структурных ареалов Припятского прогиба установлены закономерности пространственного распределения флюидопроводящих глубинных разломов и непосредственно примыкающих к ним кольцевых структур земной коры, связанных с зонами нефтегазонакопления, месторождениями нефти и потенциальными нефтегазоносными объектами.

На различных этапах геологического развития Припятского палеорифтового бассейна разломы мантийного заложения и кольцевые структуры, являясь каналами вертикальных перетоков УВ-флюидов и их латеральной миграции, создавали благоприятную обстановку для формирования залежей нефти. В нефтегазоносных регионах в результате неотектонических движений и изменения термобарических условий очаговых зон при миграции глубинных УВ-флюидов в верхнюю часть земной коры происходят их закономерное пространственно-стратиграфическое распределение и естественная фазовая сепарация с разделением легкоподвижной газовой и жидкой фаз УВ [6]. Придерживаясь этой научной концепции, при картировании геофлюидодинамических структур в Припятском НГБ особое внимание необходимо уделять их новейшей активизации.

В размещении зон нефтегазонакопления и залежей нефти в Припятском НГБ ведущую роль играют литрические разломы мантийного заложения, имеющие значительную протяженность (до первых сотен километров). Они раскалывают земную кору и проникают в верхний слой мантии на глубину 50–60 км и более [8]. Глубинные разломы отличаются повышенными значениями распределения поля температур, обусловленными подтоком глубинного тепла, которое поступает из высокотемпературных очагов верхней мантии и влияет на тепловой режим палеорифтового бассейна.

Флюидально-газовая активизация в зонах глубинных разломов Припятского НГБ способствовала формированию залежей нефти в осадочном чехле [1; 3]. Разломы мантийного заложения создавали также геодинамические барьеры на пути миграции УВ, локализуя их в пределах структурных и неструктурных ловушек конкретных зон и участков нефтегазонакопления [7].

В позднеолигоцен-четвертичное время, как и на предшествующих этапах развития Припятского НГБ, высокой тектонической активностью отличались Северо-Припятский и Южно-Припятский глубинные суперрегиональные разломы, ограничивающие палеорифтовый бассейн, а также региональные глубинные разломы мантийного заложения (Речицко-Вишанский, Червонослободско-Малодушинский, Лоевский, Микашевичский, Малыньско-Туровский, Пержанско-Симоновичский и Первомайско-Заозерный

разломы), выраженные на КС в виде линеаментов. Мантийные разломы и приуроченные к ним кольцевые структуры определили геофлюидодинамические условия нефтегазообразования в Припятском НГБ.

В пределах Речицко-Вишанского разлома суммарные амплитуды неотектонических деформаций достигают порядка 120 м. Зоны линейных приразломных поднятий отличаются высокими градиентами современных вертикальных движений земной коры. По данным повторного высокоточного нивелирования, амплитуды деформаций здесь достигают 25–30 мм в год, что на порядок выше региональных вертикальных перемещений земной поверхности на территории Припятского НГБ в целом.

Новейшая активизация Речицко-Вишанского разлома отражается в геотермическом поле осадочного чехла. Зона разлома отличается повышенными значениями распределения поля температур, обусловленных подтоком глубинного тепла, которое поступает из высокотемпературных очагов верхней мантии и влияет на тепловой режим Припятского НГБ.

С Речицко-Вишанским разломом, испытывающим активизацию в позднеолигоцен-четвертичное время, сопряжена одноименная зона нефтегазоаккумуляции, включающая Речицкое, Осташковичское, Тишковское, Вишанское промышленные месторождения нефти и др.

Благоприятные геофлюидодинамические условия для восходящей циркуляции глубинных УВ и формирования залежей нефти создают узлы пересечения разрывных дислокаций, или кентрогенные структуры [13]. Такие участки земной коры характеризуются повышенной трещиноватостью платформенного чехла и кристаллического фундамента, а также контрастностью проявления новейших тектонических движений. В пределах кентрогенных структур возникают максимальные напряжения в литосферном пространстве и происходит интенсивная вертикальная миграция УВ-флюидов из верхней мантии в консолидируемую часть земной коры и осадочную толщу. В Припятском НГБ нефтепоисковое значение приобретают узлы пересечения разрывных дислокаций в зонах новейшей активизации Микашевичского, Мальинско-Туровского, Пержанско-Симоновичского и Первомайско-Заозерного разломов (рис. 1 и 2).

В Припятском НГБ выявлены локальные кольцевые структуры тектоногенной природы диаметром от 2–3 до 15 км. Они прилегают к неотектонически активным глубинным разломам и зонам нефтегазоаккумуляции и отражают блоковые, блоково-пликативные и пликативные структурные формы нефтеносных комплексов в верхнедевонских отложениях осадочного чехла. Кольцевые объекты нередко осложнены системами линеаментов с высокой плотностью их распределения по площади, что свидетельствует о повышенной трещиноватости отдельных участков нефтеносных структур. Оперяющие глубинные разломы трещинные зоны в пределах кольцевых структур способствуют локализованной разгрузке мантийных флюидопотоков в земной коре и образованию залежей нефти в осадочной толще [3; 5; 6]. К Речицко-Вишанскому разлому прилегают локальные кольцевые структуры, располагающиеся над нефтяными залежами в подсолевом и межсолевом комплексах верхнедевонских отложений.

Важнейшей задачей космоструктурного картирования в Припятском НГБ является выяснение геологической природы и нефтепоискового значения локальных кольцевых структур, примыкающих к промышленным месторождениям нефти или расположенных вблизи них [3]. Следует отметить, что такие участки перспективны для проведения поисковых работ на нефть, о чем говорит, например, открытие в Речицко-Вишанской зоне приразломных поднятий нефтяной залежи в районе уже действующих месторождений – Южно-Осташковичского и Южно-Тишковского.

Формирование новых залежей УВ вблизи разрабатываемых месторождений нефти, возможно, связано с подтоком глубинных УВ-флюидов в зонах региональных мантийных разломов и прилегающих к ним кольцевых структур. В пределах приподнятых и опущенных крыльев разломов залежи нефти способны образовываться в блоковых и блоково-пликативных структурных формах, испытывающих активизацию в позднеолигоцен-четвертичное время и выраженных на КС в виде локальных кольцевых объектов.

При космоструктурном картировании Припятского НГБ уделено внимание выяснению особенностей геофлюидодинамики северного сегмента Полесской кольцевой мегаструктуры (см. рис. 1 и 2), который охватывает Центральный и Южный структурные ареалы Припятского прогиба. Картирование нефтеперспективных объектов в пределах северного сегмента Полесской кольцевой мегаструктуры земной коры базируется на флюидодинамической концепции формирования залежей УВ. Этот факт позволяет предположить, что кольцевые линеаменты мегаструктуры мантийного заложения контролируют вертикальную миграцию флюидных потоков и распределение нефтеперспективных зон.

Полесская кольцевая мегаструктура представляет собой мантийно-коровую кольцевую систему, формирование которой происходило в течение длительного периода геологической истории под воздействием взаимообусловленных процессов магматизма, метаморфизма и тектогенеза. Возникновение кольцевой мегаструктуры связано с нуклеарной стадией развития Земли и началом образования ее коры (около 4 млрд лет назад). Активно проявилась Полесская кольцевая мегаструктура на платформенном этапе эволюции земной коры [2; 3]. В позднем девоне в эпоху герцинской складчатости в ее северном сегменте формировался Припятский палеорифтовый бассейн широтного простирания.

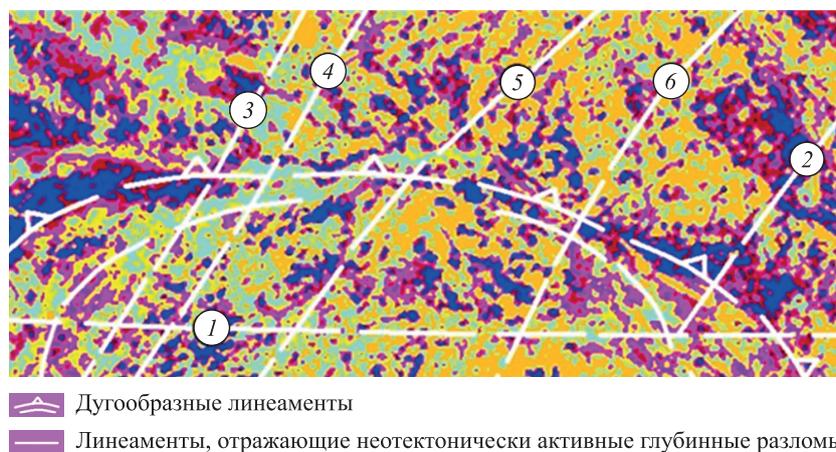


Рис. 1. Космоструктурная карта северного сегмента Полесской кольцевой мегаструктуры. Неотектонически активные глубинные разломы: 1 – Южно-Припятский; 2 – Лоевский; 3 – Микашевичский; 4 – Малыньско-Туровский; 5 – Пержанско-Симоновичский; 6 – Первомайско-Заозерный (составлено по данным публикации [3])

Fig. 1. Cosmostructural map of the northern segment of Poleskaya ring megastructure. Neotectonically active deep faults: 1 – South-Pripyatsky; 2 – Loevsky; 3 – Mikashevichsky; 4 – Malynsko-Turovsky; 5 – Perzhansko-Simonovichsky; 6 – Pervomaisko-Zaozerny (compiled according to publication [3])

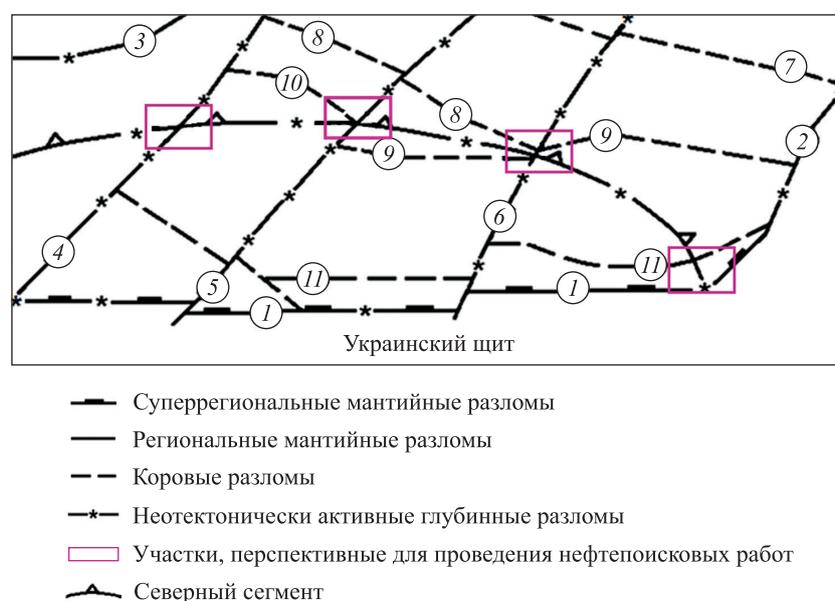


Рис. 2. Карта оценки перспектив нефтегазоносности северного сегмента Полесской кольцевой мегаструктуры [7; 8]. Неотектонически активные глубинные разломы: 1 – Южно-Припятский; 2 – Лоевский; 3 – Микашевичский; 4 – Малыньско-Туровский; 5 – Пержанско-Симоновичский; 6 – Первомайско-Заозерный; 7 – Азерецко-Великоборский; 8 – Шестовичско-Гостовский; 9 – Буйновичско-Наровлянский; 10 – Сколодинский; 11 – Выступовичский. Источник: [3]

Fig. 2. Map for assessing the oil and gas potential of the northern segment Poleskaya ring megastructure [7; 8]. Neotectonically active deep faults: 1 – South-Pripyatsky; 2 – Loevsky; 3 – Mikashevichsky; 4 – Malynsko-Turovsky; 5 – Perzhansko-Simonovichsky; 6 – Pervomaisko-Zaozerny; 7 – Azeretsko-Velikoborsky; 8 – Shestovichsko-Gostovsky; 9 – Buinovichsko-Narovyansky; 10 – Skolodinsky; 11 – Vystupovichsky. Source: [3]

В позднеолигоцен-четвертичное время в пределах северного сегмента Полесской кольцевой мегаструктуры преобладали восходящие неотектонические движения суммарной амплитудой 100–150 м и более. Современные вертикальные движения земной коры на территории кольцевой мегаструктуры характеризуются в основном положительными значениями и составляют 1–3 мм в год. Однако подобные деформации в зонах новейшей активизации глубинных разломов, пересекающих кольцевую структуру, достигают до 25–30 мм в год.

В пределах северного сегмента Полесской кольцевой мегаструктуры по данным глубинного сейсмического зондирования установлено уменьшение мощности земной коры до 35–40 км, и по поверхности Мохоровичича здесь выделяются изометричные поднятия. Анализ глубинного строения других нефтегазоносных областей свидетельствует о приуроченности месторождений нефти к склонам поднятий верхней мантии.

Полесская кольцевая мегаструктура отличается высокой степенью вертикальной тектонической и петрографической расслоенности земной коры и мантии [3]. По-видимому, северный сегмент кольцевой мегаструктуры отражает контур литосферного пространства со значительным объемом разуплотненной разогретой подкоровой мантии, способной перемещаться вверх, приподнимая при этом поверхность Мохоровичича, как это отмечается под Припятским палеорифтовым бассейном. Существующие в пределах северного сегмента Полесской кольцевой мегаструктуры зоны разуплотнения по аналогии с мантийными разломами, возможно, насыщены УВ-флюидами. Новейшая активизация подобных геодинамических зон способствует вертикальной миграции глубинной нефти. Этот факт позволяет предположить, что кольцевые линеаменты мегаструктуры контролируют размещение нефтеперспективных зон.

Следует отметить, что в нефтегазоносных бассейнах сходные по размерам и геологической природе подобного типа кольцевые мегаструктуры создают благоприятные условия для миграции глубинных УВ-флюидов в верхнюю часть земной коры и формирования залежей нефти. Так, в северном регионе Западно-Сибирской плиты крупнейшие газовые месторождения Медвежье и Ямбургское, а также залежи нефти и газоконденсата размещаются в пределах внешнего кольцевого сегмента Уренгойской мегаструктуры [12]. Данные сведения подтверждают возможность открытия нефтяных залежей в пределах Полесской кольцевой мегаструктуры. В связи с этим особую актуальность приобретает оценка перспектив нефтегазоносности северного сегмента Полесской кольцевой мегаструктуры с позиций абиогенного генезиса УВ.

Потенциально перспективными в нефтегазоносном отношении являются участки, расположенные в зонах пересечения северного сегмента Полесской кольцевой мегаструктуры Малыньско-Туровским, Пержанско-Симоновичским, Первомайско-Заозерным, Лоевским, Сколодинским, Буйновичско-Наровлянским и Выступовичским разломами (см. рис. 1 и 2). Такие кентрогенные структуры отличаются повышенной флюидално-газовой активизацией.

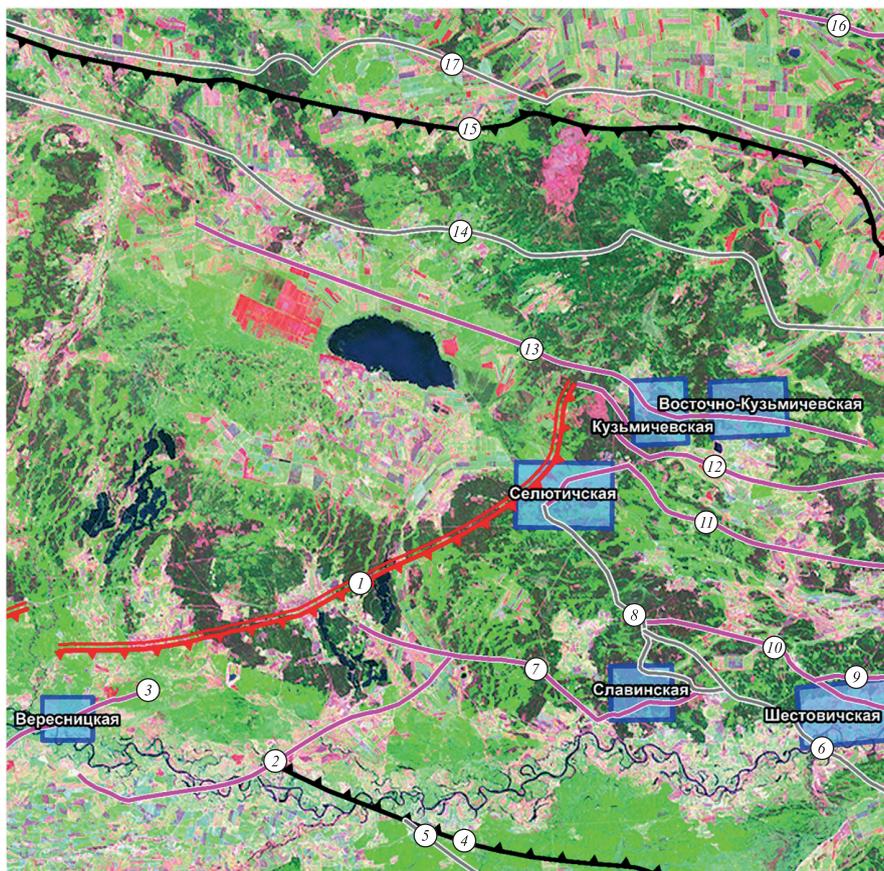
С северным сегментом Полесской кольцевой мегаструктуры сопряжены Буйновичско-Наровльская и Выступовичская зоны потенциального нефтегазонакопления, которые контролируются одноименными региональными разломами (см. рис. 2). Они включают криптодиapiroвые поднятия по поверхности верхнесоленосных отложений девонской толщи, образованные процессами галокинеза в позднедевонское время. В подсолевых верхнедевонских отложениях данные зоны выражаются серией блоков, представляющих интерес в нефтеносном отношении. Соляные купола отличаются активизацией в позднеолигоцен-четвертичное время и на КС проявляются в виде локальных кольцевых структур диаметром около 3–4 км. В верхней соленосной толще Буйновичско-Наровльской зоны потенциального нефтегазонакопления выделяются Кустовницкое и Наровлянское криптодиapiroвые поднятия. В галитовой субформации и брекчии кепрока соляных куполов можно ожидать наличие залежей нефти.

Прогноз нефтеперспективных локальных объектов выполнялся в пределах запада Припятского прогиба, примыкающего к Микашевичско-Житковичскому выступу. Рассматриваемая территория располагается в Центральном и Южном структурных ареалах Припятского прогиба. Западную часть Припятского прогиба от Микашевичско-Житковичского выступа ограничивает Микашевичский разлом мантийного заложения (рис. 3). Он погружается на глубину 60 км и более в верхнюю мантию [1]. В зоне разлома установлены повышенные значения распределения поля температур в осадочном чехле, обусловленные подтоком глубинного тепла и подтверждающиеся геотермическими данными.

В позднеолигоцен-четвертичное время, как и на предшествующих этапах развития Припятского НГБ, Микашевичский разлом отличался высокой тектонической активностью. Суммарные амплитуды неотектонических деформаций в зоне разлома достигают порядка 120 м. О новейшей активизации разлома свидетельствует также его проявление на земной поверхности в виде регионального линеамента, фиксируемого по данным ДЗЗ из космоса.

К Микашевичскому разлому прилегают нефтегазоносные участки с размещением нефтеперспективных структур – Вересницкой, Селютичской, Кузьмичевской и Восточно-Кузьмичевской (см. рис. 3). С помощью данных сейсморазведки на нефтегазоносных участках изучалось строение геологического разреза нефтепродуктивных толщ осадочного чехла на разных глубинах.

Вересницкая нефтеперспективная структура расположена в западной части Южного структурного ареала Припятского прогиба (рис. 4). Она представляет собой полуантиклиналь северо-восточного простирания, примыкающую к Вересницкому разлому (рис. 5). Разлом амплитудой 300–400 м разделяет площадь на приподнятый Вересницкий блок и Примикашевичскую зону опусканий шириной 4–10 км, примыкающую к Микашевичскому разлому.



- Микашевичский региональный разлом мантийного заложения
- Региональные разломы, ограничивающие структурные ареалы
- Региональные разломы, ограничивающие тектонические ступени
- Субрегиональные разломы, ограничивающие полиблоки
- Нефтегазоносные участки с размещением нефтеперспективных структур

Рис. 3. Нефтегазоносные участки с размещением нефтеперспективных структур в пределах Центрального и Южного структурных ареалов Припятского прогиба.

Неотектонически активные глубинные разломы:

- 1 – Микашевичский; 2 – Туровский; 3 – Вересницкий;
- 4 – Буйновичско-Наровлянский; 5 – Буйновичско-Наровлянский гребневой;
- 6 – Шестовичско-Гостовский; 7 – Найдовский; 8 – Шестовичско-Гостовский гребневой;
- 9 – Северо-Скрыгаловско-Слободской; 10 – Скрыгаловско-Слободской; 11 – Северо-Шестовичский;
- 12 – Южно-Копаткевичский; 13 – Копаткевичский; 14 – Азерецко-Хобнинский гребневой;
- 15 – Червонослободско-Малодушинский; 16 – Северо-Калиновский;
- 17 – Червонослободско-Малодушинский гребневой

Fig. 3. Oil and gas bearing areas with the placement of oil-promising structures within the Central and Southern structural areas of the Prip'yatsky trough.

Neotectonically active deep faults:

- 1 – Mikashevichisky; 2 – Turovsky; 3 – Veresnitsky;
- 4 – Buinovichsko-Narovlyansky; 5 – Buinovichsko-Narovlyansky ridge; 6 – Shestovichsko-Gostovsky;
- 7 – Naidovsky; 8 – Shestovichsko-Gostovsky ridge; 9 – North-Skrygalovsko-Slobodskoy;
- 10 – Skrygalovsko-Slobodskoy; 11 – North-Shestovichsky; 12 – South-Kopatkevichsky;
- 13 – Kopatkevichsky; 14 – Azeretsko-Khobninsky ridge; 15 – Chervonoslobodsko-Malodushinsky;
- 16 – North-Kalinovsky; 17 – Chervonoslobodsko-Malodushinsky ridge

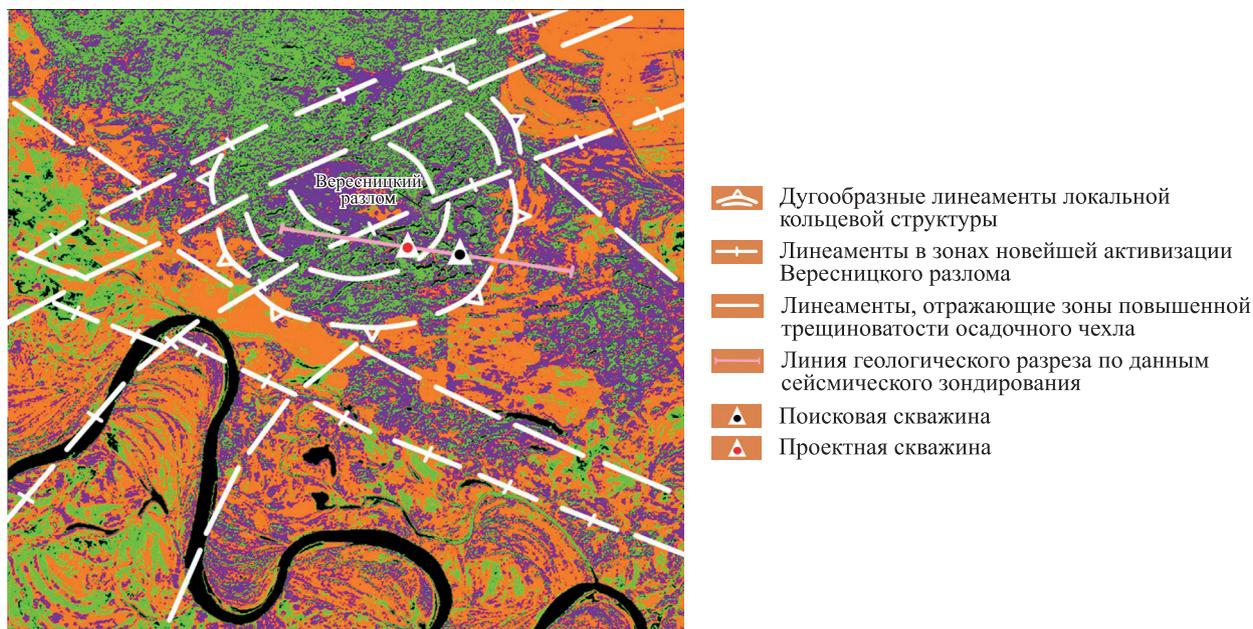


Рис. 4. Космоструктурная карта Вересницкой нефтеперспективной структуры
Fig. 4. Cosmostructural map of the Veresnitskaya oil-promising structure

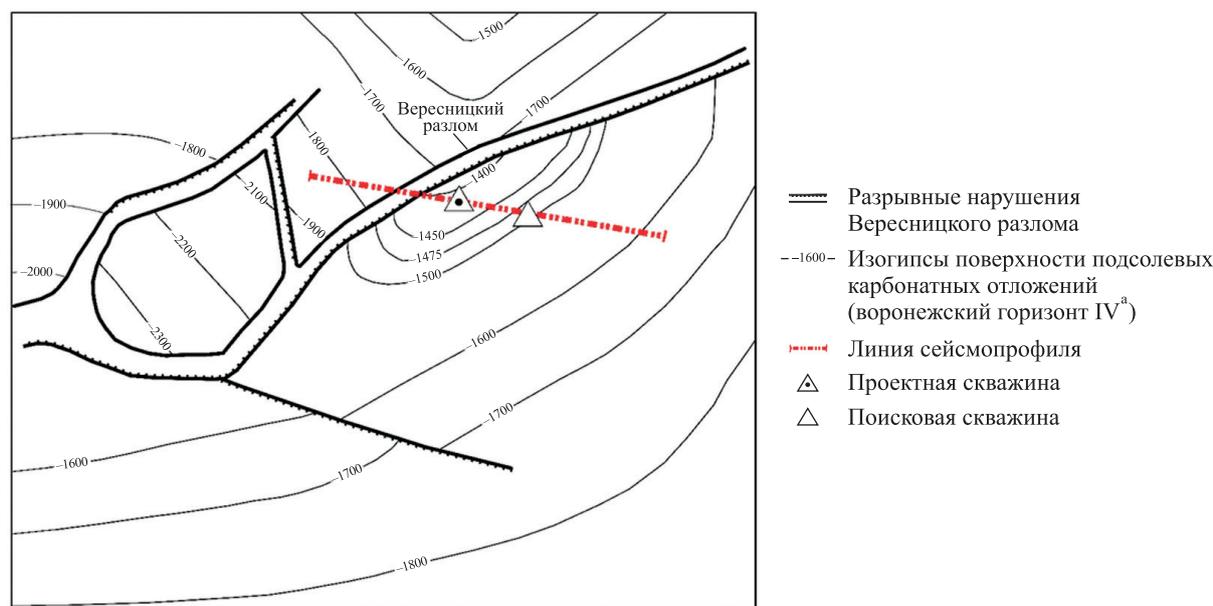


Рис. 5. Структурная карта Вересницкой нефтеперспективной структуры по поверхности подсолевых карбонатных отложений
Fig. 5. Structural map of the Veresnitskaya oil-promising structure on the surface of subsalt carbonate deposits

В пределах Вересницкой нефтеперспективной структуры по результатам поискового бурения в разрезе осадочного чехла выявлены подсолевой терригенный, карбонатный, нижнесоленосный, межсолевой, верхнесоленосный и надсолевой комплексы. В воронежско-семилукских отложениях подсолевого карбонатного комплекса установлены признаки нефти.

Вересницкая нефтеперспективная структура подготовлена сейсморазведочными работами методом общей глубинной точки по поверхности подсолевого карбонатного комплекса (воронежский и семилукский горизонты IV^a) под поисковое бурение на нефть. Размер структуры по изогиipse –1500 м составляет 2,1 × 0,5 км, амплитуда достигает 40 м (см. рис. 5). Перспективная площадь ловушки нефти оконтуривается изогиipse –1475 м и равняется 583 тыс. м².

В восточной части структуры пробурена поисковая скважина глубиной 2402 м со вскрытием пород кристаллического фундамента (см. рис. 5). Скважиной перспективные воронежско-семилукские отложения установлены на отметке –1491 м, условный водонефтяной контакт прогнозируется на отметке –1475 м.

Перспективные воронежско-семилукские отложения надежно экранируются с севера елецкими или задонско-елецкими отложениями, представленными в этой части разреза низкоемкими глинисто-мергельными породами. Перспективы нефтеносности Вересницкой нефтеперспективной структуры можно положительно оценивать по результатам установления нефтепроявлений в евлановских отложениях.

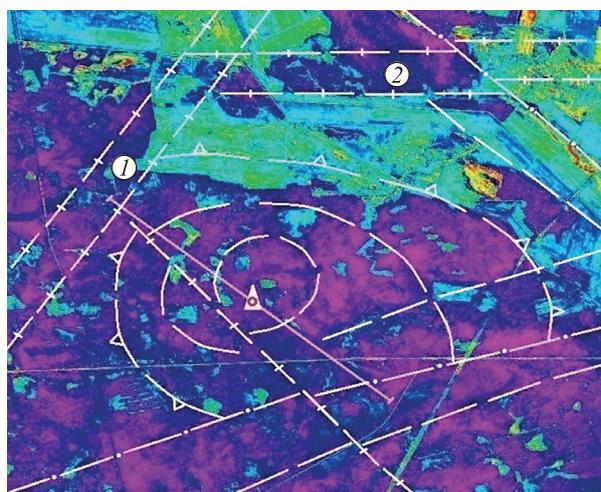
В пределах Вересницкой нефтеперспективной структуры прогнозируемые геологические ресурсы нефти оцениваются в количестве 275 тыс. т, а извлекаемые – в объеме 55 тыс. т. По итогам выполненных измерений отмечено, что поиски залежи нефти на глубинах Вересницкой площади 1600 м рентабельны. По комплексу геолого-геофизических показателей подсолевые горизонты верхнедевонских отложений характеризуются как весьма высокоперспективные для поисков нефти.

При космоструктурном картировании в западной части Центрального структурного ареала Припятского прогиба в зоне новейшей активизации Микашевичского разлома установлена Селютичская нефтеперспективная структура, уверенно прослеживаемая на КС в виде дугообразных линейментов (рис. 6) и на временном сейсмическом разрезе в изменении волновой картины отражающего горизонта IV^a по поверхности подсолевых терригенных отложений (рис. 7).

В подсолевом нефтеносном комплексе верхнедевонских отложений Селютичская нефтеперспективная структура представлена в виде полуантиклинального поднятия, примыкающего с востока к Микашевичскому разлому и ограниченного с юго-юго-запада разрывным нарушением, которое имеет амплитуду от 150 м на западе и затухает на востоке. Поверхность подсолевых отложений и пород фундамента погружается в северном направлении под наклоном 15–20°. Сводовая часть подсолевой структуры осложнена малоамплитудным (до 50 м) разрывным нарушением юго-восточного простирания.

Перспективы нефтеносности Селютичской нефтеперспективной структуры определяются в первую очередь подсолевыми отложениями, в которых на прилегающей с востока Шестовичской площади установлены признаки нефти в керне. В пределах сводовой части структуры рекомендуется заложение поисковой скважины.

Бурение скважины обосновывается следующими данными. Имеющийся к настоящему времени фактологический материал свидетельствует о том, что нефтеперспективные семилукские отложения подсолевого комплекса, представленные доломитами пористостью 9–15 %, с запада в зоне Микашевичского разлома экранируются породами кристаллического фундамента, а на юге – по разрывному нарушению амплитудой до 150 м отложениями нижней соленосной толщи опущенного блока. По этим данным предполагается наличие пластовой, тектонически экранированной залежи нефти в подсолевых карбонатных отложениях (семилукский горизонт) Селютичской нефтеперспективной структуры.



-  Дугообразные линейменты локальной кольцевой структуры
-  Линейменты в зонах новейшей активизации региональных мантийных разломов
-  Линейменты, отражающие локальные разломы
-  Линейменты, отражающие зоны повышенной трещиноватости осадочного чехла
-  Линия геологического разреза по данным сейсмического зондирования
-  Проектная скважина

Рис. 6. Космоструктурная карта
Селютичской нефтеперспективной структуры:
1 – Микашевичский разлом; 2 – Шестовичско-Гостовский разлом.
Источник: [3]

Fig. 6. Cosmostructural map
of the Selyutichskaya oil-promising structure:
1 – Mikashevichsky fault; 2 – Shestovichsko-Gostovsky fault.
Source: [3]

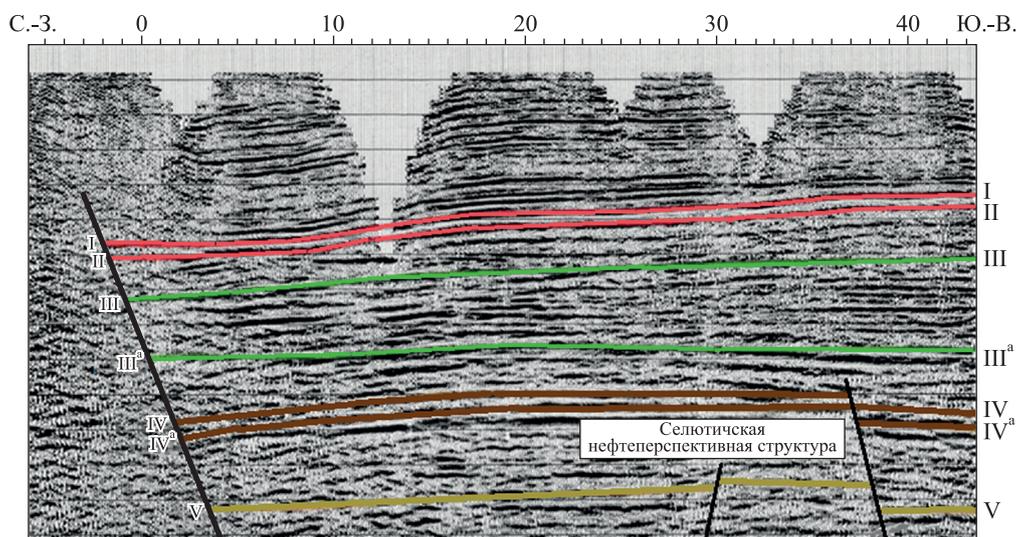


Рис. 7. Временной сейсмический разрез в пределах Селютичской нефтеперспективной структуры.
Отражающие горизонты:

- I – поверхность верхней соли; II – поверхность галитовой подтолщи;
- III – поверхность межсолевых отложений; III^a – подошва межсолевых отложений;
- IV – поверхность подсолевого карбонатного комплекса;
- IV^a – поверхность подсолевого терригенного комплекса;
- V – поверхность кристаллического фундамента

Fig. 7. Time seismic section within the Selyutichskaya oil-promising structure.

Reflecting horizons:

- I – surface of the upper salt; II – surface of the halite substratum;
- III – surface of the intersalt deposits; III^a – base of the intersalt deposits;
- IV – surface of the subsalt carbonate complex; IV^a – surface of the subsalt terrigenous complex;
- V – surface of the crystalline basement

По степени изученности Селютичская нефтеперспективная структура является подготовленной к глубокому поисковому бурению по данным сейсморазведки. В целях выявления залежей нефти в ее подсолевых отложениях необходимо с учетом комплексного анализа результатов космоструктурного картирования и материалов сейсмического зондирования заложить поисковую скважину с проектной глубиной 2250 м до вскрытия пород кристаллического фундамента (см. рис. 6 и 7; рис. 8).

В западной части Центрального структурного ареала Припятского прогиба на основе космоструктурных и сейсмических данных выявлены Кузьмичевская и Восточно-Кузьмичевская нефтеперспективные структуры по подсолевым и межсолевым отложениям верхнедевонской толщи осадочного чехла (рис. 9 и 10).

Кузьмичевская нефтеперспективная структура установлена в результате сейсморазведочных работ методом отраженных волн, методом общей глубинной точки и корреляционным методом преломленных волн. Анализ временных сейсмических разрезов с акцентом на отражающий горизонт IV^a позволил выявить особенности тектоники нефтеперспективной структуры.

По сейсмическим данным, Кузьмичевская нефтеперспективная структура представляет собой тектонический блок, ограниченный Азерецко-Великоборским и Копаткевичским разломами. Поверхность подсолевых терригенных отложений изменяется в интервале абсолютных глубин от –1500 до 2150 м и погружается в северо-восточном направлении. Выраженность Кузьмичевской нефтеперспективной структуры в рельефе земной поверхности и на КС в виде локального кольцевого объекта (см. рис. 9) подчеркивает ее новейшую активизацию.

В центральной приподнятой части Кузьмичевской нефтеперспективной структуры поверхность подсолевых терригенных отложений верхнедевонской толщи залегает в виде полусвода, ограниченного с северо-востока изогипсой –1600 м. Полусвод осложнен малоамплитудным субширотным разломом, разделяющим структуру на два блока – северный и южный.

В северном блоке пробурена скважина, вскрывшая породы кристаллического фундамента. Следует отметить, что в керне скважины, поднятом из интервала 1875,5–1898,4 м, в песчаниках полоцкого горизонта наблюдались незначительные выпоты светло-коричневой нефти, при испытании в процессе бурения получены притоки фильтрата бурового раствора с нефтью. Возможная ловушка нефти в пределах блока скважины приурочена к песчаникам в низах полоцких отложений. Она экранируется в верхней толще непроницаемыми отложениями нарвовского горизонта.

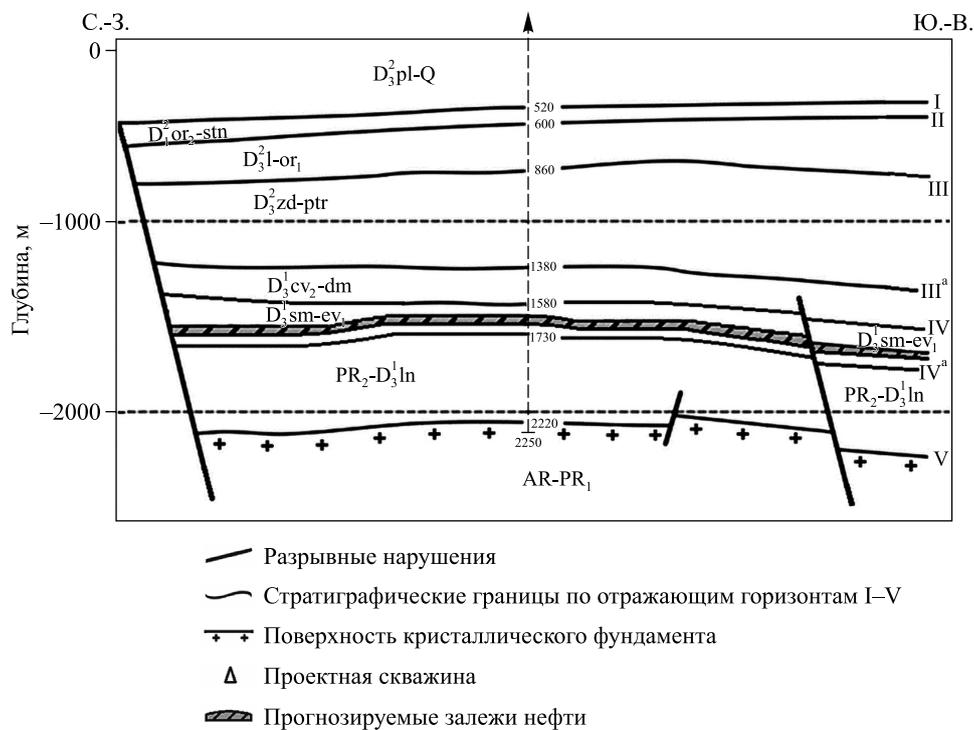
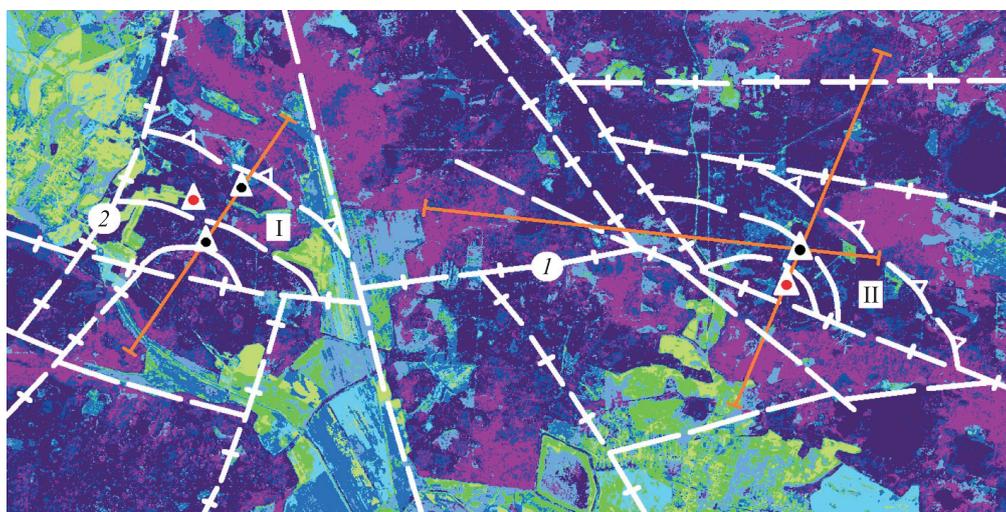


Рис. 8. Селютичская нефтеперспективная структура.

Источник: [3]

Fig. 8. Selyutichskaya oil-promising structure.

Source: [3]



- Локальные кольцевые структуры
- Линеаменты в зонах новейшей активизации разломов
- Линеаменты, отражающие зоны повышенной трещиноватости осадочного чехла
- Линии геологических разрезов по данным сейсмического зондирования
- Поисковые скважины
- Проектные скважины

Рис. 9. Космоструктурная карта Кузьмичевской (I) и Восточно-Кузьмичевской (II) нефтеперспективных структур: 1 – Копаткевичский разлом; 2 – Азерецко-Великоборский разлом

Fig. 9. Cosmostructural map of Kuzmichevskaya (I) and East-Kuzmichevskaya (II) oil-promising structures: 1 – Kopatkevichsky fault; 2 – Azeretsko-Velikoborsky fault

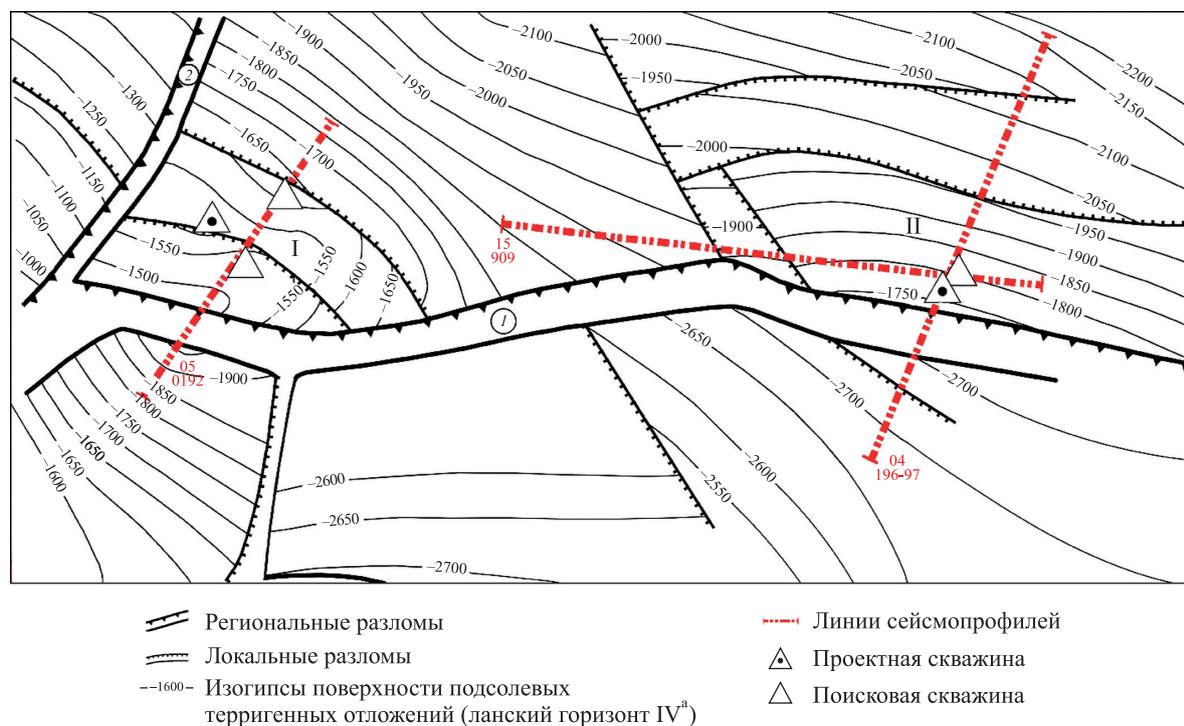


Рис. 10. Структурная карта Кузьмичевской (I) и Восточно-Кузьмичевской (II) нефтеперспективных структур по поверхности подсолевых терригенных отложений: 1 – Копаткевичский разлом; 2 – Азеретско-Великоборский разлом

Fig. 10. Structural map of Kuzmichevskaya (I) and East-Kuzmichevskaya (II) oil-promising structures on the surface of subsalt terrigenous deposits: 1 – Kopatkevichsky fault; 2 – Azeretsko-Velikoborsky fault

Южный блок нефтеперспективной структуры является тектонически экранированным с моноклинальным падением пород подсолевого комплекса, отделенного малоамплитудными разрывными нарушениями порядка 40–50 м, которые образуют узкий грабен северо-западного простирания. Для поисков залежи нефти в южном блоке пробурена скважина и обнаружены нефтепроявления в керне ланских отложений (нефтенасыщенный песчаник с запахом сероводорода) в интервале 1710–1718 м. В кровле столинских слоев выделена пачка глинисто-аргиллитовых пород мощностью 20 м, что может служить крышкой для предполагаемого резервуара нефти.

Приведенная информация свидетельствует о перспективах нефтеносности подсолевых отложений верхнедевонской толщи в пределах Кузьмичевской нефтеперспективной структуры. Предполагаемая залежь нефти пластовая, тектонически экранированная в полоцких отложениях. По степени изученности нефтеперспективная структура является подготовленной к глубокому бурению в целях поисков нефти и газа в подсолевых терригенных отложениях.

К востоку от Кузьмичевской площади расположена Восточно-Кузьмичевская нефтеперспективная структура, выявленная по подсолевым и межсолевым отложениям верхнедевонской толщи (см. рис. 9 и 10). На КС она выражена в виде локального кольцевого объекта, ограниченного системами линеаментов, которые связаны с дизъюнктивными дислокациями и зонами трещиноватости осадочного чехла. По подсолевым терригенным отложениям (отражающий горизонт IV^а) структура представляет собой полу-свод, обособленный с запада разрывным нарушением амплитудой около 20 м, а с юга Копаткевичским разломом (см. рис. 10). С севера Восточно-Кузьмичевская нефтеперспективная структура ограничена изогипсой –1800 м, в контуре которой ее амплитуда составляет 60 м.

В пределах сводовой части Восточно-Кузьмичевской нефтеперспективной структуры возможно наличие залежей нефти в верхнепротерозойских и воронежских отложениях, так как по западному нарушению контакт воронежских отложений происходит с непроницаемыми отложениями евлановского горизонта соседнего блока, а контакт верхнепротерозойских отложений – с непроницаемыми отложениями наровского горизонта. По степени изученности Восточно-Кузьмичевская нефтеперспективная структура является подготовленной к глубокому поисковому бурению.

К северо-востоку от Восточно-Кузьмичевской нефтеперспективной структуры пробурена скважина. В керне, поднятом из отложений наровского надгоризонта (освейские слои) в интервале 2211–2216 м,

в доломитовой брекчии на отдельных сколах отмечены примазки темно-коричневого битума. При испытании полоцкого горизонта в интервале 2043–2047 м (морочские слои) по данным анализа пробы пластовой воды прогнозируется водонептяной контакт.

В результате космоструктурного картирования и геологической интерпретации данных сейсморазведки в западном регионе Припятского НГБ выявлены Вересницкая, Селютическая, Кузьмичевская и Восточно-Кузьмичевская нефтеперспективные структуры, прилегающие к Микашевичскому разлому. Комплексный анализ сейсмической информации и керн скважин свидетельствует о перспективах нефтеносности структур в подсоловых и межсоловых отложениях верхнедевонской толщи. Зона Микашевичского разлома создает благоприятные условия для восходящей вертикальной миграции УВ-флюидов в осадочный чехол Припятского НГБ.

Заключение

В Припятском НГБ глубинные разломы обнаруживают связь с каналами разгрузки мантийных флюидопотоков в осадочный чехол и размещением залежей нефти. На основе комплексного анализа данных ДЗЗ из космоса и материалов сейсморазведки достигается возможность прогноза нефтеперспективных структур, прилегающих к разломам мантийного заложения. Глубинные разломы и примыкающие к ним кольцевые структуры определяют восходящую вертикальную миграцию УВ-флюидов в верхние горизонты земной коры Припятского НГБ, располагающегося с точки зрения тектонического районирования в одноименном прогибе.

К разломам мантийного заложения и зонам нефтегазонакопления тяготеют кольцевые структуры тектоногенной природы, связанные с блоковыми, блоково-пликативными и пликативными структурными формами нефтеносных комплексов в верхнедевонских отложениях осадочного чехла. Прилегающие к глубинным разломам кольцевые структуры создают благоприятные условия для вертикальной миграции УВ-флюидов из верхней мантии в земную кору и контролируют формирование залежей нефти в осадочном чехле.

В пределах северного сегмента Полесской кольцевой мегаструктуры зоны разуплотнения по аналогии с мантийными разломами, возможно, насыщены УВ-флюидами. Новейшая активизация подобных геодинамических зон способствует вертикальной миграции глубинной нефти. Этот факт позволяет предположить, что кольцевые линейменты мегаструктуры мантийного заложения контролируют вертикальную миграцию флюидных потоков и распределение нефтеперспективных зон.

Актуальна также проблема прогноза нефтеперспективных структур, расположенных в районе промышленных месторождений нефти. Образование новых нефтяных залежей вблизи разрабатываемых месторождений, по-видимому, связано с дегазацией мантии и восходящей миграцией УВ-флюидов в осадочную толщу в зонах новейшей активизации глубинных разломов с их последующей генерацией в блоковых, пликативно-блоковых и пликативных структурах в верхнедевонских отложениях.

Картирование геофлюидодинамических структур разгрузки глубинных УВ в осадочном чехле и создание космоструктурных моделей нефтегазоносных участков на основе комплексной интерпретации данных ДЗЗ из космоса и сейсмогеологической информации позволяют в пределах отдельных площадей Припятского НГБ выявить нефтеперспективные структуры и тем самым способствуют проведению поисковых работ на нефть.

Библиографические ссылки

1. Грибик ЯГ. Связь нефтеносности Припятского прогиба с глубинным геологическим строением. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2004;48(5):86–91.
2. Губин ВН. Космоструктурное картирование при поисках глубинной нефти в Припятском нефтегазоносном бассейне [Интернет]. В: Центральная геофизическая экспедиция. *4-е Кудрявцевские чтения. Материалы Всероссийской конференции по глубинному генезису нефти и газа; 19–21 октября 2015 г.; Москва, Россия*. Москва: Центральная геофизическая экспедиция; 2015 [цитировано 20 ноября 2023 г.]. [6 с.]. Доступно по: http://conference.deepoil.ru/images/stories/docs/4KR/theses/Gubin_Theses.pdf.
3. Губин ВН. Прогнозирование геофлюидодинамических структур в Припятском нефтегазоносном бассейне с помощью методов дистанционного зондирования. *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2018;3:[9 с.].
4. Кудрявцев НА. *Генезис нефти и газа*. Ленинград: Недра; 1973. 216 с.
5. Тимурзиев АИ. Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: тектонофизический и флюидодинамический аспекты (в связи с нефтегазоносностью). Часть 10. *Глубинная нефть*. 2014;2(1):123–163.
6. Тимурзиев АИ, Шумейкин СА, Шумейкин АС. Методы и технологии оценки перспектив нефтегазоносности территорий на основе комплексного анализа потенциальных полей, данных сейсморазведки, топогеодезической и космической съемки. *Глубинная нефть*. 2014;2(3):307–340.
7. Айзберг РЕ, Старчик ТА. *Синрифтовая геодинамика Припятского прогиба*. Минск: Беларуская навука; 2013. 146 с.
8. Гарецкий РГ, Клушин СВ. Листрические разломы в Припятском палеорифте. *Геотектоника*. 1989;1:48–60.

9. Гридин ВИ, Дмитриевский АН. Системно-аэрокосмическое изучение нефтегазоносных территорий. Басниев КС, редактор. Москва: Наука; 1994. 287 с.
10. Трофимов ДМ, Шуваева МК, Тавризов ВЕ. Применение инновационных технологий дистанционного зондирования для оптимизации геолого-разведочных работ на нефть и газ. *Геология нефти и газа*. 2012;1:71–73. EDN: ORCUCJ.
11. Буш ВА. Проблема кольцевых структур Земли. Москва: Всесоюзный институт научной и технической информации; 1986. 116 с.
12. Смирнова МН. Нефтегазоносные кольцевые структуры и научно-методические аспекты их изучения. *Геология нефти и газа*. 1997;9:51–55.
13. Трофимов ДМ. Об узлах пересечения разрывных дислокаций и их роли в строении земной коры. В: Шарапов ВН, редактор. *Методы дистанционных исследований для решения природоведческих задач*. Новосибирск: Наука; 1986. с. 9–12.

References

1. Gribik YaG. [The connection of the oil content of the Pripyat trough with the deep geological structure]. *Doclady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2004;48(5):86–91. Russian.
2. Gubin VN. Cosmostructural mapping in the search for deep oil in the Pripyat oil and gas basin [Internet]. In: Central Geophysical Expedition. 4th Kudryavtsev readings. *Proceedings of the All-Russian conference on the deep genesis of oil and gas; 2015 October 19–21; Moscow, Russia*. Moscow: Central Geophysical Expedition; 2015 [cited 2023 November 20]. [6 p.]. Available from: http://conference.deepoil.ru/images/stories/docs/4KR/theses/Gubin_Theses.pdf. Russian.
3. Gubin VN. Forecasting of geofluidodynamic structures in the Pripyat oil and gas basin by remote sensing methods. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2018;3:[9 p.]. Russian.
4. Kudryavtsev NA. *Genesis нефти i gaza* [The genesis of oil and gas]. Leningrad: Nedra; 1973. 216 p. Russian.
5. Timurziev AI. The neotectonic shear tectonics of sedimentary basins: tectonophysical and fluid dynamics aspects (in connection with an oil-and-gas-bearing capacity). Part 10. *Glubinnaya нефть*. 2014;2(1):123–163. Russian.
6. Timurziev AI, Shumeikin SA, Shumeikin AS. The methods and technologies of estimation of perspectives of an oil-and-gas-bearing capacity of territories on the basis of a complex analysis of the potential fields, seismic, topographic, geodetic and space surveys. *Glubinnaya нефть*. 2014;2(3):307–340. Russian.
7. Aizberg RE, Starchik TA. *Sinriftovaya geodinamika Pripyatskogo progiba* [Synrift geodynamics of the Pripyat trough]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2013. 146 p. Russian.
8. Garetskii RG, Klushin SV. [Lystric faults in the Pripyat paleorift]. *Geotektonika*. 1989;1:48–60. Russian.
9. Gridin VI, Dmitrievskii AN. *Sistemno-aerokosmicheskoe izuchenie neftegazonosnykh territorii* [System-aerospace study of oil and gas-bearing territories]. Basniev KS, editor. Moscow: Nauka; 1994. 287 p. Russian.
10. Trofimov DM, Shuvaeva MK, Tavrizov VE. Using of innovation technologies of remote sounding for optimization of oil and gas exploration activity. *Russian Oil and Gas Geology*. 2012;1:71–73. Russian. EDN: ORCUCJ.
11. Bush VA. *Problema kol'tsevykh struktur Zemli* [The problem of ring structures of the Earth]. Moscow: Vsesoyuznyi institut nauchnoi i tekhnicheskoi informatsii; 1986. 116 p. Russian.
12. Smirnova MN. [Oil and gas bearing ring structures and scientific and methodological aspects of their study]. *Russian Oil and Gas Geology*. 1997;9:51–55. Russian.
13. Trofimov DM. [On the nodes of intersection of discontinuous dislocations and their role in the structure of the Earth's crust]. In: Sharapov VN, editor. *Metody distantsionnykh issledovaniy dlya resheniya prirodovedcheskikh zadach* [Methods of remote research for solving natural science problems]. Novosibirsk: Nauka; 1986. p. 9–12. Russian.

Получена 18.12.2023 / исправлена 05.03.2024 / принята 05.03.2024.
Received 18.12.2023 / revised 05.03.2024 / accepted 05.03.2024.

НАУЧНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ШКОЛЫ БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА И ИХ РОЛЬ В РАЗВИТИИ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

SCIENTIFIC GEOGRAPHICAL SCHOOLS OF BELARUSIAN STATE UNIVERSITY AND THEIR ROLE IN THE DEVELOPMENT OF GEOGRAPHICAL EDUCATION

В 2024 г. исполняется 90 лет факультету географии и геоинформатики Белорусского государственного университета, который был открыт в 1934 г. как геолого-почвенно-географический факультет. На протяжении 90 лет он претерпевал различные структурные трансформации: менялось название факультета, создавались кафедры, научно-исследовательские лаборатории, реформировались образовательные программы, появлялись новые специальности, востребованные народным хозяйством. Все это время факультет выступал флагом подготовки кадров в области наук о Земле и одним из ведущих центров научных географических исследований в стране.

Современное географическое образование опирается на систему научных школ, сложившихся на базе кафедр и научно-исследовательских лабораторий БГУ, а также на основе отраслевых институтов НАН Беларуси. На рубеже тысячелетий Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь провел инвентаризацию научных школ страны.

В настоящее время на факультете географии и геоинформатики БГУ успешно функционируют четыре научные школы: 1) школа почвоведения; 2) школа ландшафтоведения и геоэкологии; 3) школа лимнологии; 4) школа социально-экономической географии.

В число самых известных входит научная школа почвоведения, имеющая большое количество самостоятельных направлений. Первый этап ее развития приходится на 1930-е гг., когда в БГУ была открыта кафедра почвоведения (1933), которую возглавил один из основателей АН БССР, академик, первый

директор Научно-исследовательского института агропочвоведения АН БССР (1931–1937), участник II Международного конгресса почвоведов (Вашингтон, 1927) Я. Н. Афанасьев. Он выступил родоначальником классификации почв Беларуси, изучил пространственные закономерности распространения различных типов почв на территории страны. Я. Н. Афанасьев уделял много внимания решению практических задач, связанных с крупномасштабным почвенным картографированием земель, организацией зональных почвенных станций, проведением почвенно-агрохимических исследований почв Беларуси в целях повышения их плодородия.

Второй этап развития школы почвоведения (1940–60-е гг.) сопряжен с появлением новых направлений исследований, касающихся вопросов мелиорации, организации обследования почв, биогеохимии микроэлементов. Лидером течения стал академик И. С. Лупинович, возглавлявший кафедру почвоведения БГУ с 1948 по 1968 г. В этот период он был избран президентом Академии сельскохозяйственных наук БССР (1957–1961), создал центр сельскохозяйственной науки Беларуси. Наиболее важным достижением школы на данном этапе стало изучение микроэлементного состава почв. По инициативе И. С. Лупиновича в БГУ была открыта научно-исследовательская лаборатория почвенной биогеохимии. В этой области были подготовлены 2 доктора наук и 10 кандидатов наук, написана коллективная монография «Микроэлементы в почвах БССР и эффективность микроудобрений» (1970). Фактически указанное направление выделилось в самостоятельную школу почвоведов-биогеохимиков. Другим значимым направлением стало проведение

крупномасштабных почвенных исследований. В соответствии с постановлением Совета Министров БССР «О проведении детальных исследований почв колхозов и совхозов БССР» в БГУ был организован почвенный отряд, который за 12 лет обследовал более 500 тыс. га почв Беларуси и около 1 млн га почв Алтайского края. По результатам этих изысканий была подготовлена монография «Почвенные исследования БССР» (1959).

Третий этап развития школы почвоведения охватывает 1970–90-е гг. Ее лидером стал сначала А. Г. Медведев, а затем В. С. Аношко. С 1968 по 1980 г. кафедрой почвоведения БГУ заведовал член-корреспондент АН БССР, заслуженный деятель науки БССР, лауреат Государственной премии БССР А. Г. Медведев. Основными направлениями научных исследований в тот период являлись разработка методики и проведение качественной оценки сельскохозяйственных земель. Результаты бонитировки были опубликованы в коллективной монографии «Качественная оценка земель в совхозах и колхозах БССР» (1971). Под руководством А. Г. Медведева осуществлялись исследования по оптимизации плодородия мелиорированных торфяно-болотных почв.

Широкомасштабная мелиорация болот Полесья обусловила развитие нового направления исследований школы почвоведения, связанного с изучением водно-физических и агрохимических свойств осушенных почв. Проблемная научно-исследовательская лаборатория мелиорации ландшафтов БГУ в это время занималась мониторингом мелиорированных земель. Под руководством выпускника БГУ, доктора географических наук В. С. Аношко сформировалась мелиоративная география. Сейчас в рамках школы почвоведения проводятся исследования по таким направлениям, как геохимия ландшафтов (Н. К. Чертко, А. А. Карпиченко и др.), химическая мелиорация почв (Н. В. Клебанович), использование геоинформационных технологий для решения различных проблем природопользования и картографирования почв (Д. М. Курлович, А. Н. Червань) и др.

На современном этапе школа почвоведения успешно функционирует и проводит изыскания по следующим направлениям:

- изучению географических закономерностей распределения почв и картографированию почвенного покрова с применением геоинформационных технологий;
- анализу трансформации почв под влиянием антропогенных факторов;
- исследованию почвенно-геохимических процессов в ландшафтах Беларуси;
- почвенно-экологическому районированию территории Беларуси в целях осуществления адаптивного почвозащитного земледелия;
- оптимизации землепользования с помощью геоинформационных технологий.

В рамках научной школы ландшафтоведения и геоэкологии выделяются два направления – ландшафтное и геоэкологическое. Самая ранняя научная статья о ландшафтах страны «Типы географических краевидаў Беларусі», появившаяся в 1925 г., принадлежит одному из организаторов отечественной науки, автору первого учебника по географии Беларуси, профессору А. А. Смоличу. Однако окончательно эта школа сформировалась в БГУ только в 1950–60-х гг. Ее основателем стал известный геоморфолог, автор физико-географического районирования Беларуси, профессор В. А. Дементьев. Под его руководством начаты исследования ландшафтов Белорусского Поозерья, опубликована монография «Ландшафты северной и средней Белоруссии (опыт классификации)» (1968), разработана методика картографирования ландшафтов, выявлено их морфологическое строение, выведена классификация, начаты прикладные ландшафтные работы, подготовлено 7 кандидатов наук.

В 1970–80-х гг. Г. И. Марцинкевич и Н. К. Клицунова, ученики В. А. Дементьева, совместно с сотрудниками проблемной научно-исследовательской лаборатории мелиорации ландшафтов БГУ и студентами продолжили полевые исследования природных ландшафтов страны. Результатом стала подготовка ландшафтной карты Беларуси (Г. И. Марцинкевич, Н. К. Клицунова, Л. В. Логинова, Г. Т. Хараничева) (1984), ландшафтных карт всех административных районов и областей республики, опубликованных в издании «Энциклапедыя прыроды Беларусі» (1983–1986). Кроме того, стараниями ученых усовершенствована классификация ландшафтов, установлены закономерности их распространения и проведено ландшафтное районирование страны. Теоретические вопросы ландшафтоведения раскрываются в коллективной монографии «Ландшафты Беларуси» (1989) и учебниках по ландшафтоведению, выпущенных под руководством Г. И. Марцинкевич. Результаты этих изысканий были высоко оценены в научных и учебных учреждениях СССР.

Ландшафтная карта стала основой для проведения прикладных физико-географических работ. Появились публикации по сельскохозяйственной (В. М. Яцухно, Г. Т. Хараничева), агроэкологической (А. Н. Витченко), рекреационной (И. И. Счастливая), мелиоративной (М. Н. Брилевский) оценке ландшафтов, ландшафтной индикации (В. Н. Губин), исследованию урбанизированных ландшафтов (Г. И. Марцинкевич, В. С. Хомич, С. В. Какаренка, Т. И. Кухарчик, Д. А. Трофимчук) и т. д.

Важным аспектом работы ландшафтного направления научной школы стало изучение антропогенных ландшафтов Беларуси, в результате которого была разработана их классификация и составлена соответствующая карта. В последние годы проводятся инвентаризация, классификация и типология культурных ландшафтов (Г. И. Марцинкевич,

С. И. Кузьмин, Н. В. Гагина), в законодательные и нормативные документы страны включаются понятия «типичные природные ландшафты» и «средние природные ландшафты».

В конце XX в. в результате обострения экологических проблем особую актуальность приобрели геоэкологические исследования. Под руководством А. Н. Витченко в рамках школы ландшафтоведения и геоэкологии сформировалось геоэкологическое направление (Н. В. Гагина, М. Н. Брилевский, О. С. Антипова, Д. С. Воробьев и др.).

К основным современным направлениям научных исследований школы ландшафтоведения и геоэкологии относятся:

- оценка и картографирование типов антропогенных воздействий на ландшафты;
- разработка методов измерения состояния, устойчивости и экологического потенциала ландшафтов, проведения геоэкологической оценки и моделирования;
- изучение ландшафтного разнообразия территории и его роли в рациональном природопользовании и охране окружающей среды;
- ландшафтно-экологическое обоснование территориальных схем охраны окружающей среды;
- формулирование теоретических и прикладных основ оценки агроэкологического потенциала ландшафтов Беларуси;
- анализ урбандиафтов, их геоэкологического состояния.

Научная школа лимнологии является одной из самых молодых. В довоенные и первые послевоенные годы изучение озер носило спорадический характер. В начале 1960-х гг. стал анализироваться природно-ресурсный потенциал озер Беларуси. Тогда в БГУ преобладали гидробиологические исследования озер (Е. А. Боровик, М. Е. Макушонок, А. А. Зенкевич, Г. Г. Винберг). В Институте геологических наук АН БССР под руководством бывшего ректора БГУ К. И. Лукашова изучались геохимические особенности озерных отложений (А. А. Хомич). На факультете анализ геоморфологии озерных котловин перерос в комплексные лимнологические исследования озер и способствовал зарождению научной школы, которую возглавила О. Ф. Якушко.

Становление течения связано с созданием сначала студенческой учебной лаборатории озероведения (1967), а затем отраслевой научно-исследовательской лаборатории озероведения (1973) (О. Ф. Якушко, В. А. Калечиц). Комплексные лимнологические исследования включали батиметрическую съемку озер, изучение их температурного и газового режима, гидрологии, водосбора, мощности, возраста и состава донных отложений. Результатом такой инвентаризации стала подготовка двухтомного справочника, включающего характеристики более 500 озер Беларуси (1983), моногра-

фии О. Ф. Якушко «Белорусское Поозерье: история развития и современное состояние озер северной Белоруссии» (1971), нескольких учебных пособий по озероведению, а также серии карт.

К началу XXI в. была сформирована база данных почти по 800 озерам страны, выпущен справочник «Озера Беларуси» (2004). Информация об озерах вошла в энциклопедии «Блакітная кніга Беларусі» (1994), «Блакітны скарб Беларусі» (2007). Большим достижением стало проведение природно-генетической (О. Ф. Якушко) и природно-хозяйственной (Б. П. Власов) классификаций озер.

В рамках школы лимнологии сформировались отдельные направления, связанные с лимнологией (О. Ф. Якушко, Б. П. Власов), гидрологическим исследованием рек и водохранилищ (П. С. Лопух, В. М. Широков, Г. М. Базыленко, Ю. Н. Емельянов, Е. Г. Кольмакова), прудов (И. И. Кирвель), карьерных водоемов (С. А. Хомич), изучением геоморфологии и типизацией озерных котловин (О. Ф. Якушко, А. А. Новик, Н. Ю. Суховило), гидробиологическими исследованиями озер (А. Ю. Каратаев, П. А. Митрахович), анализом донных отложений и палеолимнологией (Б. П. Власов, И. А. Мысливец, И. И. Богдель), мониторингом водных экосистем (В. П. Романов). В этой области было подготовлено более 20 докторов и кандидатов наук.

К современным направлениям научных изысканий школы лимнологии относятся:

- исследование проблем происхождения и эволюции озер Беларуси;
- характеристика современного состояния озерных экосистем;
- изучение проблем антропогенного воздействия на озера и водохранилища;
- проведение кадастровой оценки озер;
- обоснование создания особо охраняемых природных территорий на базе озерных экосистем;
- комплексный анализ искусственных водоемов.

Зарождение научной школы социально-экономической географии связано с работами А. А. Смолича, возглавлявшего кафедру географии БГУ в 1920-х гг. Ее дальнейшее формирование в конце 1930-х гг. происходило благодаря приглашению в Минск из Московского государственного университета профессора М. Н. Смирнова и доцента В. Е. Зудилина, заведовавших в эти годы кафедрой экономической географии БГУ. Под руководством М. Н. Смирнова изучались производительные силы республики, были подготовлены кандидаты наук Н. Т. Романовский и И. И. Трухан, которые впоследствии стали лидерами школы. В 1950–80-х гг. под руководством сначала Н. Е. Рогозина, а затем Н. Т. Романовского проводились исследования народно-хозяйственного комплекса, транспорта (А. Я. Малышев), сельского хозяйства (Н. И. Журавская, Г. С. Смоляков), различных отраслей промышленности (Г. В. Ани-

ченко), территориальной организации областных агропромышленных комплексов (Л. А. Павлович, В. В. Некриш).

На рубеже XX–XXI вв. важными направлениями изысканий стали проблемы экономики в сфере использования природных ресурсов (А. В. Томашевич), вопросы региональной экономики и размещения производительных сил (Л. В. Козловская), территориальной организации перерабатывающих отраслей агропромышленного комплекса (Ф. С. Фещенко), различные аспекты развития химической промышленности (Е. А. Антипова, В. П. Сидоренко), экономико-географического образования (С. И. Сидор). В последние годы в рамках школы проводятся исследования транспорта (А. П. Безрученок), электроэнергетики (Л. О. Сушкевич).

Одними из главных направлений исследований начиная с 1970-х гг. являются демография и география населения. Б. А. Манак была основана студенческая лаборатория региональных демографических проблем, которая успешно функционирует в настоящее время. В этой области были защищены докторские (Е. А. Антипова, К. К. Красовский) и кандидатские (И. В. Загорец, В. Н. Сосновский, Л. В. Фокеева, Г. З. Озем и др.) диссертации. Лидером геодемографического направления является профессор Е. А. Антипова, под руководством которой составляется серия тематических карт географии населения, выполняются международные проекты.

Самостоятельным направлением школы стала рекреационная география, успешно развивающаяся на

факультете под руководством профессора И. И. Пирожника. В этой области подготовлен ряд кандидатских диссертаций (В. М. Зайцев, Т. А. Федорцова, Г. Р. Потаева, О. А. Мечковская, Д. Г. Решетников, А. И. Тарасёнок и др.).

Наиболее важными являются следующие направления изысканий школы социально-экономической географии:

- оценка природно-ресурсного потенциала страны и отдельных регионов, установление возможностей его рационального использования;
- изучение демографических процессов, трудовых ресурсов, особенностей расселения и миграций;
- исследования в сфере географии туризма и экскурсионного менеджмента;
- территориальная организация социально-экономических геосистем в условиях глобализации и перехода к постиндустриальному этапу развития.

Все научные географические школы БГУ продолжают успешно функционировать в настоящее время, однако направленность исследований существенно изменилась. Быстрое внедрение информационных технологий во все отрасли географических наук способствует становлению научной школы геоинформационных систем (Д. М. Курлович, А. Н. Червань, Н. В. Жуковская, А. С. Семенюк и др.). На стадии формирования находится научная школа эволюционной географии (Я. К. Еловичева, Д. Л. Иванов, Е. А. Козлов и др.).

М. Н. Брилевский¹, Е. Г. Кольмакова²

¹Михаил Николаевич Брилевский – кандидат географических наук, доцент; профессор кафедры географической экологии факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета.

Mikhail N. Brylski, PhD (geography), docent; professor at the department of geographical ecology, faculty of geography and geoinformatics, Belarusian State University.

E-mail: *bryleuski@mail.ru*

²Елена Геннадьевна Кольмакова – кандидат географических наук, доцент; декан факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета.

Alena G. Kalmakova, PhD (geography), docent; dean of the faculty of geography and geoinformatics, Belarusian State University.

E-mail: *kalmakova@bsu.by*

АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ В БГУ РАБОТ

INDICATIVE ABSTRACTS OF THE PAPERS DEPOSITED IN BSU

УДК 502.1:55(476)(075.8)

Брилевский М. Н. **Геоэкологические проблемы Беларуси** [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 1-33 01 02 «Геоэкология» / М. Н. Брилевский ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 210 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 204–207. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/306842>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 18.12.2023, № 011318122023.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов 1-й ступени высшего образования, обучающихся по специальности 1-33 01 02 «Геоэкология». В теоретическом разделе ЭУМК анализируется современное состояние окружающей среды Республики Беларусь, рассматриваются геоэкологические проблемы Беларуси глобального, регионального и локального уровня, степень их проявления в различных регионах страны и прогноз геоэкологической ситуации на ближайшее будущее. Практический раздел содержит методические разработки по выполнению практических работ по учебной дисциплине, проведению управляемой самостоятельной работы и примеры тестовых вопросов для текущего и итогового контроля знаний по основным разделам курса.

УДК 631.42-047.36(075.8) + 502.521-047.36(075.8)

Мониторинг земель [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 1-56 02 02 «Геоинформационные системы» / БГУ ; сост.: Л. И. Смыкович, А. Н. Червань. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 120 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 119–120. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/306935>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 20.12.2023, № 011820122023.

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

УДК 528.48(075.8)

Кравченко О. В. **Инженерная геодезия** [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)», направления спец.: 1-56 02 02-01 «Геоинформационные системы (земельно-кадастровые)», 1-56 02 02-02 «Геоинформационные системы (специальные)» / О. В. Кравченко ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 120 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 119–120. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/307024>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 22.12.2023, № 012022122023.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся по специальностям 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)», направления специальности 1-56 02 02-01 «Геоинформационные системы (земельно-кадастровые)», 1-56 02 02-02 «Геоинформационные системы (специальные)». В ЭУМК изложены вопросы

проведения инженерно-геодезических изысканий, выполнения крупномасштабных съемок, обработки результатов геодезических измерений, методы геодезического контроля за монтажом конструкций в процессе строительства. Представлены тематика практических занятий, задания для управляемой самостоятельной работы студентов, перечень заданий в тестовой форме, вопросы для самоконтроля, итогового промежуточного контроля знаний.

УДК 556.3(075.8)

Гледко Ю. А. Гидрогеология [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 6-05-0532-02 «Гидрометеорология» / Ю. А. Гледко ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2023. 278 с. : ил. Библиогр.: с. 276–278. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/310458>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 21.03.2024, № 006021032024.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Гидрогеология» предназначен для студентов специальности 6-05-0532-02 «Гидрометеорология» факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета. В ЭУМК рассмотрены как проблемные и дискуссионные (генезис подземной гидросферы, эволюция состава подземных вод, геологическая форма движения воды), так и прикладные вопросы, среди которых прежде всего выделяются проблемы экологической гидрогеологии и водообеспечения. Представлены тематика, содержание и методические рекомендации для выполнения практических и лабораторных работ, перечень вопросов и заданий для семинарских занятий, примерный перечень заданий в тестовой форме для итогового и промежуточного контроля знаний.

УДК 502.175(075.8)

Гагина Н. В. Оценка воздействия на окружающую среду и стратегическая экологическая оценка [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 7-06-0532-01 «География», профилизиация «Цифровые геотехнологии», 7-06-0521-02 «Прикладная геоэкология» / Н. В. Гагина, Л. Н. Гертман ; БГУ. Электрон. текстовые дан. Минск : БГУ, 2024. 135 с. : ил., табл. Библиогр.: с. 130–131. Режим доступа: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/311130>. Загл. с экрана. Деп. в БГУ 09.04.2024, № 006609042024.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов, обучающихся в магистратуре по специальностям 7-06-0532-01 «География» (профилизиация «Цифровые геотехнологии»), 7-06-0521-02 «Прикладная геоэкология». В ЭУМК изложены основные принципы и природоохранные требования в области экологического проектирования, детально рассмотрены современные методы стратегической экологической оценки и оценки воздействия на окружающую среду для объектов планируемой и проектируемой хозяйственной деятельности. Представлены тематика практических заданий, выполняемых индивидуально и в малых группах, вопросы для подготовки к текущей аттестации. При организации образовательного процесса по изучению дисциплины использованы практико-ориентированный подход, методы проектного обучения и деловой игры.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОГРАФИЯ

<i>Антипова Е. А., Ян Лю.</i> Городское расселение Китая в XXI в.: национальная специфика, динамика внутренней структуры и пространственные формы	3
<i>Витченко А. Н., Шпакова Д. А.</i> Пространственно-временные особенности гидрогеологической и гидрохимической ситуации в районе Хотиславского месторождения мела и строительных песков ...	21
<i>Кадацкий В. Б.</i> Живые организмы в планетарном ракурсе	37
<i>Волчек А. А., Шпока Д. А.</i> Закономерности колебания максимальных уровней воды рек Беларуси: современное состояние и прогноз	45
<i>Безрученок А. П., Киндеев А. Л., Мазько А. Г.</i> Территориальная структура сети электрических зарядных станций и обеспеченность ими в Республике Беларусь	62
<i>Еловичева Я. К., Писарчук Н. М.</i> Современные представления о хронологии муравинского (микулинского, земского) межледниковья на западе Восточно-Европейской равнины	76
<i>Шестаков Н. А., Топаз А. А.</i> Картографирование лесной растительности на основе автоматизированного дешифрирования по данным дистанционного зондирования Земли	98
<i>Власов Б. П., Ковальчик Н. В., Суховило Н. Ю.</i> Геохимическая типология аквальных ландшафтов озер Национального парка «Нарочанский».....	113
<i>Кислицын Д. А., Клебанович Н. В.</i> Геоинформационный анализ динамики и структуры классов земельного покрытия Новогрудской возвышенности	126

ГЕОЛОГИЯ

<i>Губин В. Н.</i> Картирование геофлюидодинамических структур разгрузки глубинных углеводородов по данным дистанционного зондирования Земли и сейсморазведки	141
---	-----

ХРОНИКА, ИНФОРМАЦИЯ

<i>Брилевский М. Н., Кольмакова Е. Г.</i> Научные географические школы Белорусского государственного университета и их роль в развитии географического образования.....	156
Аннотации депонированных в БГУ работ	160

CONTENTS

GEOGRAPHY

<i>Antipova E. A., Yang Liu.</i> Urban settlement of China in the 21 st century: national specifics, internal structure dynamics, and spatial forms	3
<i>Vitchanka A. N., Shpakova D. A.</i> Spatial-temporal features of hydrogeological and hydrochemical situation in the area of Khotislavskoye deposit of chalk and construction sands	21
<i>Kadatsky V. B.</i> Living organisms from a planetary perspective	37
<i>Volchak A. A., Shpoka D. A.</i> Patterns of fluctuations in the maximum water levels of the rivers of Belarus: current state and forecast	45
<i>Bezruchonak A. P., Kindzeyeu A. L., Mazko A. G.</i> Territorial structure of a network of electric vehicles charging stations and their availability in the Republic of Belarus	62
<i>Yelovicheva Ya. K., Pisarchuk N. M.</i> Modern concepts about the chronology of the Muravin (Mikulin, Eemian) interglacial in the west of the Eastern European Plain	76
<i>Shastakou M. A., Tapaz A. A.</i> Mapping of the forest vegetation based on automated interpretation of remote sensing data	98
<i>Vlasov B. P., Kavalchyk N. V., Sukhovilo N. Yu.</i> Geochemical typology of aquatic landscapes of lakes in the Narochansky National Park	113
<i>Kislitsyn D. A., Klebanovich N. V.</i> Geoinformation analysis of the dynamics and structure of land cover classes of the Novogrudok Upland	126

GEOLOGY

<i>Gubin V. N.</i> Mapping of geofluidodynamic structures of unloading of deep hydrocarbons according to remote sensing and seismic data	141
--	-----

CHRONICLE, INFORMATION

<i>Bryleuski M. N., Kalmakova E. G.</i> Scientific geographical schools of Belarusian State University and their role in the development of geographical education.....	156
Indicative abstracts of the papers deposited in BSU.....	160

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

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

**Журнал Белорусского
государственного университета.
География. Геология.
№ 1. 2024**

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).

Редактор *М. И. Дикун*
Технический редактор *М. М. Баулина*
Корректор *Л. А. Меркуль*

Подписано в печать 31.05.2024.
Тираж 70 экз. Заказ 564.

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

© БГУ, 2024

**Journal
of the Belarusian State University.
Geography and Geology.
No. 1. 2024**

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).

Editor *M. I. Dikun*
Technical editor *M. M. Baulina*
Proofreader *L. A. Merkul'*

Signed print 31.05.2024.
Edition 70 copies. Order number 564.

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

© BSU, 2024