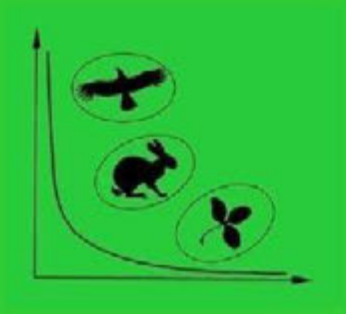
ISSN 2542-2006

Том *Volume* **4** **Номер** **Number** **4** **Декабрь** **December** **2020**



ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
WATER PROBLEMS INSTITUTE
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА
ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS

Журнал освещает результаты фундаментальных исследований и прикладных работ по изучению состояния, закономерностей процессов и динамики в природных, антропогенно созданных и/или антропогенно нарушенных экосистемах любого ранга (от биотопа до биосферы), а также в отдельных компонентах этих экосистем (как живых, так и неживых) повсеместно: во всех природных зонах и ландшафтах, на суше и в водной стихии. Статьи соотвествующей тематики принимаются по следующим научным направлениям: география, биология, лесное и сельское хозяйство.

The journal highlights the results of fundamental and applied investigations on the study of the state, processes and dynamics in natural, anthropogenic and/or anthropogenically disturbed ecosystems of any scale (beginning from biotope and up to biosphere) as well as in separate components of those ecosystems (alive and lifeless) everywhere: in all natural zones and landscapes, on land and in the water. Papers on the related topics submitted to the journal should be related to the following branches of science: geography, biology, forest and agricultural management.

МОСКВА
MOSCOW

2020

WATER PROBLEMS INSTITUTE
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS

Vol. 4, No. 4, 2020, December
Journal is founded in January 2017
Issued 4 times per year

Editor-in-Chief, Dr. geogr. Zh.V. Kuzmina

Editorial Council:
Corresponding member of the Russian Academy of Sciences V.I. Danilov-Danilyan,
Corresponding member of the Russian Academy of Sciences A.N. Gelfan
Academician of the Russian Academy of Sciences K.N. Kulik,
Corresponding member of the Russian Academy of Sciences V.V. Melikhov,
Academician of the Russian Academy of Sciences A.S. Rulev

Editorial Board:
M.V. Bolgov, E.I. Golubeva,T.V. Dikariova, N.G. Mazey, N.M. Novikova,
G.N. Ogureeva, E.I. Pankova, S.A. Podolskiy, E.G. Suslova, A.S. Viktorov,
M.F. Vundtsettel, L.G. Yemelyanova

Executive Secretary:
E.I. Tobolova

Head of Editorial Office:
O.S. Grinchenko

Addresses of Editorial Offices:
Russia, 119333 Moscow, Gubkina str., 3, WPI RAS
Tel.: (499) 135-70-41. Fax: (499) 135-54-15
E-mail: dynamics-journal@yandex.ru
http://www.ecosystemsdynamic.ru

MOSCOW

2020

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА

Том 4, № 4, 2020, декабрь
Журнал основан в январе 2017 г.
Выходит 4 раза в год

Главный редактор
доктор географических наук
Ж.В. Кузьмина

Редакционный совет:
член-корреспондент Российской академии наук А.Н. Гельфан,
член-корреспондент Российской академии наук В.И. Данилов-Данильян,
академик Российской академии наук К.Н. Кулик,
член-корреспондент Российской академии наук В.В. Мелихов,
академик Российской академии наук А.С. Рулев

Редакционная коллегия:
М.В. Болгов, А.С. Викторов, М.Ф. Вундцеттель, Е.И. Голубева, Т.В. Дикарева,
Л.Г. Емельянова, Н.Г. Мазей, Н.М. Новикова, Г.Н. Огуреева, Е.И. Панкова,
С.А. Подольский, Е.Г. Суслова

Ответственный секретарь:
Е.И. Тоболова

Заведующий редакцией:
О.С. Гринченко

Адрес редакции:
Россия, 119333 Москва, ул. Губкина, д. 3, ИВП РАН
Телефон: (499) 135-70-41. Факс: (499) 135-54-15
E-mail: dynamics-journal@yandex.ru
http://www.ecosystemsdynamic.ru

Москва

2020

© Журнал основан в 2017 г.
Учрежден и издается
Институтом водных проблем Российской академии наук.
Журнал как сетевое издание зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций;
Свидетельство о регистрации: ЭЛ № ФС 77-68782 от 17.02.2017.
Журнал зарегистрирован в Национальном центре ISSN Российской Федерации,
в Национальном информационно-аналитическом центре России – ВИНИТИ,
а также в научных электронных библиотеках: РГБ (Российская государственная библиотека, rsl.ru), БЕН РАН (Библиотека по естественным наукам Российской академии наук), НЭБ, РИНЦ, КИБЕРЛЕНИНКА, Российская книжная палата.

The journal has been founded in 2017.
It was founded and published by the
Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences.
The Journal is registered in the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (in Roskomnadzor) as a web Media;
Certification Number is ЭЛ № ФС 77-68782 of 17.02.2017.
The Journal is registered in National centre ISSN of Russian Federation,
All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI),
and also in scientific electron libraries, such as RSL (Russian State Library, rsl.ru), Library of Natural Sciences of RAS, National Electronic Library, Elibrary, Science Index, CYBERLENINKA, Russian Book Chamber.

Информация о журнале, правила для авторов располагаются на сайте
http://www.ecosystemsdynamic.ru

Information about Journal and Rules for authors are at the site
http://www.ecosystemsdynamic.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Том 4, номер 4, 2020 декабрь

МЕТОДЫ ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Методические аспекты изучения популяционной динамики соболя (*Martes zibellina* L., 1758) в зоне влияния Зейского водохранилища [на русском; аннотация на русском и английском]

С.А. Подольский, Л.Ю. Левик, Е.К. Красикова, К.П. Павлова 5-13

ГИС-моделирование зеленой инфраструктуры средиземноморских городов для управления урбанизированными экосистемами (на примере города Малага) [на русском; аннотация на русском]

Е.Е. Миронова 14-36

GIS Modeling of Green Infrastructure of Mediterranean Cities for Management of Urbanized Ecosystems [на английском; аннотация на английском]

E.E. Mironova 37-56

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Динамика ландшафтов и климата в Центральной и Восточной Европе в голоцене: палеогеографические аспекты прогноза возможных изменений природной среды [на русском; аннотация на русском]

Е.Ю. Новенко 57-80

Dynamics of Landscapes and Climate in Central and Eastern Europe in the Holocene: Paleographic Aspects for Prognosis of Possible Environmental Changes [на английском; аннотация на английском]

E.Yu. Novenko 81-104

Трансформация орнитофауны долины реки Птань (Юго-восток Тульской области) в условиях постоянного антропогенного воздействия [на русском; аннотация на русском и английском]

И.Б. Шаповалова 105-112

CONTENTS

Volume 4, Issue 4, 2020 December

METHODS OF SUSTENANCE AND RESERVATION OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS

Methodological Aspects of Studying Population Dynamics of Sable (*Martes zibellina* L., 1758) in the Zone of Influence of the Zeya Reservoir
[in Russian; Abstract is available in English]

S.A. Podolskiy, L.Yu. Levik, K.P. Pavlova, E.K. Krasikova 5-13

GIS Modeling of Green Infrastructure of Mediterranean Cities for Management of Urbanized Ecosystems
[in Russian; Abstract is available in Russian]

E.E. Mironova 14-36

GIS Modeling of Green Infrastructure of Mediterranean Cities for Management of Urbanized Ecosystems
[in English; Abstract is available in English]

E.E. Mironova 37-56

DYNAMICS OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS

Dynamics of Landscapes and Climate in Central and Eastern Europe in the Holocene: Paleographic Aspects for Prognosis of Possible Environmental Changes
[in Russian; Abstract is available in Russian]

E.Yu. Novenko 57-80

Dynamics of Landscapes and Climate in Central and Eastern Europe in the Holocene: Paleographic Aspects for Prognosis of Possible Environmental Changes
[in English; Abstract is available in English]

E.Yu. Novenko 81-104

Transformation of Ornitofauna in the Ptan River Valley (Southeast of Tula Region) under the Constant Anthropogenic Impact
[in Russian; Abstract is available in English]

I.B. Shapovalova 105-112

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2020, том 4, № 4, с. 5-13

МЕТОДЫ ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 502.5/8; 502.74; 574.472; 574.91; 574.24

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ДИНАМИКИ СОБОЛЯ (*MARTES ZIBELLINA* L., 1758) В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ЗЕЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА[1]

© 2020 г. С.А. Подольский*, **, Л.Ю. Левик*, Е.К. Красикова**, К.П. Павлова****

**Институт водных проблем РАН*
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: sergpod@mail.ru
***Зейский государственный природный заповедник*
Россия, 676246, Амурская обл., г. Зея, ул. Строительная, д. 71. E-mail: zzap@mail.ru
****Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: lilia-levik@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.06.2020. После доработки 15.07.2020. Принята к публикации 01.11.2020.

На основе многолетних данных Зейского заповедника оценивается роль природных и антропогенных факторов в динамике численности соболя (*Martes zibellina* L., 1758) зоны влияния Зейского водохранилища. Предложен пошаговый алгоритм изучения модельного вида в зоне влияния крупного гидросооружения. Первый шаг – восстановление хронологии изменений плотности населения соболя на рассматриваемой территории. Вторым шагом стало определение ведущих природных факторов динамики численности модельного вида. Установлена тесная прямая зависимость плотности населения соболя с многолетними тенденциями изменения суммарной относительной численности мышевидных грызунов. Установлена отрицательная зависимость последнего показателя с многолетними тенденциями изменений солнечной активности и количества весенне-летних осадков. Третий шаг исследования предполагает установление основных факторов и признаков влияния водохранилища на популяционную группировку соболя. Важнейшим антропогенным фактором видимо следует признать микроклиматическое влияние водохранилища. На побережье водохранилища отмечены значительные отклонения от естественной популяционной динамики соболя, в том числе, наиболее глубокие и длительные депрессии, а также повышенная амплитуда колебаний численности. Четвертый шаг исследования включает количественную оценку влияния водохранилища на модельный вид. Для зоны влияния Зейского водохранилища установлена длительность периода существенной дестабилизации популяции соболя под влиянием гидростроительства – около 20 лет. Наиболее объективным количественным показателем воздействия водохранилища на модельный вид представляется разность между средней, за период дестабилизации, плотностью населения на «контрольных» участках и на побережье искусственного водоема, выраженная в % от «контрольного» уровня. В течение двух десятилетий дестабидизации (1986-2005 гг.) ежегодные потери популяции составляли 1.4 особи на 1000 га – 35.4% от контрольного уровня.

Ключевые слова: соболь, мышевидные грызуны, динамика численности, солнечная активность, осадки, гидростроительство, оценка влияния.

DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10071

[1] Работа выполнена по теме НИР фундаментальных исследований ИВП РАН за 2018-2021 гг. «Моделирование и прогнозирование процессов восстановления качества вод и экосистем при различных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности» (№ 0147-2018-0002) № государственной регистрации АААА-А18-118022090104-8, раздел темы 2.6 «Эволюция наземных экосистем в изменяющихся природных условиях».

Со второй половины XX в. гидростроительство стало одной из важнейших форм антропогенного воздействия на природу Сибири и Дальнего Востока. В последние десятилетия этот фактор наиболее активно действует в Приамурье. Здесь функционируют Зейская и Бурейская ГЭС, начинается эксплуатация Нижнебурейской ГЭС, рассматриваются возможности создания еще нескольких гидроузлов. В зонах влияния крупных гидротехнических объектов меняются показатели численности многих видов млекопитающих. В первую очередь, это касается промысловых зверей, которые, помимо техногенного воздействия, подвергаются и прессу охоты. В то же время популяции, оказавшиеся в зонах влияния водохранилищ, продолжают испытывать колебания численности, обусловленные естественными природными процессами. Определение техногенной составляющей динамики численности и длительности дестабилизации популяций промысловых видов в зонах влияния крупных водохранилищ необходимы как с научной, так и с практической, точек зрения. Без этого невозможно выяснить параметры устойчивости модельных видов и дать объективную оценку экологического и эколого-экономического ущерба от гидростроительства. Выбор соболя в качестве модельного вида обусловлен следующими соображениями: он является основным объектом пушного промысла; обычен в зоне влияния Зейского водохранилища и на большей части Амурской области. Вторым объектом исследования является сообщество мышевидных грызунов, составляющих основу рациона соболя. Эта группа млекопитающих надежно учитывается стандартными методами. Длительность наблюдений за динамикой обилия мышевидных грызунов в Зейском заповеднике сопоставима с длительностью регулярных учетов численности соболя. Кроме того, эти животные являются типичными r-стратегами, чутко реагирующими на изменения природных и антропогенных факторов внешней среды.

Материалы и методы

Зейское водохранилище, расположенное на севере Амурской области, имеет равнинную и горную части: равнинная находится в пределах Верхнезейской низменности; горная – в Зейском ущелье, прорезающем систему хребтов Тукурингра – Соктахан. Наши исследования относятся, главным образом, к побережью горной части водохранилища на территории Зейского заповедника, занимающего восточную часть хребта Тукурингра. Использованы результаты учетов соболя в Зейском заповеднике за 32 года (1986-2018 гг.), а также данные о суммарной относительной численности мышевидных грызунов, представляющих основу рациона соболя.

Определение численности соболя проводились с использованием методик зимнего маршрутного учета или ЗМУ (Кузякин и др., 1990) и многодневного оклада (Русанов, 1986; Подольский, 1993). Суммарная протяженность маршрутов ЗМУ составила около 10 тыс. км. Учет многодневным окладом проводился на 9 площадках общей площадью около 5500 га. Ежегодно отрабатывалось 3-5 площадок суммарной площадью не менее 2.5 тыс. га. Также использованы данные официальных учетов охотпользователей Амурской области (1986-2010 гг.). При обработке материала сравнивалась плотность населения соболя на «опытных» участках, занимающих побережье водохранилища, и «контрольных» участках, удаленных от искусственного водоема.

Учеты мелких млекопитающих проводились на линиях ловушек Геро по стандартной методике (Карасева, Телицына, 1996). Проанализированы данные о суммарной численности мышевидных грызунов на 33 постоянных линиях. Общий объем отловов за период 1984-2017 гг. составил около 44600 ловушко-суток. Фауна мышевидных грызунов Зейского заповедника включает не менее 8 видов: красная полевка (*Myodes rutilus* Pallas, 1779), красно-серая полевка (*Myodes rufocanus* Sundervall, 1846-1847), унгурская полевка (*Microtus*

maximowiczii Schrenk, 1859), полевка-экономка (*Microtus oeconomus* Pallas, 1776), лесной лемминг (*Myopus schisticolor* Lilljeborg, 1844), азиатская лесная мышь (*Apodemus peninsulae* Thomas, 1907), мышь-малютка (*Micromys minutus* Pallas, 1771), полевая мышь (*Apodemus agrarius* Pallas, 1771). На большей части территории доминируют красно-серая и красная полевки; их доля в отловах составляет не менее 80%. В дубово-чернобережовых лесах юго-восточной части заповедника (Зейское ущелье) в отдельные годы может доминировать азиатская лесная мышь. Остальные виды мышевидных грызунов можно отнести к «редким».

Результаты и обсуждение

Первым шагом изучения динамики численности модельного вида в зоне влияния крупного гидросооружения является восстановление хронологии изменения плотности населения на рассматриваемой территории и в регионе. Соболь – исконный обитатель горной тайги Приамурья. Неумеренный промысел в XIX – начале XX века привел к тому, что уже в 20-е годы он сохранился лишь на отдельных разрозненных участках, в частности, на северо-западной оконечности хребта Тукурингра в междуречье рек Гилюй и Уркан (Гассовский, 1927). С 1934 по 1939 гг. добыча соболя была полностью запрещена. Расселяясь по хребту, в конце 40-х гг. соболь вновь освоил восточную часть хребта Тукурингра.

Численность соболя продолжала нарастать и в первые годы после начала заполнения Зейского водохранилища. По данным В.Г. Юдина (1984), зимой 1980/81 гг. в заповеднике обитало 1040-1170 соболей при средней плотности населения 13.7 особей на 10 км^2. С середины 1980-х гг. наметилась устойчивая тенденция снижения численности соболя в восточной части хребта Тукурингра. Депрессия продолжалась вплоть до 2005-2006 гг. В 1987-1999 гг. снижение численности соболя проявилось на большей части территории Амурской области, но наиболее резким и глубоким оно было на побережье Зейского водохранилища. Так, за эти годы плотность населения соболя снизилась в среднем по Амурской области примерно в 2 раза; по «контрольным» участкам заповедника вне побережий – в 2.4 раза; на побережье Зейского водохранилища («опытные» участки) – примерно в 12 раз (рис. 1, табл. 1).

Начиная с 2006 г., на побережье водохранилища и в Зейском заповеднике отмечался устойчивый рост численности соболя, соответствующий региональным тенденциям. С 2015-2016 гг. по всей территории заповедника, включая «опытные» территории, наметилась тенденция к незначительному снижению плотности населения соболя. За период наблюдений отмечены 2 максимальных пика численности соболя: конец 1970-х – начало 1980-х гг. и 2010-2016 гг. В эти периоды плотность населения соболя достигала 10-14 особей/1000 га. Таким образом, длительность единственного отмеченного полного популяционного цикла у соболя на рассматриваемой территории составила около 30 лет.

Вторым шагом предлагаемой методологии является определение ведущих природных факторов динамики численности модельного вида. Тенденция изменения плотности населения соболя, в целом, соотносится с динамикой суммарной относительной численности мышевидных грызунов, составляющих основу его рациона (рис. 1). Характерно, что показатели плотности населения соболя в Зейском заповеднике и на «контрольной» территории по годам хорошо коррелируют с аналогичными показателями для Амурской области (табл. 1). Это позволяет предположить, что многолетние тенденции динамики суммарного обилия мышевидных грызунов, а вслед за ними, и соболя связаны с ведущим природным фактором, одновременно воздействующим на весь регион. В качестве такого фактора, в первую очередь, следует рассмотреть солнечную активность. За показатель солнечной активности было принято среднегодовое общее количество солнечных пятен – число Вольфа (Sunspot Index ..., 2019).

Ежегодные изменения и короткие 3-5-летние циклы динамики численности мышевидных грызунов не обнаруживают очевидной связи и значимой корреляции с солнечной активностью (рис. 2, табл. 2).

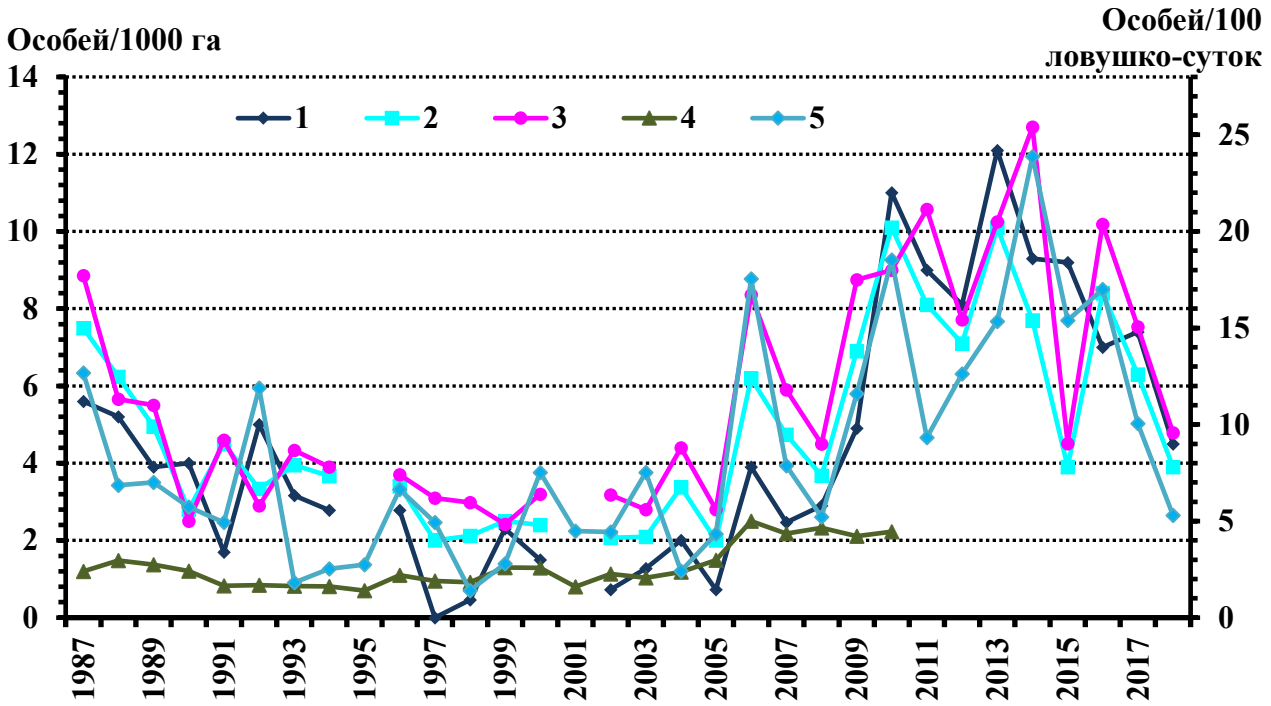


Рис. 1. Динамика плотности населения соболя на территории Зейского заповедника и Амурской области. *Условные обозначения:* 1 – побережье водохранилища, 2 – Зейский заповедник (все участки), 3 – участки вне побережий крупных водоемов и водотоков, 4 – Амурская область (по данным Управления по охране, контролю и регулированию использования объектов животного мира и среды их обитания Амурской области), 5 – суммарная попадаемость мышевидных грызунов в ловушки Геро по результатам осенних отловов (средняя для всей территории Зейского заповедника). Для последнего ряда данных использована правая вертикальная шкала – «особей/100 ловушко-суток». **Fig. 1.** Dynamics of sabel population density in Zeya Nature Reserve and Amur Region. *Legend:* 1 – shores of the water reservoir, 2 – Zeya Nature Reserve (all areas), 3 – areas outside the shores of large bodies of water and streams, 4 – Amur Region (according to the data provided by the Department for protection, control and regulation of the objects of animal world and their habitat usage of Amur Region), 5 – total catch of murids in the traps according to the results of autumn catching (average for the territory of Zeya Reserve). In the last row the right vertical scale (individuals/100 trap-day) was used.

Вместе с тем в Зейском заповеднике для этих животных, помимо упомянутых коротких колебаний обилия, также отмечен длительный, примерно 30-и летний цикл. При этом многолетние периоды повышенной суммарной численности мышевидных грызунов связаны с периодами минимальных значений пиков 10-летних циклов солнечной активности. Напротив, длительные депрессии численности грызунов связаны с периодами максимальных значений чисел Вольфа (рис. 2). Установлена значимая обратная корреляция между динамикой суммарной относительной численности мышевидных грызунов и кривой солнечной активности, сглаженной при помощи 11-летней скользящей средней (табл. 2).

Таблица 1. Коэффициенты корреляции плотности населения соболя в Зейском заповеднике с относительной численностью мышевидных грызунов и с плотностью населения соболя в целом по Амурской области. **Table 1.** Correlation coefficients of sable population density in Zeya Nature Reserve with the comparative number of murids and sable population density in Amur Region in general.

Участки Зейского заповедника: расположение относительно водохранилища	**Коэффициент корреляции с суммарной относительной численностью мышевидных грызунов на соответствующих участках Зейского заповедника**	**Коэффициент корреляции с плотностью населения соболя в Амурской области**
Побережье водохранилища («Опыт»)	r=0.25, p>0.1	r=0.42, p=0.05
Вне побережий крупных водоемов и водотоков («Контроль»)	r=0.41, p=0.05	r=0.60, p=0.001
Зейский заповедник в целом	r=0.49, p=0.01	r=0.56, p=0.01

Рис. 2. Динамика суммарной численности мышевидных грызунов в Зейском заповеднике в сопоставлении с изменением солнечной активности. **Fig. 2.** Dynamics of the total numbers of murids in Zeya Nature Reserve in comparison to the changes in solar activity.

Интересно, что сходная закономерность была отмечена и для фоновых видов мышевидных грызунов Ульяновской области (Березовская и др., 2016). Не вызывает

сомнений влияние солнечной активности на ряд процессов в биосфере. В первую очередь, это касается климатических изменений, связанных с успехом размножения и кормовой базой животных. Хотя механизмы воздействия солнечной активности на мелких млекопитающих нуждаются в дальнейшем изучении, связь этого фактора с длительным (30-летним) циклом обилия мышевидных грызунов и опосредованное влияние на динамику численности соболя восточной части хребта Тукуринга весьма показательна.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции суммарной относительной численности мышевидных грызунов на территории Зейского заповедника с различными природными факторами. **Table 2.** Correlation coefficients of the total relative numbers of murids in Zeya Nature Reserve with various natural factors.

Направления корреляций	**Коэффициент корреляции, его значимость**
Корреляция между динамикой численности мышевидных грызунов и среднегодовым количеством солнечных пятен (числа Вольфа)	r=-0.17, p>0.1
Корреляция между динамикой численности мышевидных грызунов и среднегодовым количеством солнечных пятен (числа Вольфа), сглаженным 11-и летней скользящей средней	r=-0.50, p=0.01
Корреляция между динамикой численности мышевидных грызунов и динамикой сумм осадков мая и июня	r=-0.23, p>0.1
Корреляция между динамикой численности мышевидных грызунов и динамикой сумм осадков мая и июня, сглаженной 11-и летней скользящей средней	r=-0.36, p=0.05
Корреляция между сглаженной* кривой чисел Вольфа и сглаженной динамикой сумм осадков мая-июня	r=0.58, p=0.001

Примечания к таблице 2: * − использовано сглаживание 11-летней скользящей средней. **Notes to table 2:** * − the smoothing of the moving average for 11-year-long period was used.

Другим важным природным фактором, влияющим на динамику численности мышевидных грызунов, являются осадки. Для анализа использованы данные Зейской ГМО за период с 1970 по 2018 гг. Особое значение имеет многолетняя динамика суммы осадков мая и июня. В периоды с пониженным количеством весенне-летних осадков размножение грызунов проходит наиболее успешно. Интенсивные осадки в мае–июне обычно препятствуют активному размножению грызунов. Отмечена значимая отрицательная корреляция суммарной численности мышевидных грызунов и динамики весенне-летних осадков, сглаженной 11-и летней скользящей средней (табл. 2). Необходимо отметить, что многолетние тенденции динамики осадков обнаруживают высокую, статистически достоверную, прямую корреляцию с циклами солнечной активности (табл. 2). Прямая зависимость многолетних циклов увлажнения от динамики солнечной активности характерна для Амурской области в целом (Парилов и др., 2006).

Третий шаг исследования предполагает установление основных факторов влияния водохранилища на динамику численности модельного вида – соболя. Динамика плотности населения соболя на всей территории заповедника связана с динамикой относительной суммарной численности мышевидных грызунов. Но на побережье водохранилища выявленная корреляция существенно ниже, чем на «контрольных» участках и не является

статистически значимой (табл. 1). Это свидетельствует о том, что в зоне влияния водохранилища на численность соболя влияют и другие факторы. На берегах Зейского водохранилища депрессия популяции соболя была наиболее глубокой (рис. 1). Одной из вероятных причин, резко усугубивших проявление региональной депрессии, может быть климатическое влияние крупного искусственного водоема.

Установлено, что увеличение влажности воздуха и понижение среднемесячной температуры в весенне-летний период вызывают повышенную смертность сеголетков соболя (Астафьев, 1988). С увеличением влажности в летние месяцы возрастает частота заболевания дерматитом (Лобанов, 1977). Именно весной и в начале лета крупное водохранилище, поздно освобождающееся ото льда и медленно прогревающиеся, оказывает наибольшее охлаждающее воздействие на прилегающие территории (Дьяконов, 1992). Другим важным локальным фактором воздействия гидростроительства на соболя является снижение численности мышевидных грызунов на склонах побережий крупных горных водохранилищ (Подольский и др., 2009), вероятно, также связанное с изменением микроклимата.

В условиях отсутствия охраны, появление крупного искусственного водоема может способствовать увеличению интенсивности браконьерской охоты, как это было на Бурейском водохранилище (Подольский и др., 2009). В Зейском заповеднике этот фактор антропогенного воздействия на соболя практически отсутствует.

Четвертый шаг исследования включает оценку количественных показателей изменений популяционной группировки соболя в условиях влияния водохранилища. Важнейшим признаком антропогенного влияния на модельный вид является нарушение естественной популяционной динамики, отражающееся на амплитуде колебаний численности. Для всей территории заповедника отмечена примерно 5-и кратная разница между максимальными (10.1 особей на 1000 га – 2009/2010; 2012/2013 гг.) и минимальными (2.0 особи на 1000 га – 1996/1997 гг.) показателями численности соболя. Для «опытных» участков, расположенных на побережье водохранилища, этот показатель составляет 33.2: от 0.46 (1997/1998 гг.) до 15.27 (2012/2013 гг.) особей на 1000 га; для «контрольных» участков низкогорий, удаленных от побережий – 4.4: от 2.42 (1998/1999 гг.) до 10.57 (2010/2011 гг.) особей на 1000 га. Таким образом, максимальная многолетняя амплитуда колебаний численности соболя в зоне влияния водохранилища («опытная» территория) не менее чем в 7.5 раз превышает таковую на «контрольной».

Наиболее объективным количественным показателем воздействия водохранилища на модельный вид представляется разность между средней многолетней плотностью населения на «контрольных» участках и на побережье искусственного водоема, выраженная в % от «контрольного» уровня. Для объективного расчета потерь необходимо определить временной интервал дестабилизации популяции – период ее частичной адаптации к созданию водохранилища. Если взять за «точку отсчета» завершение заполнения Зейского водохранилища до НПУ (1985 г.), когда стало отчетливо проявляться снижение численности соболя на побережье, и учесть, что с 2005-2006 гг. динамика его численности на «опытных» участках синхронизировалась с таковой на «контрольных» участках и по Амурской области в целом (рис. 1), то длительность периода дестабилизации составляет около 20 лет. Средняя многолетняя плотность населения соболя за этот период 1986-2005 гг. составляла: на «опытных» участках (побережье водохранилища) – 2.5 особей/1000 га; на «контрольных» участках – 3.9 особей/1000 га. Таким образом, ежегодные потери популяции составляли 1.4 особи на 1000 га – 35.4% от контрольного уровня.

Выводы

1. Наше исследование показало, что основным природным фактором, определяющим динамику численности соболя на рассматриваемой территории, являются

многолетние тенденции изменения суммарных показателей относительной численности мышевидных грызунов (табл. 1).

2. В свою очередь, динамика численности мышевидных грызунов на территории Зейского заповедника проявляет значимую отрицательную зависимость от длительных (30-и летних) циклов солнечной активности (рис. 2, табл. 2). Вероятно, именно с этим связана синхронность колебаний численности соболя в восточной части хр. Тукурингра и по всей Амурской области в целом (рис. 1, табл. 1).
3. Другим важным фактором, влияющим на обилие мышевидных грызунов, являются осадки весенне-летнего сезона – периода их наиболее активного размножения. Интенсивные осадки в мае-июне обычно препятствуют успеху размножения грызунов. Отмечена значимая отрицательная корреляция суммарной численности мышевидных грызунов и сглаженной динамики весенне-летних осадков (табл. 2). Необходимо обратить внимание на то, что для рассматриваемой территории (табл. 2) и Амурской области в целом характерна прямая зависимость многолетних циклов увлажнения от динамики солнечной активности (Парилов и др., 2006).
4. Важнейшим фактором антропогенного воздействия на модельный вид следует признать микроклиматическое влияние водохранилища. Это проявляется как напрямую (через повышенную заболеваемость дерматитом и снижение выживаемости молодняка), так и опосредованно (через снижение численности мышевидных грызунов на склонах побережья водохранилища). В условиях отсутствия специальной охраны, появление крупного искусственного водоема может способствовать увеличению интенсивности браконьерской охоты, как это было на Бурейском водохранилище, но в Зейском заповеднике браконьерская добыча соболя практически отсутствует.
5. Для количественной характеристики воздействия водохранилища на модельный вид целесообразно использовать разность между средней многолетней плотностью населения на «контрольных» участках и на побережье искусственного водоема, выраженную в процентах от «контрольного» уровня, за период адаптации популяции соболя к появлению искусственного водоема: с 1985 по 2016 гг. (около 20 лет).
6. Признаком относительной адаптации является синхронизация динамики численности модельного вида на «опытных» и «контрольных» участках.
7. Средние ежегодные потери популяции соболя в этот период составляли 1.4 особи на 1000 га – 35.4% от контрольного уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Астафьев А.А. 1988. Погодные условия и результативность промысла соболя // Хронологические изменения численности охотничьих животных в РСФСР: Сборник научных трудов. М.: Б. и. С. 137-139.

Гассовский Г.Н. 1927. Гилюй-Ольдойский охотничье-промысловый район // Производственные силы Дальнего Востока. Вып. 4. Животный мир. Хабаровск; Владивосток: Книжное дело. С. 471-570.

Березовская Г.Б., Коробейникова А.С., Хайсарова А.Н. 2016. Некоторые аспекты многолетней динамики численности фоновых видов грызунов и изменения солнечной активности на примере лесокустарниковых биотопов Ульяновской области // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. Пенза: изд-во Пензенского государственного университета. № 3 (15). С. 14-24.

Дьяконов К.Н. 1992. Взаимодействие водохранилищ с ландшафтами прилегающих территорий и проблемы эколого-географической экспертизы // Основы эколого-географической экспертизы. М.: Изд-во МГУ. С. 178-193.

Карасева Е.В., Телицына А.Ю. 1996. Методы изучения грызунов в полевых условиях. М.: Наука. 200 с.

Кузякин В.А., Челинцев Н.Г., Ломанов И.К. 1990. Методические указания по организации, проведению и обработке данных зимнего маршрутного учета охотничьих животных в РСФСР. М.: ЦНИЛ Главохоты РСФСР. 51 с.

Лобанов Г.И. 1977. Влияние летних осадков на заболеваемость соболей дерматитом // Экология и использование охотничьих животных Красноярского края. Красноярск: Сибирское отделение АН СССР. С. 38-39.

Парилов М.П., Игнатенко С.Ю., Кастрикин В.А. 2006. Гипотеза влияния многолетних гидрологических циклов и глобального изменения климата на динамику численности японского, даурского журавлей и дальневосточного аиста в бассейне реки Амур // Влияние изменения климата на экосистемы бассейна реки Амур. М.: WWF России. С. 92-110.

Подольский С.А. 1993. К методике учета крупных копытных в Зейском заповеднике // Явления и процессы в природном комплексе Зейского заповедника: Сборник научных трудов. М.: Пресфок. С. 64-86.

Подольский С.А., Игнатенко С.Ю, Кастрикин В.А., Антонов А.И., Парилов М.П. 2009. Основные закономерности динамики животного населения и особенности охраны фауны в зонах влияния крупных горных водохранилищ Дальнего Востока // Байкальский зоологический журнал. № 4. С. 98-105.

Русанов Я.С. 1986. Основы охотоведения. М.: Изд-во МГУ. 160 с.

Юдин В.Г. 1984. Численность и биотопическое распределение крупных млекопитающих в зимний период // Млекопитающие Зейского заповедника. Владивосток. С. 118-135.

Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO). 2019 [Электронный ресурс http://www.sidc.be/silso/datafiles/ (дата обращения 20.03.2019)].

METHODOLOGICAL ASPECTS OF STUDYING POPULATION DYNAMICS OF SABLE (*MARTES ZIBELLINA* L., 1758) IN THE ZONE OF INFLUENCE OF THE ZEYA RESERVOIR

© 2020. S.A. Podolskiy*, **, L.Yu. Levik*, K.P. Pavlova**, E.K. Krasikova****

**Water Problems Institute of the Russian Academy of Science*
Russia, 119333, Moscow, Gubkina Str. 3. E-mail: sergpod@mail.ru
***Zeya Nature Reserve*
Russia, 676246, Amur Region, Zeya, Stroitelnaya Str. 71. E-mail: zzap@mail.ru
****M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*
Russia, 119991, Moscow, Leninskiye Gori 1. E-mail: lilia-levik@yandex.ru

Received June 15, 2020. After revision July 15, 2020. Accepted November 01, 2020.

On the basis of long-term data of the Zeya reserve the role of natural and anthropogenic factors in the dynamics of the sable population (*Martes zibellina* L., 1758) of the zone of influence of the Zeya reservoir is estimated. A close direct dependence of the sable population density with long-term trends in the total relative number of rodents was established. The negative dependence of the last indicator with long-term trends in solar activity and the amount of spring-summer precipitation was established. Significant deviations from the natural population dynamics of the sable, including the deepest and longest depressions, as well as increased amplitude of population fluctuations were noted on the coast of the reservoir. For the zone of influence of the Zeya reservoir, the duration of the period of significant destabilization of the sable population under the influence of hydraulic engineering is established.

Keywords: sable, rodents, population dynamics, solar activity, precipitation, water engineering, evaluation of the effect.

DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10071

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2020, том 4, № 4, с. 14-36

МЕТОДЫ ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 911.375.62 (460.356)

ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕЛЕНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ГОРОДОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УРБАНИЗИРОВАННЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА МАЛАГА)

© 2020 г. Е.Е. Миронова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет
Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы
E-mail: eev.mironova@yandex.ru, liza.mironova@icloud.com

Поступила в редакцию 20.11.2020. После доработки 30.11.2020. Принята к публикации 01.12.2020.

Зеленая инфраструктура является одним из наиболее важных компонентов городской среды, влияющим на качество жизни населения. Зеленые насаждения могут быть инструментом для поддержания целостности и устойчивости городских экосистем. Непрерывные исследования структуры и функций городской зеленой инфраструктуры и мониторинг её качества необходимы для оптимизации городской среды.

На примере Малаги (Испания), одного из ведущих «умных» городов Европы, рассматриваются три методологических подхода к оценке пространственной конфигурации и структуры зеленых насаждений и фрагментов природного ландшафта города. Применяются современные методы ГИС-моделирования для оценки зеленой инфраструктуры Малаги с точки зрения характеристики земельного покрова (при помощи CORINE Land Cover), потенциальных объемов предлагаемых экосистемных услуг (при помощи Urban Atlas) и конфигурации, фрагментированности и пространственной структуры зеленых насаждений (при помощи GuidosToolBox). На основе метода морфологического пространственного анализа выделены основные базовые резерваты (ядра) и острова зеленой инфраструктуры, экологические коридоры, проведена оценка связности и фрагментированности зеленых насаждений, критически значимых для определения единства экологического каркаса. Приведены количественные характеристики зеленой инфраструктуры, потенциально сравнимые на разных уровнях изучения земельного покрова. В исследовании применено сочетание нескольких методов, позволяющих рассмотреть территорию на разных уровнях пространственного анализа и определить системообразующие участки сети зеленой инфраструктуры.

Ключевые слова: зеленая инфраструктура, ГИС-моделирование, CORINE Land Cover, Urban Atlas, связность, фрагментированность зеленых насаждений, морфологический пространственный анализ.

DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10072

Озеленение, несомненно, является одним из основных экологических способов оздоровления и благоустройства городской среды. Частью комплексной программы мероприятий по планировке любой урбоэкосистемы является внедрение обширной и развитой сети зеленой инфраструктуры (Поршакова, 2016). Устойчивость городов будущего в значительной степени будет зависеть от того, насколько человечество способно поддерживать качество городских зеленых насаждений и их экологических функций (Breuste et al., 2015). Существование и развитие городов в рамках концепции устойчивого развития зачастую оказывается ограниченным не только пространственной неразвитостью экологического каркаса, но также снижением связности зеленой инфраструктуры и высокой

степенью фрагментированности зеленых насаждений (McNicoll, 2005). Поэтому помимо планирования и внедрения новых зеленых насаждений и управления ими крайне важной задачей становится последующий анализ их качества.

Урбанизированные территории − сложные и многообразные системы, анализ эволюции которых часто страдает из-за нехватки пространственных данных и недостаточного понимания влияния социально-экономических и физических факторов на рост этих систем. Наиболее интересными, с точки зрения изучения этих процессов, являются системы, испытывающие, с одной стороны, сильный антропогенный пресс, но, с другой, сохраняющие при этом значительную часть природного каркаса. Европейское Средиземноморье, которое постоянно развивается за счет активного вовлечения туристических ресурсов, является одним из самых благоприятных регионов для проведения такого рода исследований.

В данной работе в качестве региона тематического исследования был выбран город Малага, на территории которого располагаются популярные туристические курорты и стремительный рост населения которого за период с 1960-х годов поставил ряд вопросов, касающихся эффективности городского планирования. Для решения задач исследования была предпринята попытка интеграции географических информационных систем, применяемых для моделирования роста городов и прогнозирования развития территорий, в геоэкологическую оценку урбанизированных территорий. Также исследование направлено на применение основных методических подходов к мониторингу и анализу процесса роста урбанизированных территорий с целью дальнейшего прогноза влияния урбанизации на окружающую среду и предложения тактик эффективного городского планирования.

Основной целью этого исследования является выявление роли зеленой инфраструктуры как одного из важнейших геоэкологических элементов урбанизированных территорий Малаги и применение современных методов учета и оценки состояния зеленой инфраструктуры. Для достижения поставленной цели необходимо выявить физико-географические и социально-экономические предпосылки пространственного роста и развития города; рассмотреть современные методические подходы к оценке пространственной конфигурации и структуры зеленых насаждений и фрагментов природного ландшафта в городе и подобрать те из них, которые наиболее полно решают поставленные задачи. Применение выбранных методов позволит решить задачу оценки критически значимых параметров связности и фрагментированности зеленых насаждений на основе пространственного морфологического анализа.

Материалы и методы

Предмет исследования. Зеленая инфраструктура как термин не имеет единого общепризнанного определения. Современное понимание понятия «зеленая инфраструктура» (ЗИ) в контексте данного исследования чаще всего согласовывается с определением, данным Европейской комиссией в 2013 году (Green Infrastructure ..., 2013): зеленая инфраструктура включает в себя широкий спектр природных и полуприродных активов, стратегически планируемых как единая сеть взаимосвязанных компонентов. Спектр попадающих под определение активов варьирует от уличных зеленых насаждений и небольших скверов до крупных парков, кладбищ, зеленых стен и крыш (вертикальные зеленые элементы).

Озеленение городов является одной из самых важных траекторий оздоровления городской среды. Зеленые насаждения смягчают восприятие жарких и сухих погодных условий, повышают ионизацию воздуха, создают противошумовой эффект, защищают от химического загрязнения и поглощают многие вредные примеси. Считается, что 1 гектар здоровых лесных насаждений за день поглощает около 0.25 т углекислого газа, при этом выделяя 0.2 т кислорода (Голубчиков и др., 2001).

В последние десятилетия особо отмечается огромный потенциал городской зеленой инфраструктуры для решения текущих проблем городского планирования, особенно в контексте устойчивого развития. Развитие зеленой инфраструктуры не означает создание совершенно нового каркаса; скорее, оно символизирует улучшение связности уже существующей сети зеленых насаждений для улучшения функционирования экосистемы.

Регион исследования − город Малага (автономное сообщество Андалусия, Испания), располагается на побережье Средиземного моря у подножья гор Монтес-де-Малага (Малагские горы), являющихся частью системы Андалусских гор. Горные участки региона принадлежат к структурно-денудационным и складчатым горам на метаморфических и карбонатных породах; юго-западную часть региона занимают обширные аллювиальные равнины междуречья рек Гуадальорсе, Кампанийяс и Гуадалмедина.

Для изучаемого региона характерен сухой и жаркий средиземноморский климат, что, несомненно, влияет на необходимость обеспечения города развитой зеленой инфраструктурой. Средиземноморские города с их жарким и сухим летом нуждаются в тенистых участках, способных смягчить высокие температуры, тем самым повышая качество жизни горожан. Все быстрее развивающаяся технология высаживания «зеленых крыш» также способствует снижению энергопотребления за счет эффективного охлаждения помещений.

Малага располагается в зоне ксерофитных редколесий и кустарников под общим местным названием *томилляры* (Романова и др., 2014). Томилляры представляют собой результат длительного чрезмерного выпаса: деревья появляются в ландшафте все реже, зато развивается обширное покрытие из тимьяна (*Thymus* spp.), розмарина (*Rosmarinus* spp.), ладанника (*Cystus salviifolius*[1], *C. albidus*) и прочих низкорослых кустарников и кустарничков. Зональная средиземноморская растительность создает довольно специфические условия для формирования каркаса зеленой инфраструктуры. Кустарниковый характер растительности на значительной части территории слабо благоприятствует формированию крупномассивных городских парков с обширным древесным покровом. В связи с этим подавляющая часть зеленой инфраструктуры образована либо интродуцированными видами, такими как магнолия (*Magnolia grandiflora*), типуана (*Tipuana tipu*), жакаранда (*Jacaranda mimosaefolia*), либо гибридами и культиварами, например, липой окрашенной (*Tilia* × *euchlora*) и померанцем (*Citrus* × *aurantium*; табл. 1).

Происхождение большей части древесной растительности в городе берет начало в 1930-х годах в регионе Монтес-де-Малага, где в то время значительные площади были отведены под зеленые насаждения с целью уберечь город от сильных наводнений, связанных с разливом р. Гуадалмедина. Использовались такие породы, как европейская кедровая сосна (*Pinus cembra*) и сосна алеппская (*P. halepensis*), идеально подходящие для бедных и сильно эродированных почв. На основе искусственных насаждений со временем начала развиваться типично средиземноморская растительность, состоящая из дуба каменного (*Quercus ilex*), дуба пробкового (*Q. suber*), рожкового дерева (*Ceratonia siliqua*), мирта обыкновенного (*Myrthus communis*), ясеня (*Fraxinus* spp.), земляничного дерева (*Arbutus unedo*).

Городская планировка играет важную роль в понимании конфигурации зеленой инфраструктуры. В современных границах Малаги можно выделить две крупные зоны: ядро урбанизации как таковое – «сити» и периферию – малозаселенные, но крупные по площади районы. Периферийные районы, по сути своей сельские, были включены в черту города после того, как Малага испытала новый вид демографического давления в виде миграционного притока сельских жителей, пострадавших вследствие появления в Европе виноградной филлоксеры (*Dactylosphaera vitifoliae*). Последние десятилетия XIX века и

[1] Латинские названия растений даются по работе “Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de Málaga” (2011).

начало XX века ознаменовались глубокой экономической депрессией, которая была вызвана одновременным крахом металлургической промышленности и упадком виноградарства. В этом контексте в Малаге начала поощряться жилищная политика «дешевых домов» для нового населения и в политических целях были спроектированы новые кварталы Тринидад и Сьюдад-Хардин (Reinoso et al., 2010). Проект «дешевой застройки» в конечном итоге привлек настолько большое количество заинтересованных жителей, что оказался уже не в состоянии покрывать спрос на жилье. Переполненность районов Ла-Тринидад, Капучинос и многих других возросла настолько, что вызвала спонтанные ядра расселения на периферии города: Эль-Пало в современном дистрикте Эсте, Арройо-дель-Куарто в дистрикте Круз-де-Умийядеро, Мангас-Вердес в Сьюдад-Хардин и многие другие (Del Carmen Díaz Roldán, 1996).

Таблица 1. Наиболее часто встречающиеся виды в городских парках и на озелененных бульварах Малаги (Plan General ..., 2011).

	Интродуцированные виды	**Автохтонные виды**
Деревья	Типуана типу (*Tipuana tipu*), Брахихитон (*Brachychiton* sp.), Померанец (*Citrus* × *aurantium*), Жакаранда мимозолистная (*Jacaranda mimosaefolia*), Мелия ацедерах (*Melia azedarach*), Робиния ложноакациевая (*Robinia pseudoacacia*), Гревиллея крупная (*Grevillea robusta*), Рожковое дерево (*Ceratonia silique*)	Багрянник европейский (*Cercis siliquastrum*), Олива европейская (*Olea europaea*), Ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), Сосна пиния (*Pinus pinea*)
Кустарники	Бересклет японский (*Evonimus japonicas*), Лантана сводчатая (*Lantana camara*), Бирючина блестящая (*Ligustrum lucidum*)	Жасмин (*Jasminum* sp.), Олеандр (*Nerium oleander*), Тамарикс (*Tamarix* sp.), Филлирея узколистная (*Phillyrea angustifolia*), Фисташка мастиковая (*Pistacia lentiscus*), Ретама односемянная (*Retama monosperma*), Розмарин лекарственный (*Rosmarinus officinalis*), Боярышник однопестичный (*Crataegus monogyna*)

С 1990-х годов правительство муниципалитета приступило к подготовке плана обновления городского центра, начавшего терять привлекательность для проживания. Туристический бум 1960-х годов привел к тому, что основная деятельность по управлению новыми районами на периферии попала в руки частной инициативы. Тогда город стал расти хаотично и нерационально, без контроля со стороны администрации. Джентрификация хотя

и позволила центру города стать ключевым символическим пространством, но, тем не менее, не помогла сделать центральный район более пригодным для повседневной жизни; теперь из-за чрезмерного туристического использования такие места города, как пляж Малагета, площадь Пласа-де-ла-Мерсед с её окрестностями, площадь Пласа-де-ла-Марина, бульвар Пасео-дель-Парке и проспект Аламеда-Принсипаль, страдают от переизбытка посетителей (Barrera-Fernández at al., 2019).

Процесс обновления города и повышения комфортности городской среды продолжался на протяжении всего последнего десятилетия XX века. В 1997 году Малага получила 2-ю Европейскую премию, присужденную Советом муниципалитетов и регионов Европы за концепцию устойчивого городского планирования. В 1998 году город также получил премию Dubai Best Practice Award за ведущую повестку дня в области устойчивого развития, в том числе за выдающиеся успехи в развитии зеленой инфраструктуры. В 2000 году было создано государственное агентство Обсерватория городской среды Малаги (OMAU).

В 2013 году был запущен проект Urban Empathy 2013: партнерство 11 средиземноморских городов под эгидой Европейского Союза, направленное на сотрудничество в рамках достижения устойчивых моделей развития городов (Urban Empathy ..., 2020). СМИ отмечают, что Малага может стать хорошим кандидатом на получение награды EC Green Capital в 2020 году (Málaga ..., 2017). Кроме того, в 2015 году была утверждена программа Agenda21, которая представляет собой Повестку по комплексной устойчивости городской среды Малаги на период с 2020 по 2050 годы (Agenda Urbana Málaga, 2016). Отчет программы содержит теоретическое пояснение городского планирования и современного состояния зеленой инфраструктуры Малаги.

Сегодня правительство Малаги старается менять ситуацию в лучшую сторону путем продвижения планов по озеленению города. Финансовую поддержку получает множество экологических проектов, таких как Agenda Urbana Málaga, Urban Empathy и Smart Cities. Анализ эволюции зеленых зон за период с 2005 по 2013 год показал, что коэффициент зеленых насаждений на душу населения демонстрировал непрерывную тенденцию к росту, в 2008 году составив 6.33 м^2 на жителя, а в 2015 году уже достигнув отметки в 7.60 м^2 на жителя (рис. 1; Trigo, 2015; Agenda Urbana Málaga, 2016).

В 2020 году город стал победителем среди всех номинантов на премию Европейской Комиссии «European Capitals of Smart Tourism», в том числе за успехи в организации здоровой и комфортной среды для привлечения туристов (European Commission, … 2020). Развивающиеся городские программы имеют существенный недостаток, т.к. они недостаточно подкреплены геоэкологическими исследованиями, а результативность уже существующих проектов научно не оценена.

Следует отметить, что трансформация далеко не однородна на всей территории Малаги. Так, в районах Байя-де-Малага и Гуадальорсе наблюдался отрицательный прирост показателя площади зеленых насаждений на душу населения: -0.42 м^2 на жителя и -0.09 м^2 на жителя соответственно (рис. 2; Agenda Urbana Málaga, 2016).

В исследовании мы применили три основных метода ГИС-моделирования зеленой инфраструктуры: во-первых, модели, используемые для характеристики земельного покрова (CORINE Land Cover), во-вторых, модели, используемые для оценки зеленой инфраструктуры относительно потенциальных объемов предлагаемых экосистемных услуг (Urban Atlas), и, в-третьих, модели, используемые для оценки конфигурации, фрагментированности и пространственной структуры зеленой инфраструктуры (MSPA-анализ при помощи программного пакета GuidosToolbox). Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, а также границы применения на разных уровнях территориальной дифференциации. Ниже дан обзор применяемых методов и их сравнение с целью выявления наиболее пригодного для решения поставленных задач.

CORINE Land Cover. В контексте изучения зеленой инфраструктуры этот проект, являющийся дочерней программой системы Copernicus (Copernicus Land Monitoring ..., 2020), может послужить базовым источником получения пространственных данных о землепользовании и ландшафтном покрове. База данных CORINE, включающая в себя различные категории землепользования с присвоенным им уникальным трехзначным кодом, обновляется с регулярностью в 6-10 лет, предоставляя в открытом доступе данные в векторном и растровом форматах, доступные для свободного использования.

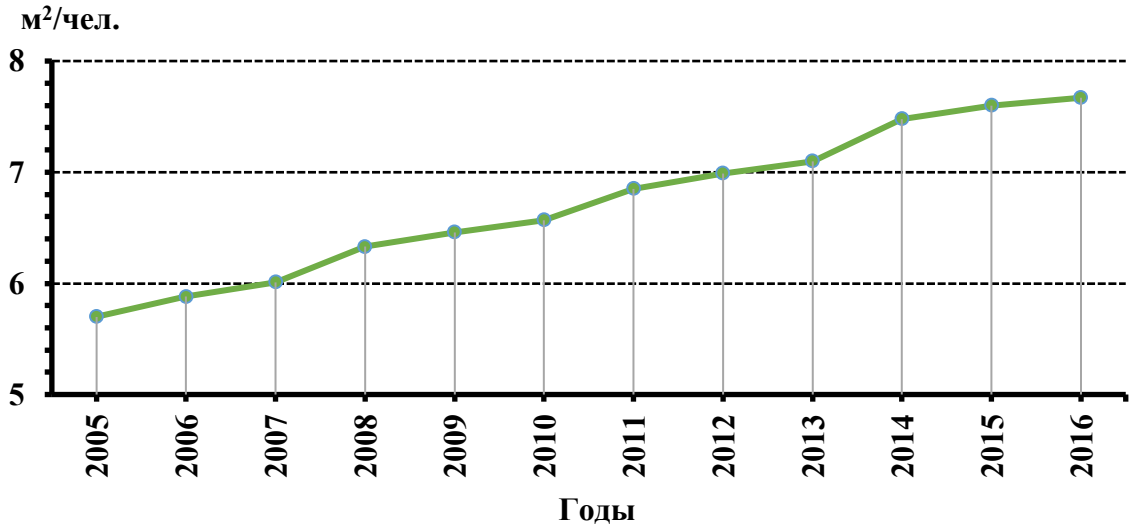


Рис. 1. Динамика показателя площади зеленых насаждений на душу населения (м^2/чел.) за период с 2005 г. по 2016 г.

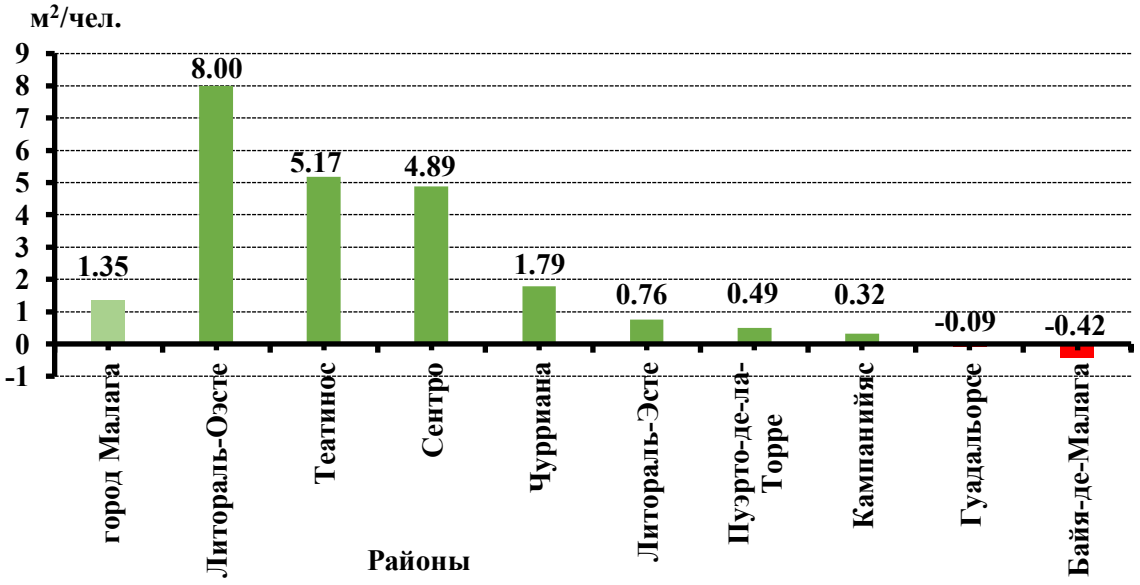


Рис. 2. Прирост показателя площади зеленых насаждений на душу населения (м^2/чел.) за период с 2005 г. по 2012 г. по отдельным районам.

Качество данных CORINE Land Cover можно оценить как высокое, а количество ошибочно определенных категорий землепользования обычно невелико (Dige et al., 2011). Тем не менее, эти данные более подходят для оценки на национальном уровне, нежели на

региональном. Растры CORINE не обладают достаточной детальностью для проведения оценки зеленой инфраструктуры на городском уровне. Смешанные классы со сложными моделями использования в классификации CORINE, такие как, например, «пашни с отдельными территориями с естественной растительностью» (класс 243), «сочетание полей с однолетними и многолетними с/х культурами, пастбищ или пашен» (класс 241), являются довольно субъективно очерченными классами. В контексте зеленой инфраструктуры классы комплексного сельскохозяйственного использования имеют жизненно важное значение для биоразнообразия, и, следовательно, должны учитываться как отдельные элементы, однако, идентификация структуры таких комплексных участков затрудняется.

Такая же проблема возникает при моделировании каркаса зеленой инфраструктуры внутри населенных пунктов, в зоне городской застройки. С учетом недостаточной детализации и возможного ошибочного классифицирования некоторых объектов, CORINE не всегда подходит для локального анализа техногенных комплексов. Например, по утверждению команды CORINE, земли можно отнести к классу 112 (непрерывная городская застройка), когда здания, дороги и другие искусственные поверхности занимают от 50 до 80% процентов от общей площади (Updated CLC …, 2019). Таким образом, уровень генерализации при применении данного метода весьма велик и локальная зеленая инфраструктура, находящаяся в границах зоны застройки, скорее всего, не будет учтена. Следовательно, детальная классификация CORINE Land Cover мало способствует углублению изучения проблем зеленой инфраструктуры, а более низкое пространственное разрешение усложняет задачу (Dige et al., 2011).

Urban Atlas. European Urban Atlas, как и CORINE Land Cover, является частью службы мониторинга земель Copernicus (Copernicus Land Monitoring ..., 2020). Urban Atlas располагает разрешением в 50 метров, что в два раза выше, чем у базы геоданных CORINE Land Cover. Urban Atlas является базой данных о землепользовании на городском уровне с самым высоким разрешением, и его главное отличие от CORINE Land Cover заключается в том, что CORINE содержит трехуровневые классификации для категорий пахотных земель (по типам культур) и лесов (по типам растительности), что позволяет лучше дифференцировать типы земельного покрова, тогда как в Urban Atlas такая классификация не используется. Земельный покров подразделяется на 20 различных классов землепользования, причем 17 из них являются различными категориями техногенного характера.

Urban Atlas является результатом совмещения тысяч изображений с европейских спутников; классифицирование основано на сочетании фотоинтерпретации и объектно-ориентированной классификации с трехэтапной валидацией, включающей внутреннюю проверку качества дешифрирования, оценку независимых экспертов и технической верификацией со стороны Европейского центра землепользования и пространственной информации (European Topic Centre Land Use and Spatial Information; Prastacos et al., 2011). Поэтому Urban Atlas можно считать более удобным и рациональным инструментом получения данных о зеленой инфраструктуре, чем CORINE.

Представляется возможным сгруппировать категории землепользования Urban Atlas по экосистемным услугам, предоставляемым каждым классом. Такие категории, как леса, кустарниковая и травянистая растительность и открытые пространства отвечают за сохранение биоразнообразия, предотвращение изменений климата, управление стоком, рекреацию, благополучие и здоровье населения. Также благоприятствуют предотвращению изменений климата сельскохозяйственные угодья (категории пахотных земель, виноградников, фруктовых садов и пастбищ); помимо этого, они выполняют такие важные функции, как обеспечение продовольственной безопасности и управление стоком. Городская зеленая инфраструктура, наравне с предотвращением изменений климата и предоставлением возможности для рекреации, также обеспечивает культурную идентичность населения и

предоставляет важную услугу капитализации земли. Также на капитализацию земли влияет расположение водных объектов и зон для спорта и рекреации.

Морфологический пространственный анализ (MSPA-анализ). Метод морфологического пространственного анализа основывается на принципе связности элементов зеленой инфраструктуры. В основном, в научной литературе анализ принципа связности заключается в оценке способности зеленой инфраструктуры сохранять местообитания фауны и предоставлять видам возможность мигрировать (Liquete et al., 2015). Из-за этого многие научные работы на тему связности не имеют прямого отношения к городским системам. Скорее, они сфокусированы на анализе зеленой инфраструктуры пригородов крупных агломераций, или же сельских районов. Тем не менее, в контексте зеленой инфраструктуры идея связности так же важна, как и принцип её многофункциональности (Hansen, Pauleit, 2014).

Ландшафтная связность может быть рассчитана с использованием интегрального индекса связности (IIC) и вероятности связности (PC) – индикаторов, основанных на теории графов (Flynn, Traver, 2013). IIC и PC не только учитывают барьерный эффект матрицы ландшафта, но также оценивают несущую способность каждого его участка. Однако этих показателей недостаточно для извлечения пространственной морфологической информации при моделировании сети зеленой инфраструктуры, поскольку уже существующие структурные узлы и коридоры игнорируются (Wickham et al., 2010).

В качестве альтернативы вышеупомянутым индикаторам может использоваться метод морфологического пространственного анализа (MSPA), который обеспечивает более гибкий подход к учету связности зеленой инфраструктуры. MSPA, используя в качестве входных данных растровое изображение изучаемой территории, ориентируется на геометрию и связность компонентов и может автоматически определять существующие коридоры (Batty, Rana, 2002). Уникальности методу добавляет система автоматического обнаружения экологических коридоров разного масштаба между функциональными ядрами изображения, а также дальнейшее ранжирование идентифицированных путей на основе определения относительной важности каждого компонента в данной сети (Vogt, Riitters, 2017). Учитывая тот факт, что метод применим к любой территории, для которой имеются в наличии растровые данные о землепользовании региона и полную автоматизацию процесса, он чрезвычайно удобен в применении.

В целях анализа элементов зеленой инфраструктуры Малаги было использовано некоммерческое программное обеспечение GuidosToolBox (The Graphical User Interface for the Description of Objects and their Shapes Toolbox; Vogt, Riitters, 2017). Все инструменты GuidosToolbox основаны на геометрических принципах и, следовательно, могут применяться в любом масштабе и для любых видов растровых данных. Программа использует в качестве входных данных бинарное изображение, в котором пространственное положение каждого пикселя определяется кодом «1» или «0». В таком случае значение «1» соответствует переднему плану изображения, а именно изучаемым элементам ландшафта, в данном случае – зеленая инфраструктура; значение «0» соответствует заднему плану, фону, т.е. элементам, не являющимся зеленой инфраструктурой. Такими элементами могут служить городская застройка, промышленные объекты, водные объекты и прочее.

Результат анализа в значительной степени зависит от параметра Edge Width. Увеличение параметра Edge Width (буквально – ширина краевых участков переднего плана) увеличивает область заднего плана за счет основной области переднего плана, и, соответственно, может изменить класс MSPA. В данной работе значение Edge Width, с учетом которого представляется возможность построить наиболее наглядную картину, равняется 4 пикселя.

Область переднего плана бинарного изображения разделена на семь общих классов MSPA: ядро (Core), остров (Islet), окно (Perforation), край (Edge), петля (Loop), коридор

(Bridge) и ответвление (Branch; табл. 2, рис. 3). Эта сегментация приводит к взаимоисключающим классам, которые при слиянии в один объект в точности соответствуют исходной области переднего плана. Область заднего плана изображения подразделяется на три класса: фон (Background), просвет окна (Core Opening) и окаймление (Border Opening).

Результаты и обсуждение

Количественная характеристика земельного покрова по данным CORINE Land Cover

Системы землепользования на территории Малаги можно разделить на 3 блока: это урбанизированные территории, сельскохозяйственные регионы и территории наименьшего антропогенного вмешательства, где преобладает естественная растительность (рис. 4).

По данным CORINE Land Cover, в пределах городского ядра Малаги на побережье значительную часть территории занимает непрерывная (23.7 км^2) и прерывистая (18.9 км^2) городская застройка. Около 21 км^2 территории занимают промышленные зоны.

Таблица 2. Классы переднего и заднего планов и их пространственное значение.

Класс	Пространственное значение
Ядро (Core)	Пиксели зеленой инфраструктуры, окруженные со всех сторон также пикселями переднего плана на расстояние, превышающее указанное.
Остров (Islet)	Пиксели зеленой инфраструктуры, не окружающие ядро. Это единственный не связанный класс.
Окно (Perforation)	Пиксели зеленой инфраструктуры, формирующие переходную зону между передним планом и фоном для внутренних областей.
Край (Edge)	Пиксели зеленой инфраструктуры, формирующие переходную зону между передним планом и фоном для внешних областей.
Коридор (Bridge)	Пиксели зеленой инфраструктуры, которые соединяют два или более непересекающихся ядра.
Петля (Loop)	Пиксели зеленой инфраструктуры, которые соединяют область ядра с самой собой.
Ответвление (Branch)	Пиксели зеленой инфраструктуры, которые тянутся от области ядра, но не соединяются с другой областью ядра.
Просвет окна (Core Opening)	Пиксели заднего плана, формирующие внутреннюю зону отверстия.
Окаймление (Border Opening)	Пиксели заднего плана, формирующие переходную зону между краем и фоном.
Фон (Background)	Пиксели заднего плана, окруженные со всех сторон также пикселями заднего плана на расстояние, превышающее указанное.

Основные сельскохозяйственные районы располагаются по периферии, на северо-востоке и северо-западе Малаги. Большую часть территории занимают фруктовые сады – 43.8 км^2, также значительную часть составляют оливковые плантации, занимающие 28.7 км^2. Участки комплексного, но преимущественно сельскохозяйственного использования составляют в общей сложности 34.2 км^2. Обрабатываемые угодья занимают всего лишь 9.5 км^2, из них 2.3 км^2 − зоны неорошаемого земледелия, а 7.2 км^2 − орошаемого. Пастбища занимают 17.7 км^2.

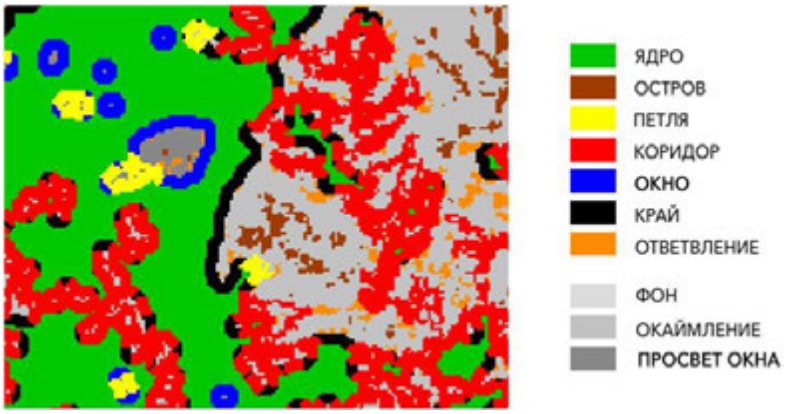


Рис. 3. Фрагмент растра MSPA.

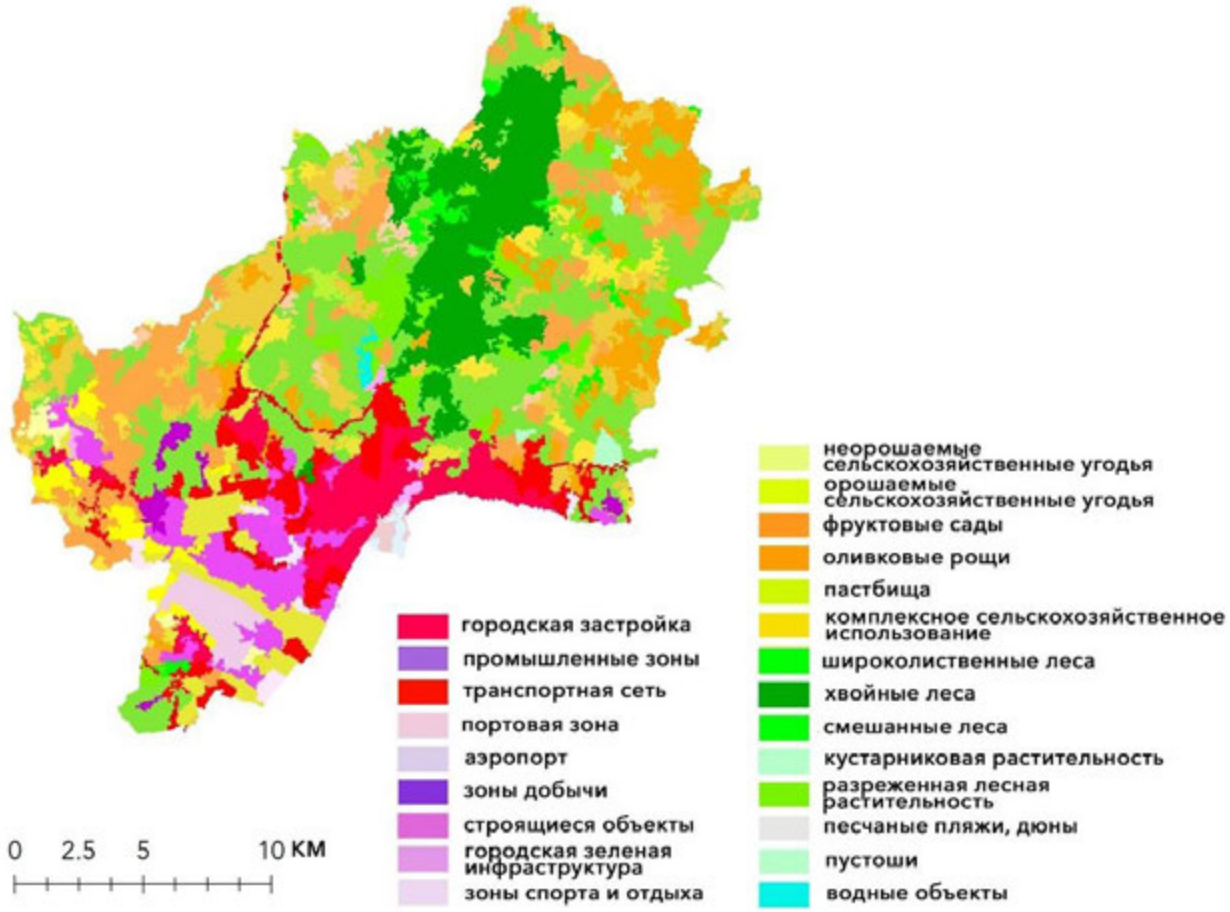


Рис. 4. Землепользование города Малага (по данным CORINE Land Cover 2018).

Среди естественной растительности преобладают кустарники, которыми покрыты земли общей площадью в 93.6 км^2. Хвойные леса занимают 45.7 км^2, широколиственные – 2.9 км^2, смешанные – 3.12 км^2. Разреженная лесная растительность произрастает на территории общей площадью 14.2 км^2. Естественная растительность сохранилась в наибольшей степени в северо-восточном секторе города, где проживает меньше всего населения.

В результате структура землепользования Малаги выглядит следующим образом: 82.8 км^2 (21%) занимают урбанизированные территории, 163.2 км^2 (41%) − естественная растительность, 149.7 км^2 (38%) − сельскохозяйственные угодья.

В пределах городского ядра Малаги, по данным CORINE Land Cover, общая площадь, покрытая растительностью, составляет всего 1.45 км^2, и приурочена к зонам городской зеленой инфраструктуры.

CORINE Land Cover позволяет получить общее представление о земельном покрове города, однако, изучить конфигурацию зеленой инфраструктуры в зоне жилой городской застройки не представляется возможным из-за излишней степени генерализации. В таком случае, более подходящей методикой учета количественных характеристик зеленой инфраструктуры является Urban Atlas, характеризующийся более детальной классификацией городской ткани.

Оценка зелёной инфраструктуры по потенциальным объемам предлагаемых рекреационных услуг по данным Urban Atlas

В общей сложности, по данным Urban Atlas, на территории Малаги зеленая инфраструктура в своих различных проявлениях занимает около 313.9 км^2 или 80% территории (рис. 5, табл. 3).

Зеленые насаждения, как известно, активно улавливают и нейтрализуют потенциально опасные для здоровья физико-химические элементы и соединения; зеленая инфраструктура выполняет ряд важных функций в городе, среди которых средообразующая, санитарно-гигиеническая, рекреационная (Голубчиков и др., 2001). Разумеется, не менее важной является декоративная функция зеленых насаждений. Анализ обобщенных групп услуг зеленой инфраструктуры и категорий, входящих в каждую группу (табл. 4), позволил сделать некоторые выводы.

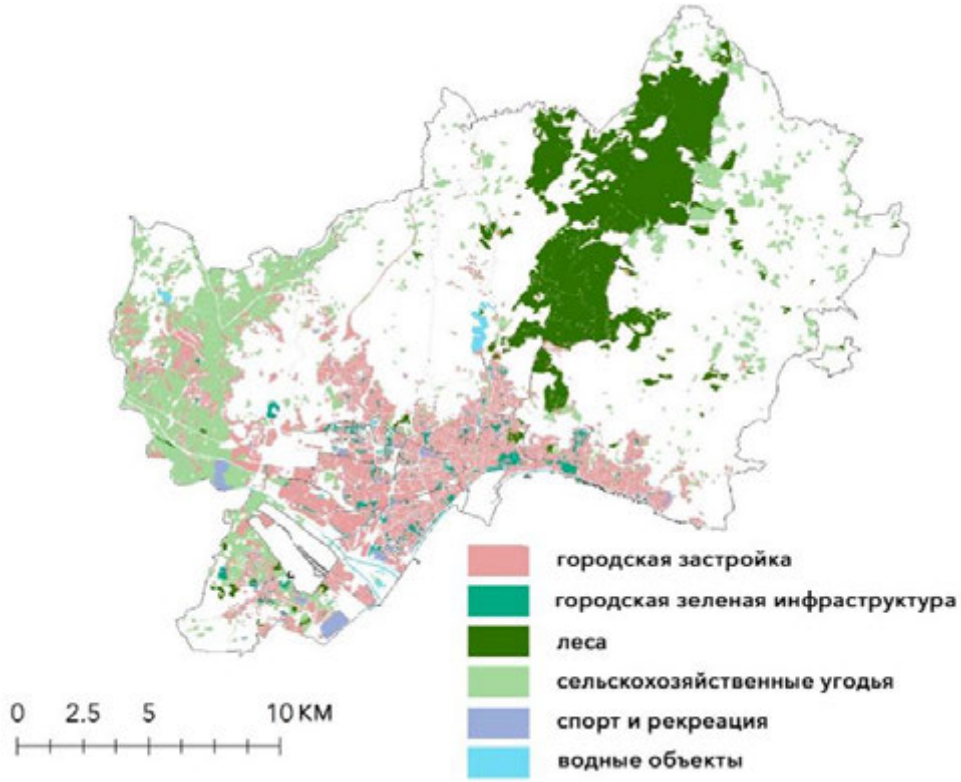


Рис. 5. Категории землепользования, играющие большое значение в становлении здоровой городской среды (по данным Urban Atlas).

Таблица 3. Категории землепользования г. Малага (по данным Urban Atlas).

Код UA	Категория	Площадь, км^2	Процент
11100	Сплошная жилая застройка (плотность >80%)	12.31	3.14
11210	Прерывистая плотная жилая застройка (плотность 50-80%)	5.17	1.32
11220	Прерывистая жилая застройка средней и низкой плотности (плотность 10-50%)	8.05	2.05
11240	Жилая застройка крайне низкой плотности (плотность <10%) и одиночные строения	4.55	1.16
12100	Промышленные, коммерческие, государственные, военные и частные подразделения	20.12	5.13
12220	Дороги (магистральные, транзитные и прочие)	17.78	4.54
12300	Морские порты	0.48	0.12
12400	Аэропорты	5.55	1.42
13300	Строящиеся здания	1.36	0.35
13400	Неиспользуемые земли	2.65	0.68
14100	Городская зеленая инфраструктура	3.33	0.85
14200	Спорт и рекреация	3.17	0.81
21000	Пахотные земли	30.60	7.81
22000	Виноградники, фруктовые и оливковые плантации	9.64	2.46
23000	Пастбища	5.81	1.48
31000	Леса	46.03	11.74
32000	Кустарниковая и травянистая растительность	211.44	53.95
33000	Открытые пространства	2.03	0.52
50000	Водные объекты	1.86	0.48
	Всего	391.94	

Городская зеленая инфраструктура, отвечающая за сохранение биоразнообразия и защиту видов, составляет около 67% территории городской зоны Малаги. Это очень высокий показатель озеленённости города. Однако, фрагментация ареалов позволяет предположить, что на самом деле, эта цифра может в действительности не вполне адекватно иллюстрировать реальную ситуацию, так как она не учитывает недостаточное выполнение некоторых экосистемных функций в связи с фрагментированностью насаждений.

Около 80% территории города занимает зеленая инфраструктура, способствующая предотвращению изменения климата, а около 78% − зоны, благоприятствующие адаптации к изменениям климата.

Производство сельхозпродукции, в свою очередь, весьма ограничено – чуть менее 12%. На территории городской зоны располагается мало сельскохозяйственных зон, так как, по большей части, производство сельскохозяйственной продукции вынесено в пригороды.

Результаты оценки стоимости земли указывают на то, что в Малаге большая часть земель является сравнительно дешевым ресурсом; наибольшей ценностью обладают земли по берегам крупных водотоков города (реки Гуадальмедина и Гуадальорсе), а также на побережье Средиземного моря.

Таблица 4. Потенциал обобщенных групп услуг зеленой инфраструктуры и соотношение с категориями Urban Atlas, отвечающими за услуги в г. Малага.

Группа услуг	Категории UA	Площадь, км^2	Процент
Сохранение биоразнообразия	Леса; кустарниковая и травяная растительность; открытые пространства; водные объекты	261.37	66.69
Адаптация к изменениям климата	Пахотные земли; виноградники, фруктовые и оливковые плантации; пастбища; леса; кустарниковая и травяная растительность; открытые пространства	305.56	77.96
Предотвращение изменений климата	Городская зеленая инфраструктура; спорт и рекреация; пахотные земли; виноградники, фруктовые и оливковые плантации; пастбища; леса; кустарниковая и травяная растительность; открытые пространства	312.06	79.62
Управление стоком	Пахотные земли; виноградники, фруктовые и оливковые плантации; пастбища; леса; кустарниковая и травяная растительность; открытые пространства; водные объекты	305.56	77.96
Обеспечение продовольственной безопасности	Пахотные земли; виноградники, фруктовые и оливковые плантации; пастбища	46.05	11.75
Рекреация, благополучие и здоровье	Городская зеленая инфраструктура; спорт и рекреация; леса; кустарниковая и травяная растительность; открытые пространства; водные объекты	267.87	68.34
Капитализация земли	Городская зеленая инфраструктура; спорт и рекреация; леса; водные объекты	54.40	13.88
Обеспечение культурной идентичности	Городская зеленая инфраструктура; спорт и рекреация	6.50	1.66

Оценка связности и фрагментированности зеленой инфраструктуры по результатам MSPA-анализа

Результатом морфологического пространственного анализа стало деление города на ареалы, относящиеся к каждому из 10 пространственных классов (рис. 6). В контексте связности зеленой инфраструктуры наибольший интерес представляют ядра, острова и коридоры. Остальные элементы по большей части не способствуют увеличению или уменьшению структурной связности системы.

Ядра соответствуют крупным базовым резерватам, которые наиболее связаны между собой. В Малаге такими ядрами в первую очередь являются Природный парк Монтес-де-Малага, занимающий большую часть северо-восточного района Сьюдад-Хардин, парк Лома-

дель-Пино («Сосновый холм») на юго-западе района Чурриана, парк «Монте-де-Сан-Антон» в районе Эсте, лесной парк «Монте-Виктория» в центре города (рис. 7). В общей сложности ядра зеленой инфраструктуры занимают около 9% территории города, составляя 34.1 км^2 (рис. 8).

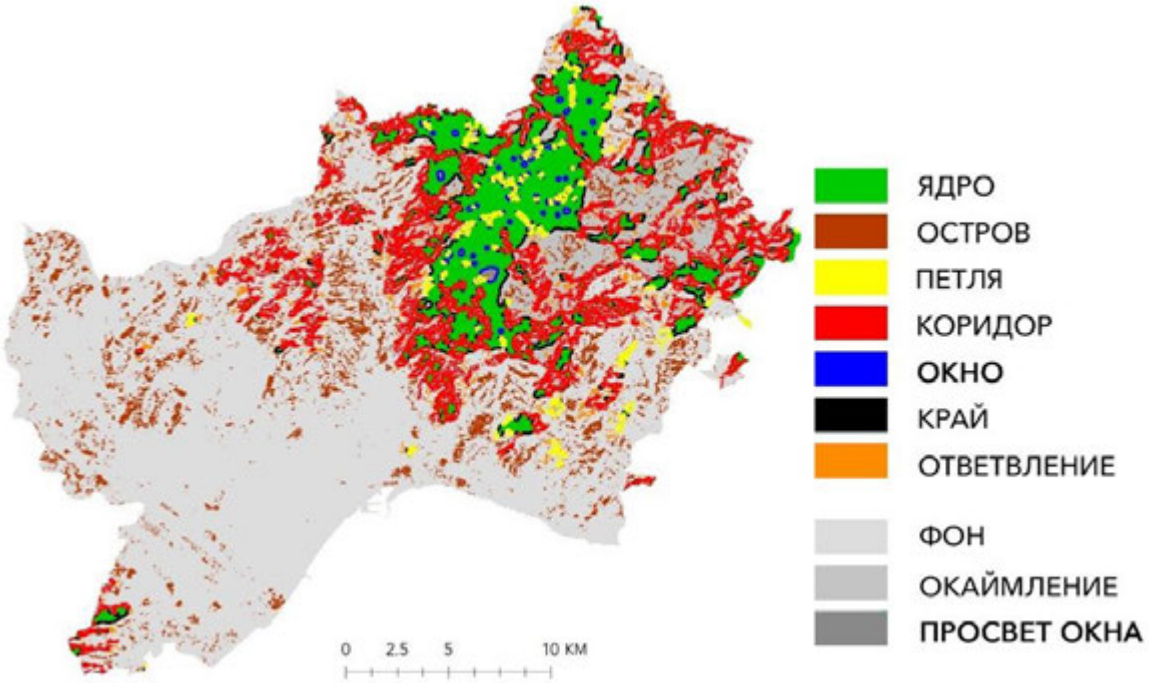


Рис. 6. Результаты MSPA-анализа для территории города Малага.

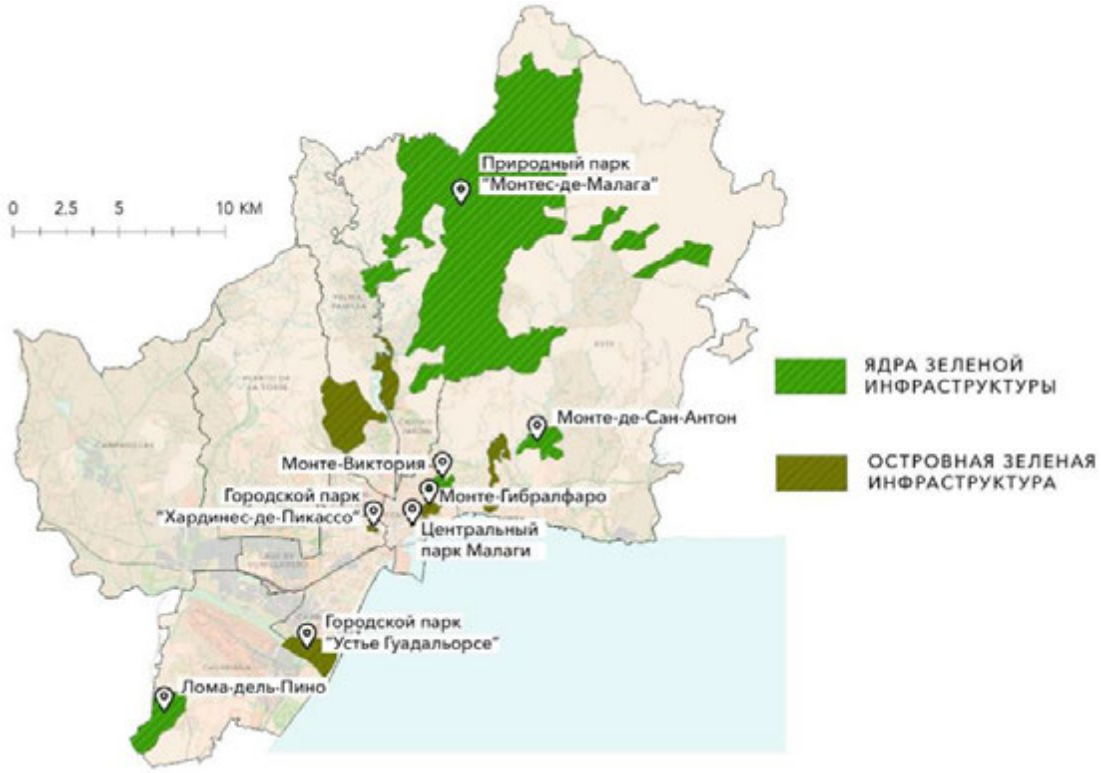


Рис. 7. Крупнейшие элементы зеленой инфраструктуры г. Малага (ядра и острова).

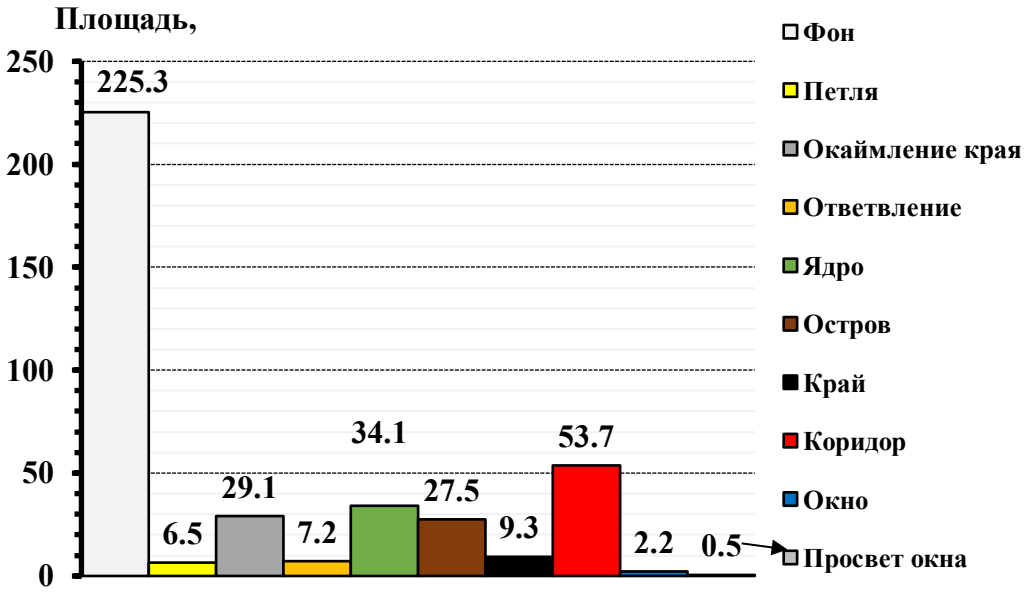


Рис. 8. Общая площадь каждого класса по результатам MSPA-анализа.

Островная зеленая инфраструктура характеризуется большей степенью пространственной фрагментации и занимает 27.5 км^2. К крупным островам зеленой инфраструктуры относятся парк устья Гуадальорсе, естественная растительность вдоль течения р. Кампанийяс, парк «Монте-де-Гибралфаро», а также значительная часть районов Пуэрто-де-ла-Торре, Эсте и Кампанийяс. В центре города островная зеленая инфраструктура включает в себя уличный парк Хардинес-де-Пикассо («Сады Пикассо») и Центральный парк Малаги, являющийся одной из главных достопримечательностей города (рис. 7). Однако, несмотря на близкое расположение этих зеленых насаждений друг к другу, сильная фрагментация зеленой инфраструктуры в центральной части города не позволяет говорить о связности.

Коридоры представляют собой участки зеленых насаждений, которые соединяют непересекающиеся ядра между собой, и в общей сложности площадь таких коридоров составляет почти 53.7 км^2, что превышает площадь самих ядер. В районе Эсте коридоры покрывают самую большую территорию; следом идут районы Пальма-Памийя и Пуэрто-де-ла-Торре.

Общая площадь ответвлений зеленой инфраструктуры, которые могут трактоваться как фрагментированные зеленые коридоры, составляет 7.2 км^2. На территории в 6.5 км^2 располагаются зоны так называемых петель – участков зелёной инфраструктуры, обеспечивающих возможность миграции для видов в пределах одного ядра системы.

Для городского ядра застройки Малаги («сити») целесообразно проведение анализа на более детальном уровне, за который отвечает ранее упоминавшийся параметр Edge Width. При значении параметра, равном 1 пикселю, удается выделить локальные классы на другом уровне городской системы (рис. 9).

В пределах зоны основной городской застройки было выделено несколько явных ядер зеленой инфраструктуры. В первую очередь, это парки Монте-Гибралфаро и Монте-Виктория, являющиеся также массивными ядрами на уровне всего города. Также присутствуют менее крупные ядра – лесной парк Эль-Морлако, парк «Сады наследия Богоматери Скорбящей» (El Jardín de la Heredad de Nuestra Señora de los Dolores) и сосновый парк Сан-Антон. Только эти парки имеют четкую структуру, состоящую из коридоров и ответвлений.

Почти все крупные элементы зеленой инфраструктуры в пределах городского ядра являются островными – это городские парки и скверы, сады и площадки для отдыха и рекреации. Несмотря на большую детальность, главные достопримечательности города – Хардинес-де-Пикассо и Центральный парк Малаги – также являются островными, не имеют коридоров и обладают небольшой территорией влияния.

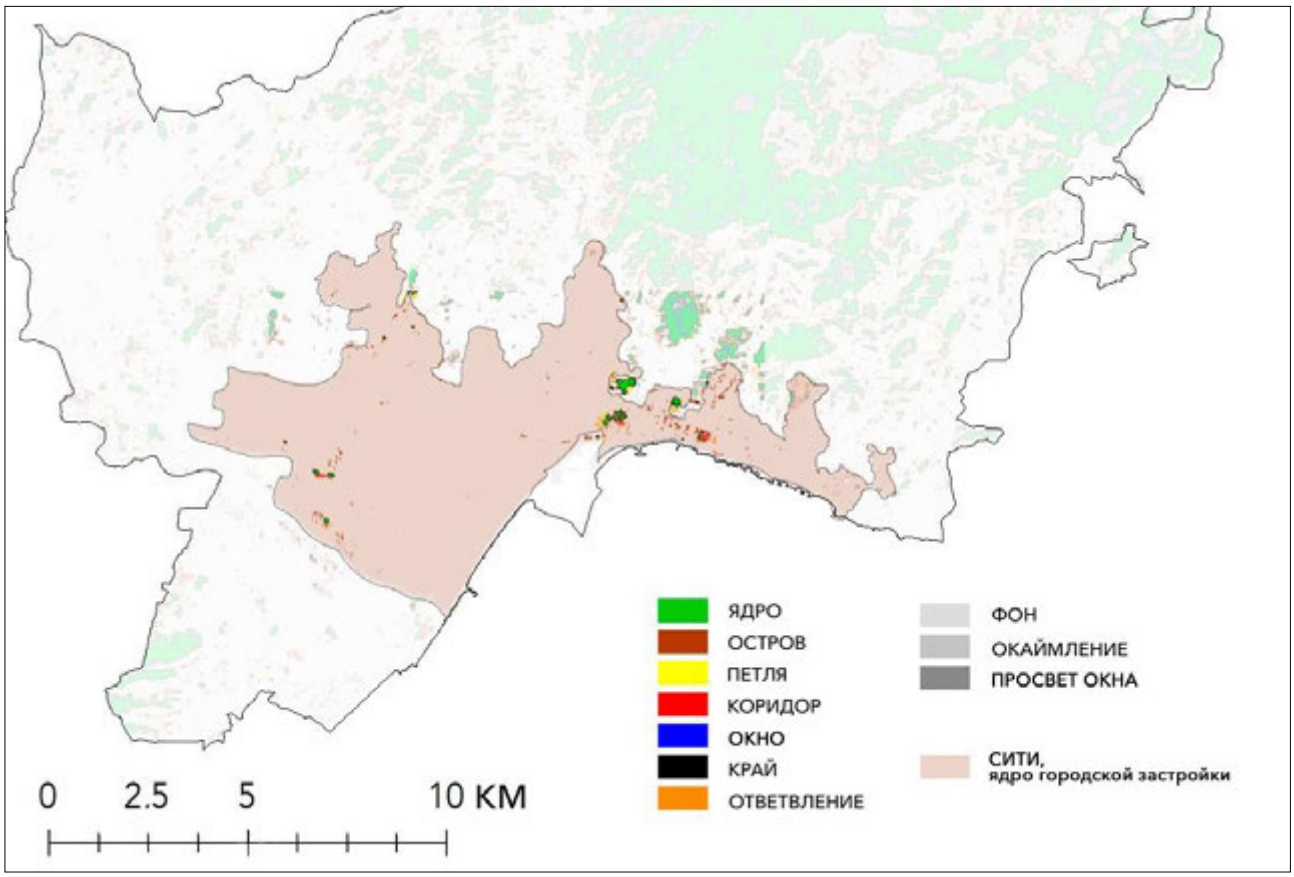


Рис. 9. Результаты MSPA-анализа на уровне ядра городской застройки Малаги.

Программное обеспечение GuidosToolBox располагает спектром инструментов (помимо группы MSPA), при помощи которых представляется возможным установить некоторые количественные показатели пространственной конфигурации зеленой инфраструктуры города. Инструменты Contagion и Entropy (группа инструментов Fragmentation) помогают определить степень фрагментации ареалов зеленых насаждений. Инструменты имеют важное различие: в то время как оценка фрагментации на основе энтропии (Entropy) основана на одновременной оценке переднего плана и фона (как единого целого), параметр сцепленности (Contagion) основан на рассмотрении только объектов переднего плана (Vogt, 2015).

Например, изображение с преобладающим фоновым покрытием и несколькими изолированными объектами переднего плана по параметру сцепленности даст высокие значения фрагментации. Для энтропии это изображение будет, наоборот, иметь низкие значения фрагментации, потому что доминирующее покрытие области (фон) только слегка фрагментировано передним планом (например, островами леса на фоне сельскохозяйственных угодий). Соответственно, для анализа зеленой инфраструктуры, проводимого отдельно от анализа всей городской системы, больше подходит инструмент Contagion, сосредотачивающийся исключительно на объектах переднего плана.

Фрагментация выражается в виде процентной шкалы, где показатели, стремящиеся к 0%, указывают на минимальную степень фрагментации ареала, тогда как стремящиеся к 100% характерны для ареалов с максимальной фрагментацией. В случае Малаги минимальной фрагментацией характеризуются, в первую очередь, ядра (Монтес-де-Малага, а также значительная часть района Эсте). Степень фрагментации здесь не превышает 15% (рис. 10). Также значительной целостностью обладает ядро на юго-западе города – парк Лома-дель-Пино. Существенная часть ареалов характеризуется средней степенью фрагментации – в пределах 30-60%; это зеленая инфраструктура районов Пуэрто-де-ла-Торре, Кампанийяс и Палма-Памийя. Зеленая инфраструктура центрального района Малаги также характеризуется средней степенью фрагментации (менее 50%). Наиболее «разорвана» зеленая инфраструктура в районе Чурриана, где большая часть зеленых насаждений является островной, и, следовательно, фрагментированной с показателем в 80% и более.

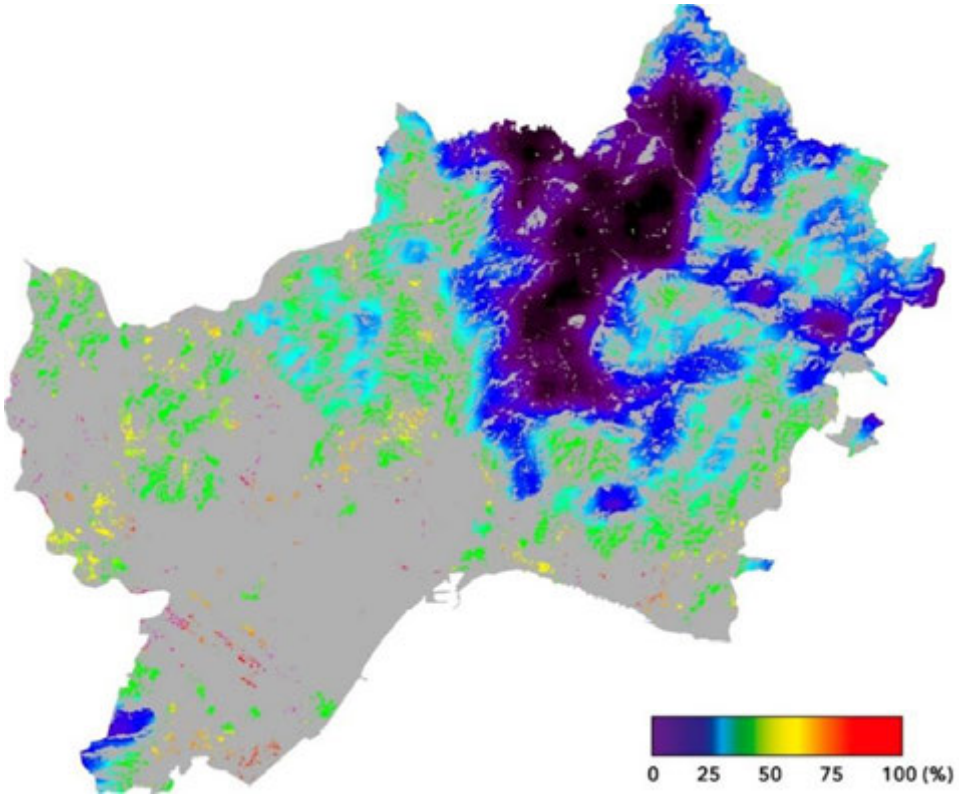


Рис. 10. Фрагментация зеленой инфраструктуры Малаги (инструмент Contagion).

Основной причиной высокой степени фрагментации зеленой инфраструктуры города стало сравнительно недавнее (происходившее на протяжении последних двух десятилетий) активное расширение жилой застройки по северо-западному лучу. Сопровождающее застройку уменьшение связи между становящимися все более и более изолированными участками зеленой инфраструктуры стало одним из основных триггеров увеличения давления на биоразнообразие региона.

Не менее интересным подходом к изучению фрагментации зеленой инфраструктуры является инструмент FAD (Foreground Area Density). FAD-анализ проводится путем измерения показателя плотности пикселей переднего плана по пяти шкалам наблюдения (с использованием метода «moving window analysis») с квадратными соседними участками длиной в 7, 13, 27, 81, 243 пикселя (Riitters et al., 2012). Результатом проведенного анализа

служит набор карт с разными результатами для каждого выбранного масштаба наблюдения (рис. 11). Значения FAD отображаются цветовым кодированием по следующим классам единства инфраструктуры: редкий (Rare), прерывистый (Patchy), переходный (Transitional), господствующий (Dominant), существенный (Interior), цельный (Intact).

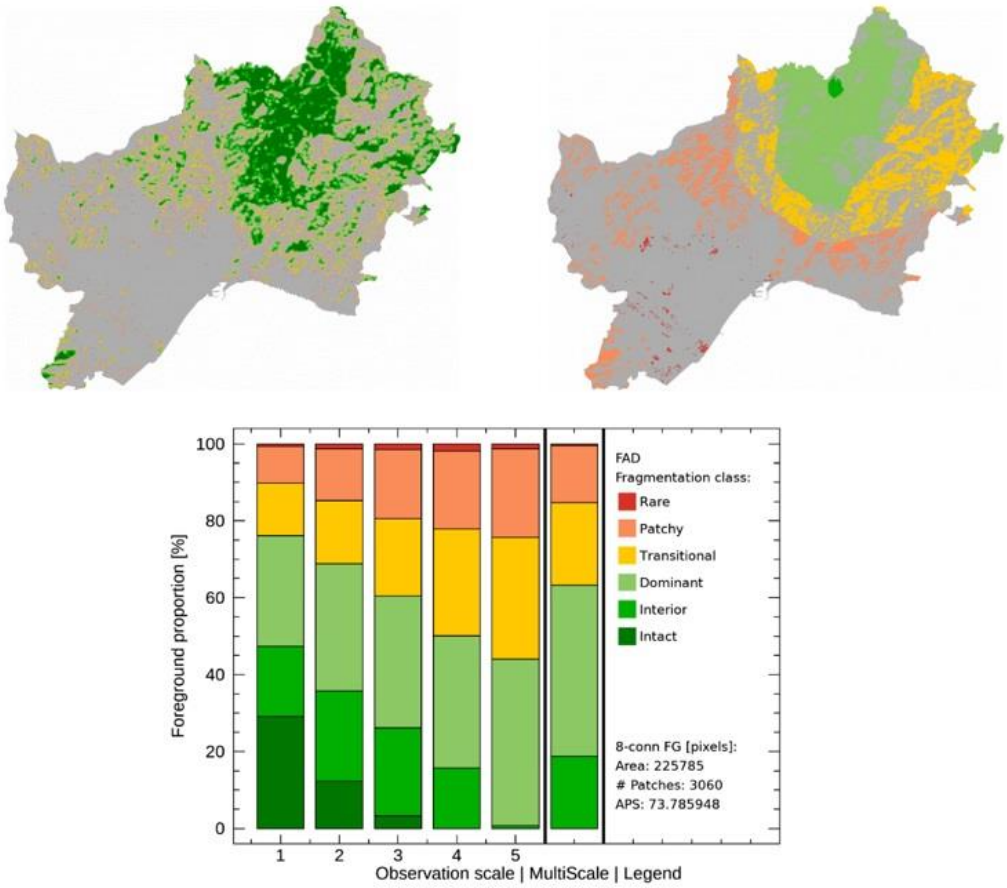


Рис. 11. Результаты FAD-анализа зеленой инфраструктуры Малаги по наименее (1, слева) и наиболее (5, справа) детальным шкалам наблюдения (инструмент Foreground Area Density).

FAD-анализ на разных шкалах наблюдения представляет интерес, т.к. зачастую могут быть получены если не диаметрально противоположные, то сильно различающиеся результаты. Анализ территории Малаги на минимально детальной шкале (7 пикселей) наблюдения показал, что 29% зеленой инфраструктуры являются целостными и нетронутыми, а 18.2% и 28.8% относятся к классам существенного и господствующего единства инфраструктуры. Фрагментированная растительность составляет около 23.8% территорий переднего плана (где переходный класс занимает 13.7%, прерывистый – 9.4%, а редкий – 0.7%).

При изучении территории Малаги в рамках наиболее детальной шкалы наблюдения (243 пикселя) наблюдается полное отсутствие класса цельной растительности. Более того, класс существенной целостности занимает менее 1% территории, а наименее фрагментированные участки (Монтес-де-Малага и местность рядом с небольшим поселением Эспартерос на восточной окраине города) принадлежат к классу господствующей целостности и занимают 43.2% переднего плана. Вторым по площади покрытия стал класс прерывистой целостности («прерывистый»), к которому относится

31.7% переднего плана. Стоит отметить, что из крупных, туристически привлекательных островков зеленой инфраструктуры к этому классу относятся парки Монте-Виктория, Монте-де-Гибралфаро и Монте-де-Сан-Антон. Наиболее фрагментированные участки наблюдаются на территории районов Сентро, Пуэрто-де-ла-Торре и Чурриана (1.3%); оставшиеся 23% переднего плана относятся к переходному классу.

Таким образом, согласно результатам FAD-анализа изучаемого региона, в районах с наибольшей плотностью населения и наибольшей активностью зеленая инфраструктура наиболее фрагментирована и хаотична; наименьшей степенью фрагментации характеризуется ядро природного парка «Монтес-де-Малага».

Зоны влияния зеленой инфраструктуры можно рассчитать при помощи инструмента Influence Zones группы инструментов Distance (рис. 12). Зоны влияния представляют собой внешние области, разделяющие объекты переднего плана (в данном случае, элементы зеленой инфраструктуры). Граница зоны влияния определяется путем применения морфологического оператора определения водоразделов к карте евклидовых расстояний фонового изображения (Soille, Vogt, 2008).

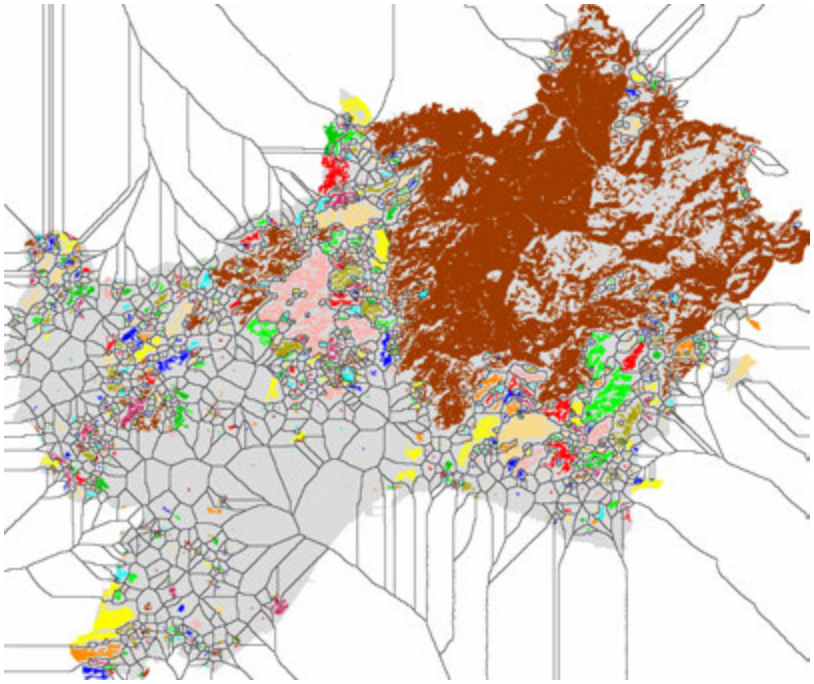


Рис. 12. Зоны влияния зеленой инфраструктуры Малаги (инструмент Influence Zones).

Понимание рисунка зон влияния помогает выявить ареалы, на которые распространяется доступ к потенциально предоставленным рекреационным, оздоровительным и эстетическим услугам. Например, жители этих зон располагают более высокой доступностью экосистемных услуг, предоставляемых парками и скверами в городской черте. Эти услуги включают чистый воздух, эстетическую ценность, наличие мест для отдыха и рекреации, а также поддерживающие и регулирующие функции зеленого каркаса.

Самой большой зоной влияния в 151.2 км^2 ожидаемо обладает природный парк Монтес-де-Малага – основной источник экосистемных услуг в районах Эсте и Сьюдад-Хардин (рис. 13). Прочие основные элементы зеленой инфраструктуры Малаги имеют на пару порядков меньшие зоны влияния. Среди основных ядер зеленой инфраструктуры помимо Монтес-де-Малага лидирует парк Монте-де-Сан-Антон, зона влияния которого превышает

2.4 км^2; также большой зоной влияния располагает парк Лома-дель-Пино – 2.1 км^2.

Среди островных центров зеленой инфраструктуры наибольшими зонами влияния обладают парки Монте-Виктория и Монте-Гибралфаро (0.27 км^2), а также парк в устье р. Гуадальорсе (0.25 км^2). Главные достопримечательности центра города – парк «Хардинес-де-Пикассо» и Центральный парк Малаги имеют зоны влияния в 0.01 и 0.05 км^2 соответственно. Эти островные центры отвечают основной цели озеленения как способа оздоровления городской среды Малаги.

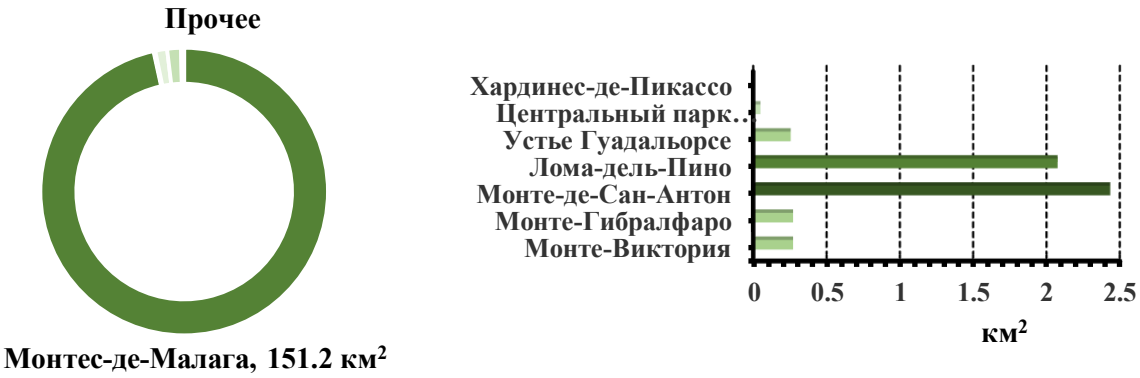


Рис. 13. Площадь зон влияния основных ядер и островов зеленой инфраструктуры Малаги.

Таким образом, метод морфологического пространственного анализа позволяет выявить важнейшие индикаторы качества городской среды, а возможности применения этого метода весьма широки. MSPA-анализ способен решать целый спектр проблем, касающихся управления городских систем и оптимизации городской среды. Он также дает возможность получать более четкое представление о существующих экологических проблемах и путях их решения.

Как и любой другой метод, MSPA имеет определенные ограничения, в первую очередь касающиеся определения масштаба входных данных и невозможности дифференциации зеленой инфраструктуры по морфометрическим показателям. С учетом трёхмерности реального пространства, неосуществимость сопоставления паттерна зеленых насаждений и сетки элементарных водосборов, параметров высоты и уклона местности и прочих пространственных характеристик указывает на необходимость проведения дальнейших исследований на локальном уровне. Результаты оценки пространственно-зависимых параметров сцепленности и фрагментации могут также зависеть не только от уровня, на котором проводится анализ, но и от экологических процессов, анализируемых в рамках ландшафтной матрицы.

Выводы

Зеленая инфраструктура имеет множество функций, в том числе важную роль играют её эстетические свойства. Однако, будучи экологическим компенсатором, зеленые насаждения в первую очередь отвечают за комфортность городской среды. Параметрические исследования зеленой инфраструктуры позволяют установить уровень ее развития, а также оптимальность конфигурации и состава формируемого экологического каркаса с выраженными средостабилизирующими функциями. На рассмотренном примере было установлено, что, несмотря на то, что Малага является одним из ведущих европейских

«зеленых» городов, он может оказаться недостаточно развитым за счет отсутствия связности экологического каркаса.

В случае Малаги основным катализатором урбанизации стало увеличение туристических потоков в 1960-х годах, в свою очередь обоснованное благоприятными физико-географическими условиями региона Коста-дель-Соль. К сожалению, Малага до сих пор борется с последствиями эпохи нерационального администрирования, приведшими к опустению и маргинализации исторического центра в конце XX века и к его излишней коммерциализации в XXI веке, на новом этапе его функционирования в обновленном виде.

Для корректной комплексной оценки городской среды необходимо применение целого ряда различных параметров. Проект «Agenda Urbana Málaga», в нормативно-методических документах которого освещается концепция развития зеленой инфраструктуры на период с 2020 по 2050 год, учитывает такие показатели, как площадь зеленых насаждений на душу населения, количество зеленых насаждений на душу населения и доступность зеленой инфраструктуры для населения. Несмотря на то что все эти показатели высоки и близки к оптимальному в среднем по городу, более детальный анализ на уровне дистриктов и районов указывает на множество пробелов в экологическом каркасе. Зачастую из-за определенных историко-типологических характеристик районов города в некоторых кварталах и секторах наблюдается недостаточное для обеспечения максимальной комфортности городской среды количество зеленых зон. Также проект, разработки которого во многом основаны на документации Генеральных планов Малаги (Plan General …, 2011), не берет в расчет важность функционального единства сети зеленой инфраструктуры. Необходимо не только наличие центров (ядер) зеленой инфраструктуры, но и соединяющих элементов каркаса, которые обеспечивали бы непрерывность природного пространства и выполняли транзитные функции.

Новаторский для отечественных экологических исследований метод пространственного морфологического анализа, примененный относительно территории всего города и территории городского ядра в отдельности, дал однозначные результаты. Было выделено около 5-6 крупных ядер зеленой инфраструктуры внутри сети особо охраняемых природных территорий Малаги. Лишь эти немногочисленные ядра соединены между собой коридорами и имеют петли, благоприятствующие миграциям видов. Несмотря на относительно высокие коэффициенты обеспеченности населения зеленой инфраструктурой и обширные площади насаждений, большая часть зеленых насаждений имеет островной (фрагментарный) характер и низкий параметр связности элементов зеленой инфраструктуры, что не способствует созданию единой сети и экологического каркаса как такового.

Эта работа является примером исследования, предлагающего новые методы для определения приоритетных участков сети зеленой инфраструктуры, одновременно важных как для сохранения биоразнообразия, так и для развития рекреационно-эстетических качеств зеленых насаждений. Применение метода MSPA-анализа может быть полезно в случае необходимости более эффективного использования имеющихся данных для принятия взвешенных решений, касающихся траекторий устойчивого развития.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность д.г.н. Е.Ю Колбовскому за помощь на всех этапах этого исследования, а также к.г.н. О.А. Климановой за ценные критические замечания и советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голубчиков С.Н., Минин А.А., Гутников В.А. 2001. Пути оптимизации городской среды // Экология крупного города (на примере Москвы). Учебное пособие. М.: Пасьва. 192 с.

Поршакова А.Н. 2016. Благоустройство и озеленение населенных пунктов: учебное пособие /

Ред. А.Н. Поршакова, М.С. Акимова. Пенза: ПГУАС. 156 с.
Agenda Urbana Málaga. Indicadores de Sostenibilidad 2016. Gestión de los Recursos Naturales [Электронный ресурс http://static.omau-malaga.com/omau/subidas/archivos/1/3/arc_7731_v2.pdf (дата обращения: 16.04.2020)].
Agenda Urbana Málaga. Indicadores de Sostenibilidad 2016. Territorio y configuración de la ciudad. [Электронный ресурс http://static.omau-malaga.com/omau/subidas/archivos/6/2/arc_7726_v2.pdf (дата обращения: 14.04.2020)].
Barrera-Fernández D., Bujalance S., Scalici M. 2019. Touristification in historic cities: Reflections on Malaga. Revista de Turismo Contemporâneo. No. 7. P. 93-115.
Batty M., Rana S. 2002. Reformulating Space Syntax: The Automatic Definition and Generation of Axial Lines and Axial Maps. Centre for Advanced Spatial Analysis Working Paper 58; Centre for Advanced Spatial Analysis University College London: London, UK. 42 p.
Breuste J., Artmann M., Li J., Xie M. 2015. Special issue on green infrastructure for urban sustainability // Journal of Urban Planning and Development. No. 141. P. A2015001 (1-5).
Copernicus Land Monitoring Service. Urban Atlas. 2020 [Электронный ресурс https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas (дата обращения: 24.04.2020)].
Del Carmen Díaz Roldán M. 1996. Isla de Arriarán: revista cultural y científica // El barrio obrero América: la vivienda social a comienzos de siglo. No. 7. P. 39-52.
Dige G., Eales R., Baker J., Sheate W., Zamparutti T., Ferner B., Banko G., Eckerberg K. 2011. Green infrastructure and territorial cohesion. The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems. 138 p.
European Commission Smart Tourism Capitals. Málaga. 2020 [Электронный ресурс https://smarttourismcapital.eu/cities-2020-winners/ (дата обращения: 17.04.2020)].
Flynn K.M., Traver R.G. 2013. Green infrastructure life cycle assessment: A bio-infiltration case study // Ecological Engineering. No. 55. P. 9-22.
Green Infrastructure (GI) − Enhancing Europe's Natural Capital. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. 2013 [Электронный ресурс https://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:d41348f2-01d5-4abe-b817-4c73e6f1b2df.0014.03/DOC_1&format=PDF (дата обращения: 22.04.2020)].
Hansen R., Pauleit S. 2014. From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas // Ambio. No. 43. P. 516-529.
Liquete C., Kleeschulte S., Dige G., Maes J., Grizzetti B., Olah B., Zulian G. 2015. Mapping green infrastructure based on ecosystem services and ecological networks: A Pan-European case study // Environmental Science & Policy. No. 54. P. 268-280.
Málaga, ¿hacia una ciudad sostenible? La Opinión de Málaga. 2017 [Электронный ресурс https://www.laopiniondemalaga.es/opinion/2017/01/11/malaga-ciudadsostenible/901944.html (дата обращения: 22.04.2020)].
McNicoll G. 2005. United Nations. Department of Economic and Social Affairs: World Economic and Social Survey 2004: International Migration // Population and Development Review. No. 31. P. 183-185.
Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de Málaga. 2011 [Электронный ресурс http://urbanismo.malaga.eu/es/plan-general-de-ordenacion/index_old.html#.X60sYsgzZPY (дата обращения: 25.04.2020)].
Prastacos P., Chrysoulakis N., Kochilakis G. 2011. Urban Atlas, land use modelling and spatial metric techniques. 15 p.
Reinoso B.R., Rubio D.A., Dragón J.G.R. 2010. Las casas baratas de Málaga, 1911-1936, Dieciséis EditoresReal Academia de Bellas Artes de San Telmo, Málaga. 548 p.

Riitters K.H., Coulston J.W., Wickham J.D. 2012. Fragmentation of forest communities in the eastern United States // Forest Ecology and Management. No. 263. P. 85-93.

Soille P., Vogt P. 2008. Morphological segmentation of binary patterns // Pattern Recognition Letters. Vol. 30. No. 4. P. 456-459.

Trigo M.M. 2015. Zonas verdes y vegetación urbana // Agenda Urbana Málaga 2016. P. 133-137.

Updated CLC illustrated nomenclature guidelines. 2019 [Электронный ресурс https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/docs/pdf/CLC2018_Nomenclature_illustrated_guide_20190510.pdf (дата обращения: 24.04.2020)].

Urban Empathy. OMAU – Málaga. 2020 [Электронный ресурс http://www.omau-malaga.com/45/com1_md2_cd-23/urban-empathy (дата обращения: 22.04.2020)].

Vogt P., Riitters K. 2017. GuidosToolbox: universal digital image object analysis // European Journal of Remote Sensing. No. 50. P. 352-361.

Wickham J.D., Riitters K.H., Wade T.G., Vogt P. 2010. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing // Landscape and Urban Planning. No. 94. P. 186-195.

ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS, 2020, Vol. 4, No. 4, P. 37-56

METHODS OF SUSTENANCE AND RESERVATION OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS

UDC 911.375.62 (460.356)

GIS MODELING OF GREEN INFRASTRUCTURE OF MEDITERRANEAN CITIES FOR MANAGEMENT OF URBANIZED ECOSYSTEMS

© 2020. E.E. Mironova

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography
Russia, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1
E-mail: eev.mironova@yandex.ru, liza.mironova@icloud.com

Received November 20, 2020. After revision November 30, 2020. Accepted December 01, 2020.

Green infrastructure is one of the most important components of the urban environment which severely affects the quality of human life. Green spaces can be a tool for maintaining the integrity and resilience of urban ecosystems. Both continuous research of the structure and functions of urban green infrastructure and monitoring of its quality are necessary in terms of optimization of the urban environment.

Using the example of the Mediterranean city of Malaga (Spain), as one of the leading "smart" cities in Europe, three methodological approaches to assessing the spatial configuration and structure of green spaces and fragments of the natural landscape of the city are considered. Modern methods of GIS modeling are applied to assess the green infrastructure of Malaga in terms of land cover characteristics (using CORINE Land Cover), the potential quantity of ecosystem services (using Urban Atlas), and configuration, fragmentation, and spatial structure of green spaces (using GuidosToolBox). Based on the method of Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA), the main cores, islets, and bridges of green infrastructure are identified, and the connectivity and fragmentation of green spaces are assessed, them being critically important for determining the unity of the ecological framework. The quantitative characteristics of green infrastructure are given, which are potentially comparable at different levels of land cover studies. The study results are given based on a combination of several methods that allowed to analyze the territory at different levels of spatial analysis and to determine the "backbone" areas of the green infrastructure network.

Keywords: urban green infrastructure, GIS modeling, CORINE Land Cover, Urban Atlas, connectivity, fragmentation, MSPA.
DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10073

Greening is undoubtedly one of the main ecological methods of improving the urban environment (Golubchikov, 2001). Part of a comprehensive program of measures for the planning of any urban ecosystem is the introduction of an extensive and developed network of green infrastructure (Porshakova, 2016). The resilience of the cities of the future will largely depend on the extent to which humankind can maintain the quality of urban green spaces and their ecological functions (Breuste et al., 2015). The existence and development of cities within the framework of the concept of sustainable development is often limited not only by the spatial underdevelopment of the ecological framework but also by the reduced connectivity of green infrastructure and a high degree of fragmentation of green spaces (McNicoll, 2005). Therefore, an extremely important task is not only the introduction of new green spaces and their management but also the subsequent analysis of their quality.

Urban areas are complex and diverse systems, the analysis of the evolution of which often suffers from a lack of spatial data and insufficient understanding of the influence of socio-economic and physical factors on the growth of these systems. The most interesting systems are those that, on the one hand, experience strong anthropogenic pressure, but, on the other hand, retain a significant part of

the natural framework. The European Mediterranean which is constantly evolving through the active involvement of tourism resources is one of the most favorable regions for this kind of research.

This paper suggests the city of Malaga as the region for the case study, considering the number of popular tourist resorts and the rapid population growth since the 1960s that raised several questions about the effectiveness of urban planning. This research is an attempt to integrate geographic information systems used to model the growth of cities and predict the development of territories into the geoecological assessment of urbanized territories. The study is also aimed at applying the main methodological approaches to monitoring and analyzing the growth process of urbanized areas to further predict the impact of urbanization on the environment and suggest tactics for effective urban planning.

The research aims at identifying the role of green infrastructure as one of the most important geoecological elements of the urbanized areas of Malaga, as well as applying modern methods of assessing the state of green infrastructure. To achieve this it is necessary to a) identify the physical-geographical and socio-economic prerequisites for the spatial growth and development of the city; b) consider modern methodological approaches to assessing the spatial configuration and structure of green spaces and fragments of the natural landscape in the city; c) select the approach that most fully solves the tasks. The selected methods will allow solving the problem of assessing the critical parameters of connectivity and fragmentation of green spaces based on spatial morphological analysis.

Materials and Methods

The subject of the study. Green infrastructure as a term does not have a single universally accepted definition. The modern understanding of the concept of "green infrastructure" (GI) in the context of this study is most often consistent with the definition given by the European Commission in 2013 (Green Infrastructure ..., 2013): green infrastructure includes a wide range of natural and semi-natural assets strategically planned as a single network of interconnected components. The spectrum of assets that fall under the definition ranges from outdoor green spaces and small squares to large parks, cemeteries, green walls, and roofs (i.e. vertical green elements).

Urban greening is one of the most important pathways for improving urban environments. Green spaces soften the perception of hot and dry weather conditions, increase air ionization, have an anti-noise effect, protect against chemical pollution, and absorb many harmful impurities. It is believed that 1 hectare of healthy forest absorbs about 0.25 tons of carbon dioxide per day while releasing 0.2 tons of oxygen (Golubchikov et al., 2001).

In recent decades, the enormous potential of urban green infrastructure has been highlighted in addressing current urban planning challenges, especially in the context of sustainable development. Developing green infrastructure does not mean creating a completely new framework; rather, it symbolizes improving the connectivity of an already existing network of green spaces to enhance ecosystem functioning.

Region of the study. The region of study, the city of Malaga (Autonomous Community of Andalusia, Spain), is located on the Mediterranean coast at the foot of the Montes de Málaga (Malaga Mountains), which are part of the Andalusian system. The southwestern part of the region is occupied by vast alluvial plains between the rivers Guadalhorce, Campanillas, and Guadalmedina.

The Malaga region is characterized by a dry and hot Mediterranean climate, which undoubtedly affects the need to provide the city with a developed green infrastructure. Mediterranean cities with their hot and dry summers are in need of shady areas that can moderate the high temperatures, thus improving the quality of life for the citizens. The rapidly advancing green roof technology also contributes to energy savings through efficient indoor cooling.

Malaga is located in the zone of xerophytic light forests and shrubs, which have the local name of tomillar (Romanova et al., 2014). Tomillar is the result of prolonged overgrazing characterized

by sparse tree cover but extensive shrubland consisting of thyme (*Thymus* spp.), rosemary (*Rosmarinus* spp.), cistus (*Cistus salviifolius*[1], *C. albidus*), and other low-growing shrubs. Zonal Mediterranean vegetation creates quite specific conditions for the formation of a green infrastructure framework. The shrubby nature of the vegetation is poorly conducive to the formation of urban parks with a large-mass tree cover. In this regard, the overwhelming part of the green infrastructure is formed either by introduced species, such as magnolia (*Magnolia grandiflora*), tipuana (*Tipuana tipu*), jacaranda (*Jacaranda mimosaefolia*), or by hybrids and cultivars, for example, colored linden (*Tilia* × *euchlora*) and bitter orange (*Citrus* × *aurantium*; Table 1).

Table 1. The most common species in urban parks and green boulevards in Malaga (Plan General ..., 2011).

	Introduced species	**Indigenous species**
Trees	Tipuana (*Tipuana tipu*), Bottletree (*Brachychiton* sp.), Bitter orange (*Citrus* × *aurantium*), Jacaranda (*Jacaranda mimosaefolia*), Chinaberry (*Melia azedarach*), Black locust (*Robinia pseudoacacia*), Silk oak (*Grevillea robusta*), Carob (*Ceratonia silique*)	Judas tree (*Cercis siliquastrum*), Olive (*Olea europaea*), Ash (*Fraxinus excelsior*), Stone pine (*Pinus pinea*)
Shrubs	Evergreen spindle (*Euonymus japonicus*), Common lantana (*Lantana camara*), Chinese privet (*Ligustrum lucidum*)	Jasmine (*Jasminum* sp.), Oleander (*Nerium oleander*), Tamarisk (*Tamarix* sp.), Phillyrea (*Phillyrea angustifolia*), Lentisk (*Pistacia lentiscus*), Bridal broom (*Retama monosperma*), Rosemary (*Rosmarinus officinalis*), Common hawthorn (*Crataegus monogyna*)

The origin of most of the woody vegetation in the city dates back to the 1930s in the Montes de Málaga region, where at that time significant areas were set aside for green space in order to protect the city from severe flooding associated with the Guadalmedina River. Species used were stone pine (*Pinus cembra*) and Aleppo pine (*Pinus halepensis*), both being ideal for poor and highly eroded soils. On the basis of artificial plantations, over time, typical Mediterranean vegetation began to develop, consisting of holly oak (*Quercus ilex*), cork oak (*Q. suber*), carob (*Ceratonia siliqua*), common myrtle (*Myrthus communis*), ash (*Fraxinus* spp.), strawberry tree (*Arbutus unedo*), etc.

Urban planning plays an important role in understanding the configuration of a city's green infrastructure. Within the modern borders of Malaga, two large zones can be distinguished, the first being the nucleus of urbanization, the “city” itself, and the second, being the periphery, which is a large but sparsely populated area. Peripheral areas, inherently rural, were incorporated into the city borders after Malaga experienced a new kind of demographic pressure in the form of a migratory influx of villagers affected by the introduction of the grape phylloxera (*Dactylosphaera vitifoliae*) in Europe. The last decades of the 19th century and the beginning of the 20th century were marked by a deep economic depression, which was caused by the simultaneous collapse of the metallurgical

[1] Latin names are given according to “Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de Málaga” (2011).

industry and the decline of viticulture. In this context, Malaga began to promote housing policies of "cheap houses" for the new population, and new neighborhoods in Trinidad and Ciudad Jardin were designed for political purposes (Reinoso-Bellido et al., 2010). The "cheap development" project eventually attracted so many interested residents that it was no longer able to cover the demand for housing. Overcrowding in the neighborhoods of La Trinidad, Capuchinos, and many others has increased so much that it has caused spontaneous settlement nuclei on the outskirts of the city, for example, El Palo in the modern district of Este, Arroyo del Cuarto in the district of Cruz de Humilladero, Mangas Verdes in Ciudad Jardin and many others (Del Carmen Díaz Roldán, 1996).

Starting in the 1990s, the municipality government began preparing a plan to renovate the city center which was slowly losing its attractiveness. With the tourism boom of the 1960s the main activity of managing new areas in the periphery falls into the hands of private initiative. Then the city begins to grow chaotically and irrationally, without control from the administration. Gentrification, though, has allowed the city center to become a key symbolic space in the city. However, it did not help make the central area much more suitable for everyday life; now, due to overuse of tourism, places in the city such as Malagueta Beach, Plaza de la Marina, Paseo del Parque, and Alameda Principal avenue suffer from an oversupply of visitors (Barrera-Fernández at al., 2019).

The process of renovating the city and improving the comfort of the urban environment continued throughout the last decade of the 20th century. In 1997, Malaga received the 2nd European Prize, awarded by the Council of European Municipalities and Regions, for the concept of sustainable urban planning. In 1998, the city also received the Dubai Best Practice Award for Leading Sustainable Development Agenda, including Excellence in Green Infrastructure Development. In 2000, the government agency, the Observatory of the Urban Environment of Malaga (OMAU), was established.

In 2013, the Urban Empathy 2013 project was launched; a partnership of 11 Mediterranean cities under the auspices of the European Union aimed at collaborating in achieving sustainable urban development models. Besides, Agenda21 was approved in 2015, which is the Agenda Urbana Málaga for the Comprehensive Sustainability of Urban Environment 2020-2050 (Agenda Urbana Málaga, 2016). The program report contains a theoretical explanation of urban planning and the current state of the green infrastructure in Malaga.

Today, the Malaga government is trying to change the situation for the better by promoting plans to implement more greenery in the city. Many environmental projects such as Agenda Urbana Málaga, Urban Empathy, and Smart Cities receive financial support. The analysis of the evolution of green areas for the period from 2005 to 2013 showed that during the period studied, the green space per capita ratio showed a continuous upward trend, in 2008 amounting to 6.33 m^2 per inhabitant, and in 2015 already reaching the level of 7.60 m^2 per inhabitant (Fig. 1; Trigo, 2015; Agenda Urbana Málaga, 2016).

In 2020, the city became the winner among all nominees for the European Capitals of Smart Tourism prize, including for its success in organizing a healthy and comfortable urban environment to attract tourists (European Commission ..., 2020). The developing city programs have a significant drawback, since they are largely not supported by a sufficient number of geoecological studies, and the effectiveness of already existing projects has not been scientifically assessed.

It should be noted that the transformation is far from uniform throughout Malaga. Thus, in the regions of Bahía de Málaga and Guadalhorce there was a decrease in the area of green space per capita, the increase indicators being -0.42 m^2 per inhabitant and -0.09 m^2 per inhabitant, respectively (Agenda Urbana Málaga, 2016; Fig. 2).

Methods. There are three main GIS modeling methods applied in the study: a) the models used to characterize the land cover (CORINE Land Cover); b) the models used to assess green infrastructure in relation to the potential quantity of ecosystem services (Urban Atlas); and c) the models used to assess the configuration, fragmentation and spatial structure of green infrastructure

(Morphological Spatial Pattern Analysis using the GuidosToolbox software package). Each of these methods has its advantages and disadvantages, as well as the limits of application at various levels of territorial differentiation. Below is an overview of the methods used and their comparison to identify the most suitable for solving the tasks.

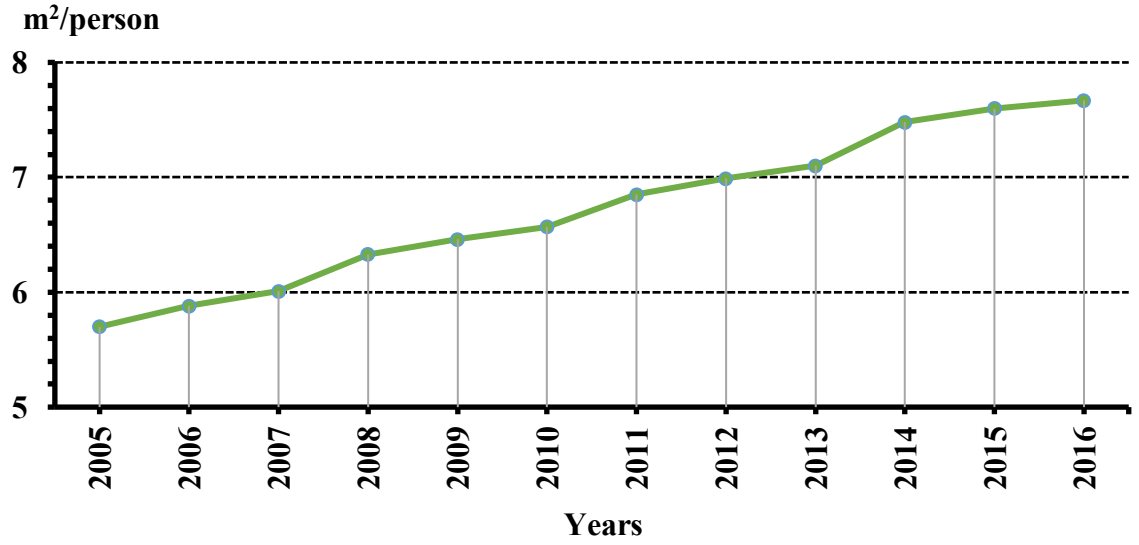


Fig. 1. Dynamics of the indicator of green area per capita (m^2/person) for the period from 2005 to 2016.

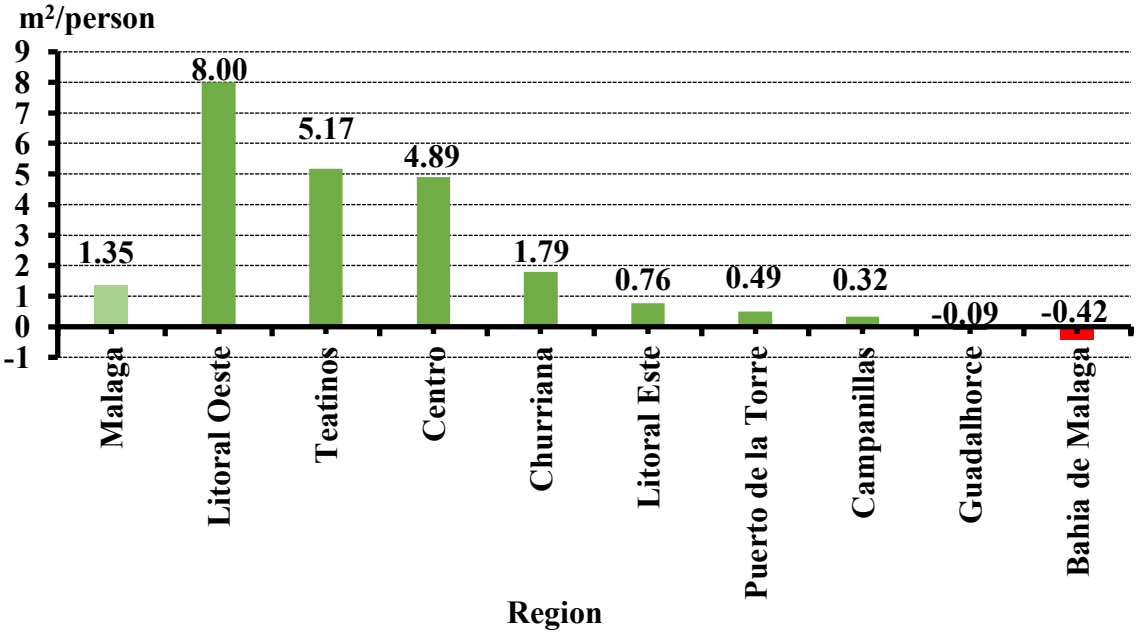


Fig. 2. Increase in the indicator of green area per capita (m^2/person) for the period from 2005 to 2012 by districts.

CORINE Land Cover. In the context of studying green infrastructure, CORINE Land Cover, a subsidiary of the Copernicus system (Copernicus Land Monitoring ..., 2020), can serve as a basic source of spatial data on land-use and land cover. The CORINE database, which includes various land-use categories with a unique three-digit code assigned to them, is updated regularly every 6-

10 years, providing publicly available data in vector and raster formats available for free use. The quality of CORINE Land Cover data can be assessed as high, and the number of misidentified land-use categories is usually small (Dige et al., 2011). However, these data are more suitable for assessing at the national level than at the regional level. CORINE rasters are not detailed enough to conduct urban green infrastructure assessments. Mixed classes with complex use patterns in the CORINE classification, such as, for example, "land principally occupied by agriculture with significant areas of natural vegetation" (class 243), "annual crops associated with permanent crops" (class 241), are fairly subjectively delineated classes. In the context of green infrastructure, integrated agricultural use classes are vital to biodiversity and therefore need to be considered as separate elements; however, identifying the structure of such integrated sites is difficult.

The same problem arises when modeling a green infrastructure framework within settlements, in an urban area. Given the lack of detail and possible erroneous classification of some objects, CORINE is not always suitable for local analysis of technogenic complexes. For example, according to the CORINE team land can be classified in class 112 ("discontinuous urban fabric"), when buildings, roads, and other artificial surfaces cover between 50% and 80% of the total area (Updated CLC ..., 2019). Thus, the level of generalization when using this method is very high, and the local green infrastructure located within the boundaries of the development zone will most likely not be taken into account. Consequently, the detailed classification of CORINE Land Cover does little to deepen the study of green infrastructure problems, and the lower spatial resolution complicates the task (Dige et al., 2011).

Urban Atlas. The European Urban Atlas, analogous to CORINE Land Cover, is part of the Copernicus Land Monitoring Service (Copernicus Land Monitoring ..., 2020). Urban Atlas has a resolution of 50 meters, which is double that of the CORINE Land Cover geodatabase. The Urban Atlas is the highest resolution urban land-use database, and its main difference from CORINE Land Cover is that CORINE contains three-tier classifications for cropland (by crop type) and forest (by vegetation type) categories, which allows for better differentiation of land cover types, whereas Urban Atlas does not use this classification. Land cover is subdivided into 20 different land-use classes, with 17 of them being different technogenic categories.

Urban Atlas is the result of thousands of images from European satellites; the classification is based on a combination of photointerpretation and object-oriented classification with a three-step validation including internal quality control of the interpretation, peer review, and technical verification by the European Topic Center Land Use and Spatial Information (Prastacos, Chrysoulakis, 2011). Therefore, Urban Atlas can be considered a more convenient and rational tool for obtaining data on green infrastructure than CORINE.

It is possible to group the Urban Atlas land cover categories according to the ecosystem services provided by each class. Categories such as forests, herbaceous vegetation, and open spaces are responsible for biodiversity conservation, climate change mitigation, water management, recreation, and human wellbeing and health. Also, agricultural land (categories of arable land, pastures) is conducive to climate change mitigation; also, they have important functions such as food security and water management. Urban green infrastructure, along with climate change mitigation and recreational opportunities, also ensures the cultural identity of the population and provides an important land capitalization service. Also, the location of water bodies and zones for sports and recreation affects land capitalization.

Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA). The method of Morphological Spatial Pattern Analysis is based on the principle of connectivity of elements of green infrastructure. Basically, in the scientific literature the analysis of the principle of connectivity is to assess the ability of green infrastructure to preserve fauna habitats and provide species with the opportunity to migrate (Liquete et al., 2015). Because of this, many of the connectivity studies are not directly related to urban systems. Rather, they focus on analyzing the green infrastructure of the suburbs of large

metropolitan areas, or rural areas. However, in the context of green infrastructure, the idea of connectivity is just as important as the principle of its multifunctionality (Hansen et al., 2014).

Landscape connectivity can be calculated using the integral connectivity index (IIC) and connectivity probability (PC), indicators that are based on graph theory (Flynn, Traver, 2013). IIC and PC not only take into account the barrier effect of the landscape matrix but also assess the bearing capacity of each of its sections. However, these indicators are not enough to extract spatial morphological information when modeling a green infrastructure network, since already existing structural nodes and corridors are ignored (Wickham et al., 2010).

As an alternative to the above indicators, the Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) can be used, which provides a more flexible approach to account for the connectivity of green infrastructure. MSPA, using a raster image of the study area as input, focuses on the geometry and connectivity of the components and can automatically determine existing corridors (Batty, Rana, 2002). The uniqueness of the method is added by the system of automatic detection of ecological corridors of different scales between the functional cores of the image, as well as further ranking of the identified paths based on the determination of the relative importance of each component in a given network (Vogt, Riitters, 2017). Because the method is applicable to any territory for which raster data on the land-use of the region are available and the process is fully automated, it is extremely convenient to use.

To analyze the elements of Malaga's green infrastructure, the non-commercial software GuidosToolBox (The Graphical User Interface for the Description of Objects and their Shapes Toolbox) (Vogt, Riitters, 2017) was used. All GuidosToolbox tools are based on geometric principles and therefore can be applied at any scale and for any kind of raster data. The program uses a binary image as input, in which the spatial position of each pixel is determined by the code “1” or “0”. At that rate, the value “1” corresponds to the foreground of the image, namely the studied elements of the landscape, in this case, the green infrastructure; the value “0” corresponds to the background, i.e. elements other than green infrastructure. Such elements can serve as urban fabric, industrial facilities, water bodies, etc.

The analysis result is highly dependent on the Edge Width parameter. Increasing the Edge Width (literally the width of the foreground edges) increases the background area at the expense of the main foreground area, and, accordingly, can change the MSPA class. In this work, the Edge Width value that builds the most visual picture is 4 pixels.

The foreground area of a binary image is divided into seven general MSPA classes: Core, Islet, Perforation, Edge, Loop, Bridge, and Branch (Table 2, Fig. 3). This segmentation results in mutually exclusive classes that, when merged into one object, exactly match the original foreground region. The background area of the image is divided into three classes: Background, Core Opening, and Border Opening.

Results and Discussion

Quantitative characteristics of land cover according to CORINE Land Cover

Land-use systems in Malaga can be divided into 3 units: urbanized areas, agricultural regions, and areas of least anthropogenic interference, where natural vegetation predominates (Fig. 4).

According to CORINE Land Cover, within the coastal urban core of Malaga, a significant part of the territory is occupied by continuous (23.7 km^2) and discontinuous (18.9 km^2) urban fabric. About 21 km^2 of the territory is occupied by industrial zones.

The main agricultural areas are located on the periphery, in the northeast and northwest of Malaga. Most of the territory is occupied by orchards (43.8 km^2), also a significant part is made up of olive plantations, occupying 28.7 km^2. Areas of complex, but mainly agricultural use make up a total of 34.2 km^2. The cultivated land occupies only 9.5 km^2, of which 2.3 $km^2$are areas of non-

irrigated agriculture and 7.2 km^{2}of irrigated agriculture. Pastures occupy 17.7 km^2.

Among the natural vegetation, shrubs predominate covering lands with a total area of 93.6 km^2. Coniferous forests occupy 45.7 km^2, broadleaf forests – 2.9 km^2 and mixed forests – 3.12 km^2. Sparse forest vegetation grows on a territory with a total area of 14.2 km^2. Natural vegetation is most preserved in the northeastern sector of the city in less populated regions.

Table 2. Foreground and background classes and their spatial significance.

Class	Spatial significance
Core	Foreground pixels surrounded by also foreground pixels, at a distance greater than the specified distance
Islet	Foreground pixels not surrounding the core. This is the only isolated class.
Perforation	Foreground pixels forming a transition zone between the foreground and the background for interior areas
Edge	Foreground pixels forming a transition zone between the foreground and the background for outer areas
Bridge	Foreground pixels connecting two or more disjoint cores
Loop	Foreground pixels connecting the core region to itself
Branch	Foreground pixels extending from the core region but not connecting to another core region
Core Opening	Background pixels forming an interior area of a perforation
Border Opening	Background pixels forming a transition zone between the edge and the background
Background	Background pixels surrounded by also background pixels, at a distance greater than the specified distance

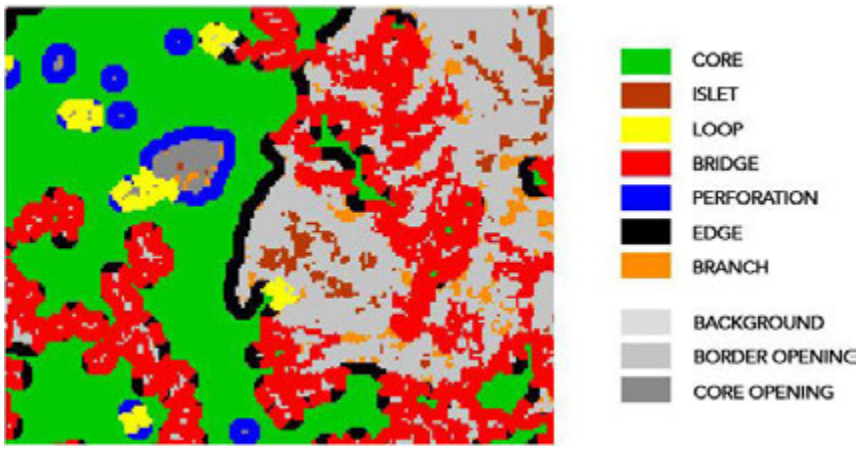


Fig. 3. Fragment of MSPA raster.

Thus, the land-use structure of Malaga is as follows: 82.8 km^2 (21%) is occupied by urbanized territories, 163.2 km^2 (41%) by natural vegetation, and 149.7 km^2 (38%) by agricultural land.

Within the urban core of Malaga, according to CORINE Land Cover, the total area covered by vegetation is only 1.45 km^2 and is confined to areas of urban green infrastructure.

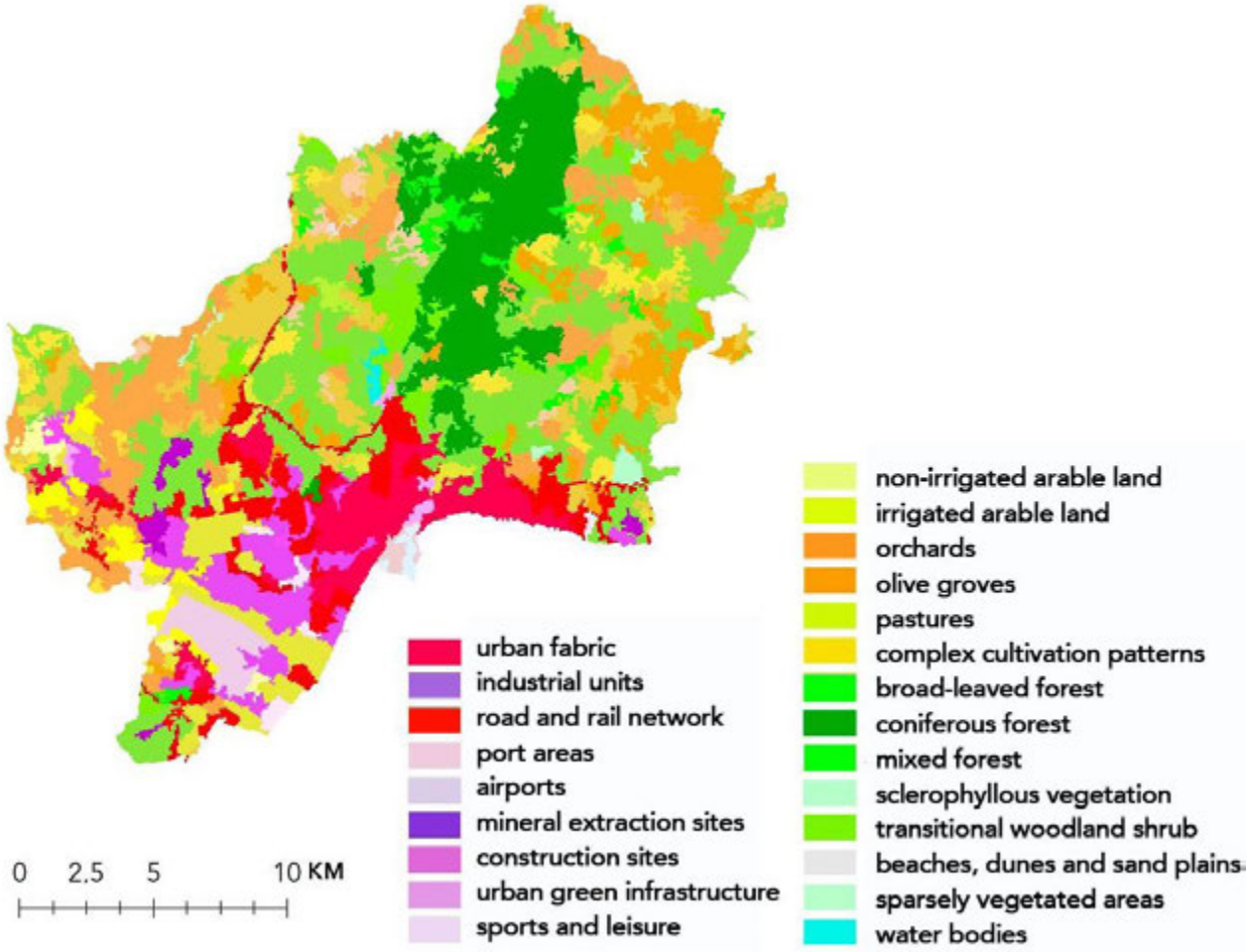


Fig. 4. Land cover of the city of Malaga (according to CORINE Land Cover 2018).

CORINE Land Cover allows you to get a general idea of the land cover of the city, however, it is not possible to study the configuration of green infrastructure in the zone of residential urban development due to the excessive degree of generalization. In this case, the Urban Atlas which is characterized by a more detailed classification of the urban fabric is a more suitable method for quantifying green infrastructure.

Assessment of the potential quantity of ecosystem services offered by GI according to Urban Atlas

In total, according to Urban Atlas, green infrastructure in its various forms in Malaga occupies about 313.9 km^2, or 80% of the territory (Fig. 5, Table 3).

Green spaces are known to actively trap and neutralize physicochemical elements and compounds potentially hazardous to health; GI also performs several important functions in the city, including environmental, sanitary and hygienic, and recreational functions (Golubchikov et al., 2001). Of course, the decorative function of green spaces is no less important. The analysis of the generalized groups of green infrastructure services and the categories included in each group (Table 4) made it possible to draw some conclusions.

Table 3. Potential of generalized green infrastructure service groups and correlation with Urban Atlas categories responsible for services in Malaga.

Service group	Urban Atlas categories	Area, km^2	Area, %
Biodiversity conservation	forests; shrubs and herbaceous vegetation; open spaces with little or no vegetation; water bodies	261.37	66.69
Adaptation to climate change	arable land; vineyards, olive groves, and orchards; pastures; forests; shrubs and herbaceous vegetation; open spaces with little or no vegetation	305.56	77.96
Climate change mitigation	green urban areas; sports and leisure; arable land; vineyards, olive groves, and orchards; pastures; forests; shrubs and herbaceous vegetation; open spaces with little or no vegetation	312.06	79.62
Water management	arable land; vineyards, olive groves, and orchards; pastures; forests; shrubs and herbaceous vegetation; open spaces with little or no vegetation; water bodies	305.56	77.96
Food security	arable land; vineyards, olive groves, and orchards; pastures	46.05	11.75
Recreation and wellbeing	green urban areas; sports and leisure; forests; shrubs and herbaceous vegetation; open spaces with little or no vegetation; water bodies	267.87	68.34
Land capitalization	green urban areas; sports and leisure; forests; water bodies	54.40	13.88
Cultural identity	green urban areas; sports and leisure	6.50	1.66

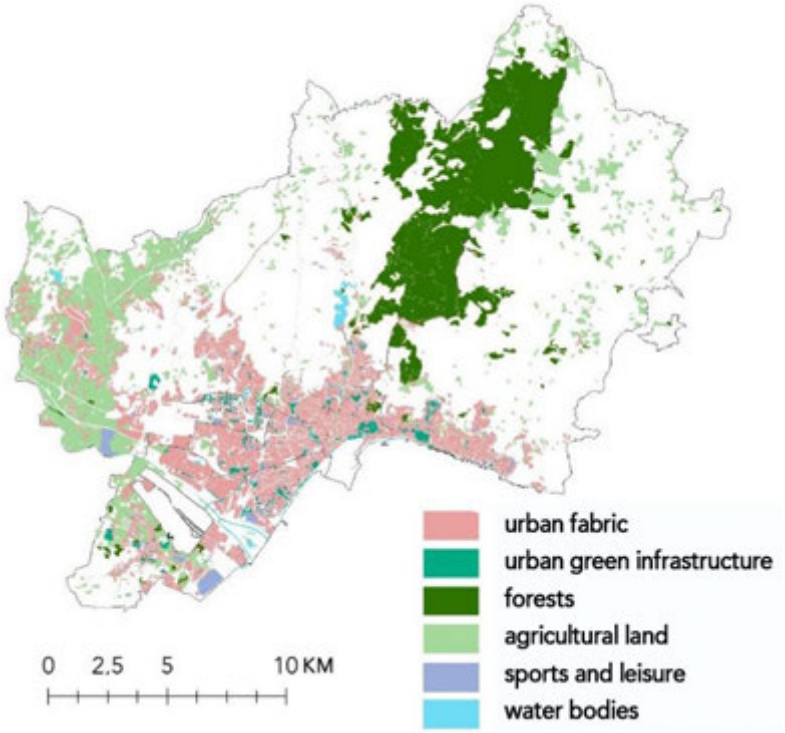


Fig. 5. Land cover categories that are crucial for the development of a healthy urban environment (according to Urban Atlas).

Urban green infrastructure, responsible for the conservation of biodiversity and protection of species, makes up about 67% of the territory of the urban area of Malaga. This is a very high indicator of the greening of the city. However, the fragmentation of ranges suggests that this figure may in fact not adequately illustrate the real situation since it does not take into account the insufficient fulfillment of some ecosystem functions due to the fragmentation of greenery.

About 80% of the city's territory is occupied by green infrastructure that contributes to the climate change mitigation, and about 78% of the territory is favorable to the adaptation to climate change.

Table 4. Land cover categories in Malaga (according to Urban Atlas).

UA code	Category	Area, km^2	Area, %
11100	Continuous urban fabric (with density >80%)	12.31	3.14
11210	Discontinuous dense urban fabric (with density 50-80%)	5.17	1.32
11220	Discontinuous medium and low density urban fabric (density 10-50%)	8.05	2.05
11240	Discontinuous very low density urban fabric (density <10%) and isolated structures	4.55	1.16
12100	Industrial, commercial, public, military, and private units	20.12	5.13
12220	Fast transit and other roads and associated land	17.78	4.54
12300	Port areas	0.48	0.12
12400	Airports	5.55	1.42
13300	Construction sites	1.36	0.35
13400	Land without current use	2.65	0.68
14100	Urban green areas	3.33	0.85
14200	Sports and leisure facilities	3.17	0.81
21000	Arable land	30.60	7.81
22000	Vineyards, orchards, and olive groves	9.64	2.46
23000	Pastures	5.81	1.48
31000	Forests	46.03	11.74
32000	Shrublands and grasslands	211.44	53.95
33000	Open spaces	2.03	0.52
50000	Water bodies	1.86	0.48
	Total	391.94	

Agricultural production, in turn, is very limited being just under 12%. There are few agricultural zones on the territory of the urban area, since, for the most part, agricultural production is moved to the suburbs.

The results of land capitalization evaluation indicate that in Malaga most land is a relatively cheap resource; the most valuable are the lands along the banks of the city's large watercourses (the Guadalmedina and Guadalhorce rivers), as well as on the Mediterranean coast.

Assessment of connectivity and fragmentation of GI based on MSPA

The result of the Morphological Spatial Pattern Analysis was the division of the city into areas belonging to each of the 10 spatial classes (Fig. 6). In the context of green infrastructure

connectivity, cores, islets, and bridges are of greatest interest. The rest of the elements for the most part do not contribute to an increase or decrease in the structural connectivity of the system. The cores correspond to large reserves, which are most interconnected. In Malaga, such cores are, first of all, the Natural Park of Montes de Málaga, which occupies most of the northeastern district of Ciudad Jardin, the Loma del Pino ("Pine Hill") park in the south-west of the Churriana district, the Monte de San Anton park in the Este district, and the forest park of Monte Victoria in the city center (Fig. 7). In total, the cores of green infrastructure occupy about 9% of the city's territory, making up 34.1 km^2 (Fig. 8).

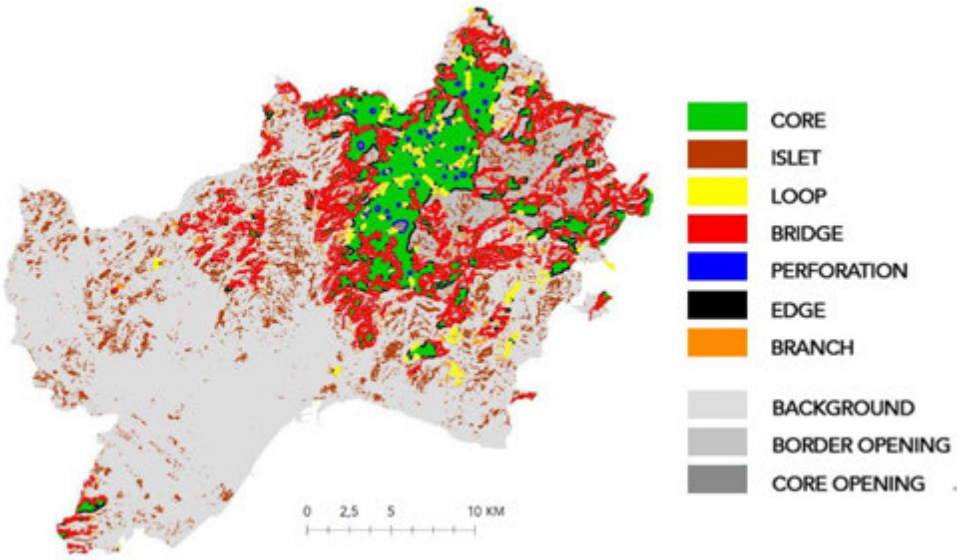


Fig. 6. Results of MSPA analysis.

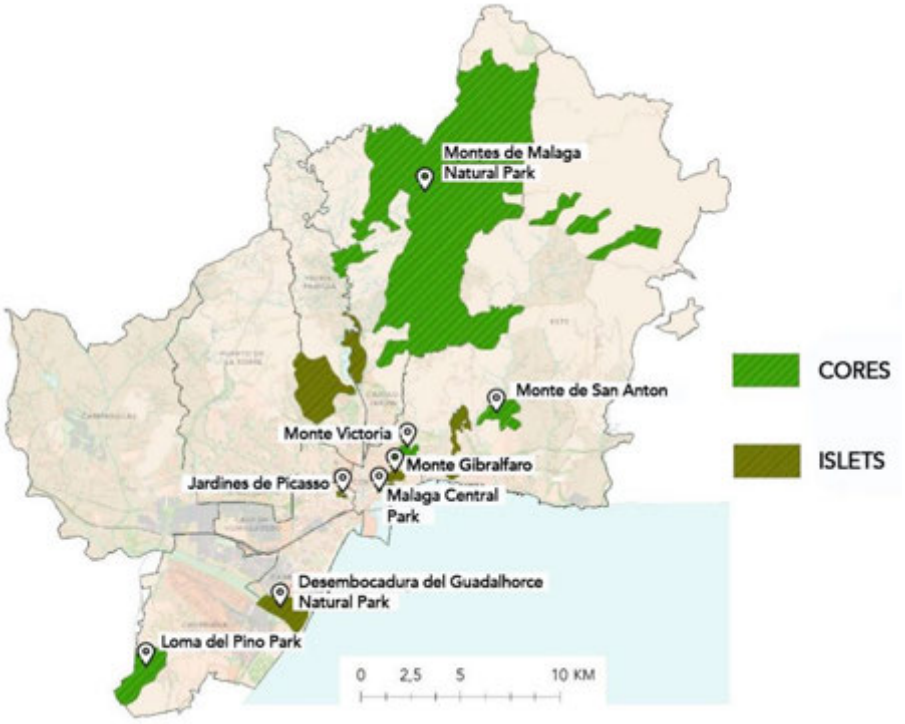


Fig. 7. The largest structural elements of the green infrastructure of Malaga (cores and islets).

Islets are characterized by a greater degree of spatial fragmentation and occupy 27.5 km^2. Large islets of green infrastructure include the Desembocadura del Guadalhorce Natural Park, natural vegetation along the Campanillas River, the park of Monte de Gibralfaro, and most of the Puerto de la Torre, Este, and Campanillas districts. In the city center, the islets include the Jardines de Picasso street park and Malaga Central Park, one of the city's main attractions (Fig. 7). However, despite the proximity of these green spaces to each other, the strong fragmentation of green infrastructure in the central part of the city does not allow us to consider these areas connected.

Bridges are patches of green space that connect non-overlapping cores, totaling nearly 53.7 km^2, which exceeds the area of the cores themselves. In the Este area, the bridges cover the largest area; followed by the districts of Palma-Palmilla and Puerto de la Torre.

The total area of green infrastructure branches that can be interpreted as fragmented green bridges is 7.2 km^2. On the territory of 6.5 km^2, there are zones of the so-called loops that are areas of green infrastructure that provide migration opportunities for species within one core of the system.

For Malaga's urban nucleus, it is advisable to analyze a more detailed level, for which the previously mentioned Edge Width parameter is responsible. When the parameter value is equal to 1 pixel, it is possible to distinguish local classes at another level of the urban system (Fig. 9).

Several distinct cores of green infrastructure have been identified within the core urban development area. First of all, these are the parks of Monte Gibralfaro and Monte Victoria, which are also massive cores at the level of the entire city. There are also smaller cores, such as El Morlaco Forest Park, El Jardín de la Heredad de Nuestra Señora de los Dolores Park, and San Anton Pine Park. Only these parks have a clear structure, consisting of bridges and branches.

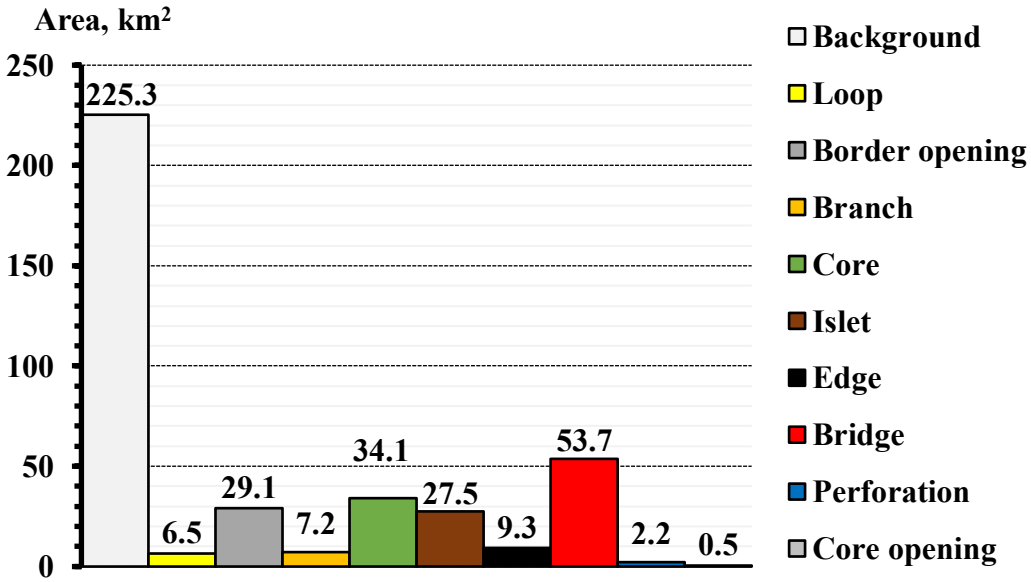


Fig. 8. The total area of each MSPA class.

Almost all major elements of green infrastructure within the urban nucleus are islets. These are city parks and squares, gardens, and recreation areas. Despite the great detail, the main sights of the city, Jardines de Picasso and Malaga Central Park, are also islets that do not have bridges, and have a rather small territory of influence.

The GuidosToolBox software has a range of tools (in addition to the MSPA group), with the help of which it is possible to establish some quantitative indicators of the spatial configuration of the green infrastructure of the city. The Contagion and Entropy tools (from the Fragmentation

toolset) help determine the degree of fragmentation in green spaces. The tools have an important difference: while the Entropy fragmentation is based on the simultaneous estimation of the foreground and background (as a whole), the Contagion parameter is based on only the foreground objects (Vogt, 2015). For example, an image with a dominant background coverage and few isolated foreground objects will give high fragmentation values in terms of Contagion. For Entropy, this image, on the contrary, will have low fragmentation values, because the dominant coverage of the area (the background) is only slightly fragmented by the foreground (for example, by islets of a forest against a background of farmland). Thus, the Contagion tool which focuses exclusively on foreground objects is more suitable for analyzing green infrastructure which is carried out separately from the analysis of the entire city system.

Fragmentation is expressed as a percentage scale, where indicators tending to 0% indicate the minimum degree of area fragmentation, while those tending to 100% are characteristic of areas with maximum fragmentation. In the case of Malaga, the cores (Montes de Málaga, as well as a large part of the Este area) are characterized by minimal fragmentation. The degree of fragmentation here does not exceed 15% (Fig. 10). Also, the core in the south-west of the city (the Loma del Pino park) has significant integrity. A remarkable part of the area is characterized by an average degree of fragmentation (within 30-60%); it is the green infrastructure of Puerto de la Torre, Campanillas, and Palma-Palmilla districts. The green infrastructure of the central region of Malaga is also characterized by a moderate degree of fragmentation (less than 50%). The most "torn apart" greenery is located in the Churriana area, where most of the green infrastructure is insular and, therefore, fragmented at 80% or more.

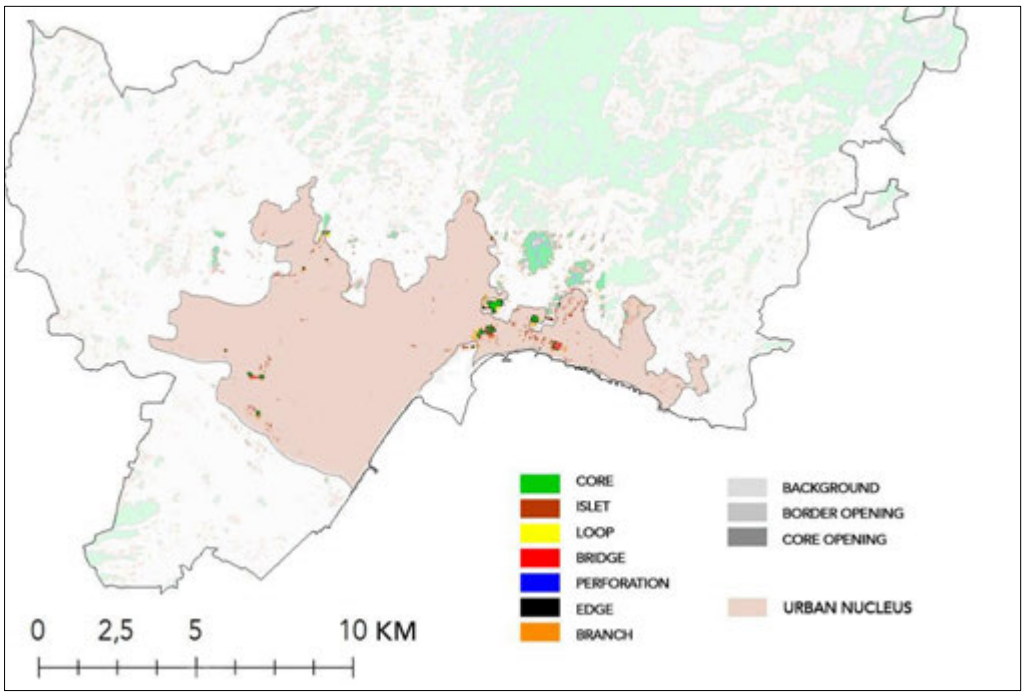


Fig. 9. Results of MSPA analysis at the level of the urban nucleus of Malaga.

The main reason for the high degree of fragmentation of the green infrastructure of the city was relatively recent (over the past two decades) active expansion of residential development along the northwest beam. The accompanying reduction in connectivity between increasingly isolated sections of green infrastructure has become one of the main triggers for growing pressure on the biodiversity of the region.

An equally interesting approach to studying the fragmentation of green infrastructure is the FAD (Foreground Area Density) analysis. FAD analysis is carried out by measuring the foreground pixel density index on five observation scales (using the moving window analysis method) with square adjacent areas of 7, 13, 27, 81, and 243 pixels (Riitters et al., 2012). The result of the analysis is a set of maps with different results for each selected observation scale (Fig. 11). FAD values are color-coded according to the following infrastructure integrity classes: Rare, Patchy, Transitional, Dominant, Interior, Intact.

FAD analysis on different scales of observation is of interest, since often, if not diametrically opposite, then very different results can be obtained. Analysis of the territory of Malaga on a scale of minimal detailing (7 pixels) showed that 29% of green infrastructure is complete and Intact, while 18.2% and 28.8% belong to the classes of Interior and Dominant infrastructure unity, respectively. Fragmented vegetation makes up about 23.8% of the foreground areas (where the Transitional class occupies 13.7%, the Patchy one − 9.4%, and the Rare one − 0.7%).

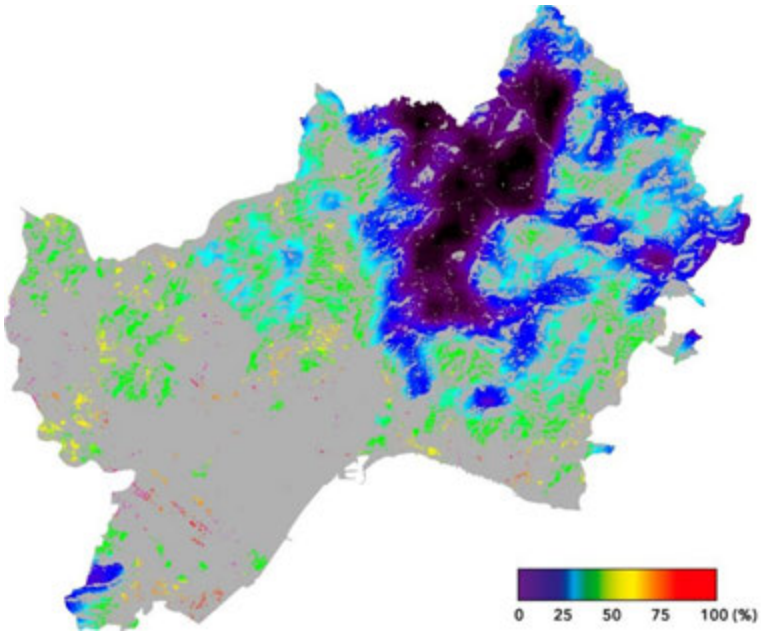


Fig. 10. Fragmentation of green infrastructure (“Contagion” tool).

When studying the territory of Malaga within the most detailed observation scale (243 pixels), there is a complete absence of the Intact class of vegetation. Moreover, the Interior class occupies less than 1% of the territory, and the least fragmented areas (Montes de Málaga and the area near the small settlement of Esparteros on the eastern outskirts of the city) correspond to the Dominant class and occupy 43.2% of the foreground. The second in terms of coverage area was the Transitional class which occupies 31.7% of the foreground. It is worth noting that among the large islets of green infrastructure, the parks of Monte Victoria, Monte de Gibraltar, and Monte de San Anton belong to this class. The most fragmented areas are found in the districts of Centro, Puerto de la Torre, and Churriana (1.3%); the remaining 23% of the foreground belongs to the transitional class.

Thus, according to the results of the FAD-analysis of the studied region, in the areas with the highest population density and the highest activity, green infrastructure is the most fragmented and chaotic; the core of the Montes de Málaga Natural Park is characterized by the least degree of fragmentation.

The Influence Zones of green infrastructure can be calculated using the eponymous tool of the Distance toolset (Fig. 12). Influence Zones are outer areas that separate foreground objects (in this

case, elements of green infrastructure). The boundary of the Influence Zone is determined by applying the morphological operator of determining watersheds to the map of Euclidean distances of the background image (Soille, Vogt, 2008).

Understanding the pattern of Influence Zones helps to identify areas with the highest or lowest degree of access to potentially provided recreational, health, and aesthetic services. For example, residents of these zones have a higher availability of ecosystem services provided by parks and squares located within the city limits. These services include clean air, aesthetic value, the availability of recreation and recreational facilities, and the supporting and regulating functions of the green frame.

As expected, the largest Influence Zone at 151.2 km^2 is possessed by the Montes de Málaga Natural Park which is the main source of ecosystem services in the Este and Ciudad Jardin districts (Fig. 13). The other main elements of Malaga's green infrastructure have much smaller zones of influence. Among the main cores of green infrastructure, in addition to Montes de Málaga, the leader is the Monte de San Anton Park with its Influence Zone exceeding 2.4 km^2; also, a large Influence Zone corresponds to the Loma del Pino park (2.1 km^2).

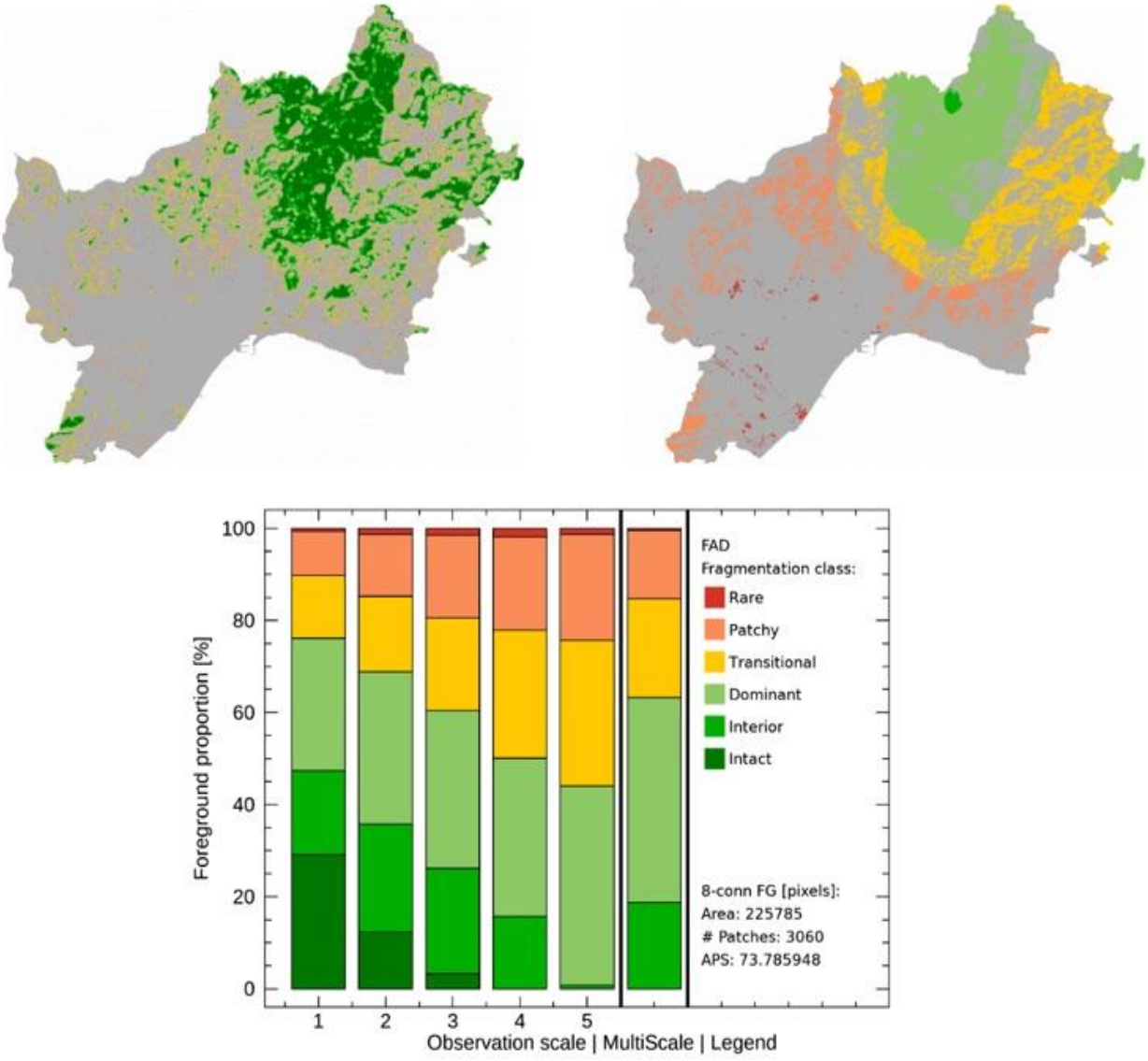


Fig. 11. Results of FAD analysis of green infrastructure using the least (1, left) and most (5, right) detailed observation scales ("Foreground Area Density" tool).

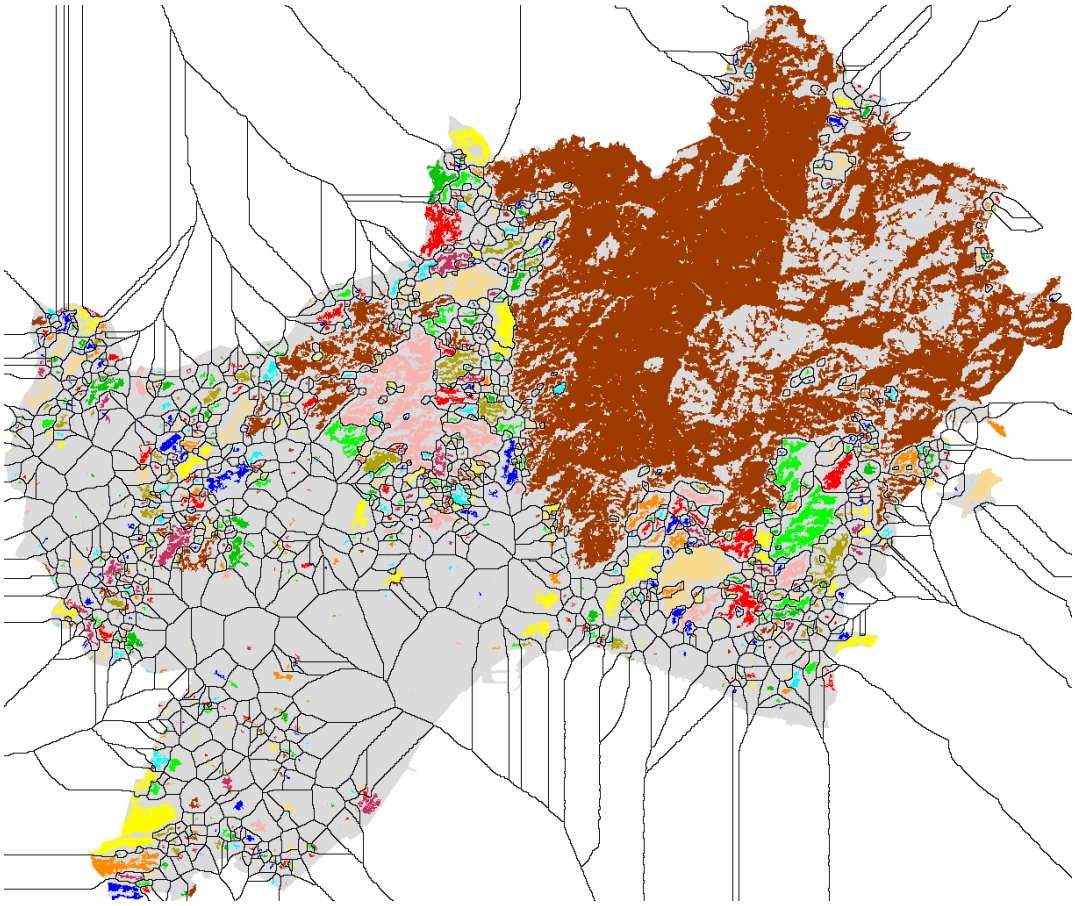


Fig. 12. Influence Zones of green infrastructure ("Influence Zones" tool).

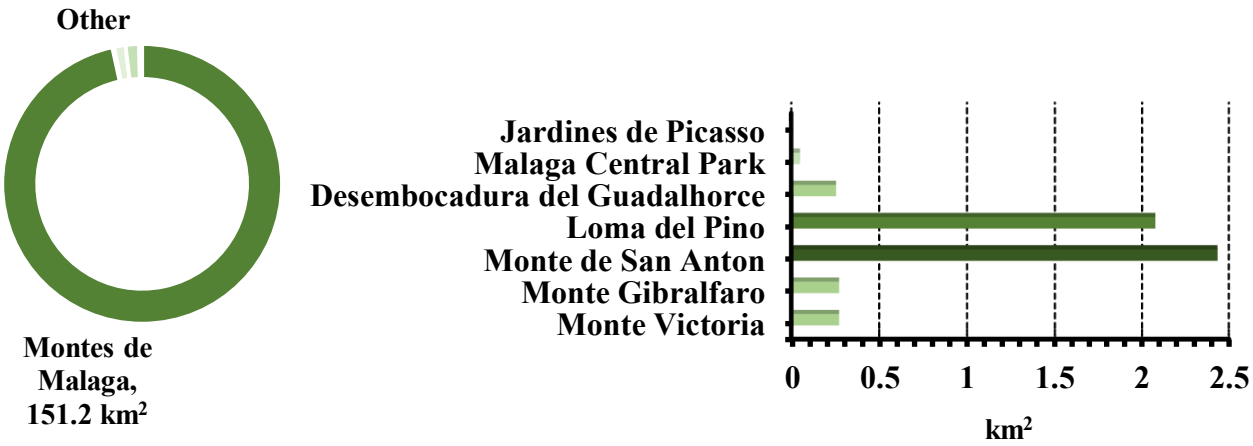


Fig. 13. The total area of the Influence Zones of the main cores and islets of the green infrastructure, km^2.

Among the islets of green infrastructure, the largest Influence Zones correspond to the parks of Monte Victoria and Monte Gibralfaro (0.27 km^2 each) and the Desembocadura del Guadalhorce Natural Park (0.25 km^2). The main attractions of the city center, the Jardines de Picasso and the Central Park of Malaga have zones of influence of 0.01 and 0.05 km^2 respectively.

Thus, the method of Morphological Spatial Pattern Analysis makes it possible to identify the most important indicators of the quality of the urban environment, and the possibilities of using this method are very wide. MSPA analysis can solve a wide range of problems related to the management of urban systems and optimization of the urban environment, as well as provides the opportunity to get a clearer idea of existing environmental problems and ways to solve them.

Like any other method, MSPA has certain limitations, primarily related to the determination of the scale of the input data and the impossibility of differentiating green infrastructure by morphometric indicators. Taking into account the three-dimensionality of real space, the impossibility of comparing the pattern of green spaces and the grid of elementary watersheds, the parameters of the height and slope of the terrain, and other spatial characteristics indicates the need for further research at the local level. The results of assessing the contagion and fragmentation parameters may also depend not only on the level at which the analysis is carried out but also on the ecological processes analyzed within the landscape matrix.

In the case of Malaga, the main catalyst for urbanization was the increase in tourist flows in the 1960s, which in turn was justified by the favorable physical and geographical conditions of the Costa del Sol region. Unfortunately, Malaga is still struggling with the consequences of the era of irrational administration which led to the desolation and marginalization of the historical center at the end of the 20th century and its excessive commercialization in the 21st century at a new stage of its functioning in a renewed form.

Conclusion

For a correct comprehensive assessment of the urban environment it is necessary to use a number of different parameters. The Agenda Urbana Málaga project, whose regulatory and methodological documents highlight the concept of green infrastructure development for the period from 2020 to 2050, takes into account such indicators as the area of green space per capita, the number of green spaces per capita, and the availability of green infrastructure for the population. Although all these indicators are high and close to optimal on the average for the city, a more detailed analysis at the regional level indicates many gaps in the ecological framework. Often, due to certain historical and typological characteristics of city districts, in some areas there is an insufficient number of green zones to ensure the maximum comfort of the urban environment. Also, the project whose development is largely based on the documentation of the General Plan of Malaga (Plan General de ..., 2011) does not take into account the importance of the functional cohesion of the green infrastructure network. It is necessary not only to have centers (cores) of green infrastructure but also connecting elements of the frame which would ensure the continuity of the natural space and would perform transit functions.

The method of Spatial Morphological Pattern Analysis, innovative for domestic environmental studies, applied to the entire city and the urban nucleus separately, gave unambiguous results. Around 5 to 6 large green infrastructure cores have been identified within the Malaga Protected Areas network. Only these few cores are interconnected by bridges and have loops that favor migrations of species. Despite the relatively high coefficients of the provision of the population with green infrastructure and vast areas of greenery, most of the green spaces have an islet (or fragmented) nature to them and a low parameter of connectivity of the elements of green infrastructure, which does not contribute to the creation of a unified network and ecological framework as such.

This work is an example of a study proposing new methods for identifying priority areas of the green infrastructure network, both important for the conservation of biodiversity and the development of recreational and aesthetic qualities of green spaces. The application of the MSPA analysis method can be helpful when it is necessary to use the available data more effectively and make informed decisions regarding the trajectories of sustainable development.

Acknowledgements. The author expresses their deep gratitude to professor E.Yu. Kolbowsky for help at all stages of this research, as well as to associate professor O.A. Klimanova for valuable critical comments and advice.

REFERENCES

Agenda Urbana Málaga. Indicadores de Sostenibilidad 2016. Gestión de los Recursos Naturales. [Available at http://static.omaumalaga.com/omau/subidas/archivos/7/3/arc_7737_v2.pdf (Date of access 04/16/2020)].

Agenda Urbana Málaga. Indicadores de Sostenibilidad 2016. Territorio y configuración de la ciudad. [Available at http://static.omau-malaga.com/omau/subidas/archivos/6/2/arc_7726_v2.pdf (Date of access 04/14/2020)].

Barrera-Fernández D., Bujalance S., Scalici M. 2019. Touristification in historic cities: Reflections on Malaga. Revista de Turismo Contemporâneo. No. 7. P. 93-115.

Batty M., Rana S. 2002. Reformulating Space Syntax: The Automatic Definition and Generation of Axial Lines and Axial Maps. Centre for Advanced Spatial Analysis Working Paper 58; Centre for Advanced Spatial Analysis University College London: London, UK. 42 p.

Breuste J., Artmann M., Li J., Xie M. 2015. Special issue on green infrastructure for urban sustainability // Journal of Urban Planning and Development. No. 141. P. A2015001 (1-5).

Copernicus Land Monitoring Service. Urban Atlas. 2020 [Available at https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas (Date of access 04/24/2020)].

Del Carmen Díaz Roldán M. 1996. Isla de Arriarán: revista cultural y científica // El barrio obrero América: la vivienda social a comienzos de siglo. No. 7. P. 39-52.

Dige G., Eales R., Baker J., Sheate W., Zamparutti T., Ferner B., Banko G., Eckerberg K. 2011. Green infrastructure and territorial cohesion. The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems. 138 p.

European Commission Smart Tourism Capitals. Málaga. 2020 [Available at https://smarttourismcapital.eu/cities-2020-winners/ (Date of access 04/17/2020)].

Flynn K.M., Traver R.G. 2013. Green infrastructure life cycle assessment: A bio-infiltration case study // Ecological Engineering. No. 55. P. 9-22.

Golubchikov S.N., Minin A.A., Gutnikov V.A. 2001. Ways to optimize the urban environment // Ecology of a large city (a case of Moscow). Textbook. Moscow: Pasva. 192 p. [in Russian; *Голубчиков С.Н., Минин А.А., Гутников В.А.* 2001. Пути оптимизации городской среды // Экология крупного города (на примере Москвы). Учебное пособие. М.: Пасьва. 192 с.]

Green Infrastructure (GI) − Enhancing Europe's Natural Capital. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. 2013 [Available at https://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:d41348f2-01d5-4abe-b817-4c73e6f1b2df.0014.03/DOC_1&format=PDF (Date of access 04/22/2020)].

Hansen R., Pauleit S. 2014. From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas // Ambio. No. 43. P. 516-529.

Liquete C., Kleeschulte S., Dige G., Maes J., Grizzetti B., Olah B., Zulian G. 2015. Mapping green infrastructure based on ecosystem services and ecological networks: A Pan-European case study // Environmental Science & Policy. No. 54. P. 268-280.

Málaga, ¿hacia una ciudad sostenible? La Opinión de Málaga. 2017 [Available at https://www.laopiniondemalaga.es/opinion/2017/01/11/malaga-ciudadsostenible/901944.html (Date of access 04/22/2020)].

McNicoll G. 2005. United Nations. Department of Economic and Social Affairs: World Economic

and Social Survey 2004: International Migration // Population and Development Review. No. 31. P. 183-185.

Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de Málaga. 2011 [Available at http://urbanismo.malaga.eu/es/plan-general-de-ordenacion/index_old.html#.X60sYsgzZPY (Date of access 04/25/2020)].

Porshakova A.N. 2016. Improvement and greening of settlements. Textbook / Eds. A.N. Porshakova, M.S. Akimova. Penza: PGUAS. 156 p. [in Russian; *Поршакова А.Н.* 2016. Благоустройство и озеленение населенных пунктов: учебное пособие / Ред. А.Н. Поршакова, М.С. Акимова. Пенза: ПГУАС. 156 с.]

Prastacos P., Chrysoulakis N., Kochilakis G. 2011. Urban Atlas, land use modelling and spatial metric techniques. 15 p.

Reinoso B.R., Rubio D.A., Dragón J.G.R. 2010. Las casas baratas de Málaga, 1911-1936, Dieciséis Editores Real Academia de Bellas Artes de San Telmo, Málaga. 548 p.

Riitters K.H., Coulston J.W., Wickham J.D. 2012. Fragmentation of forest communities in the eastern United States // Forest Ecology and Management. No. 263. P. 85-93.

Soille P., Vogt P. 2008. Morphological segmentation of binary patterns // Pattern Recognition Letters. Vol. 30. No. 4. P. 456-459.

Trigo M.M. 2015. Zonas verdes y vegetación urbana // Agenda Urbana Málaga 2016. Pp. 133-137.

Updated CLC illustrated nomenclature guidelines. 2019 [Available at https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/docs/pdf/CLC2018_Nomenclature_illustrated_guide_20190510.pdf (Date of access 04/24/2020)].

Urban Empathy. OMAU – Málaga. 2020 [Available at https://www.omau-malaga.com/45/com1_md2_cd-23/urban-empathy (Date of access 04/22/2020)].

Vogt P., Riitters K. 2017. GuidosToolbox: universal digital image object analysis // European Journal of Remote Sensing. No. 50. P. 352-361.

Wickham J.D., Riitters K.H., Wade T.G., Vogt P. 2010. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing // Landscape and Urban Planning. No. 94. P. 186-195.

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2020, том 4, № 4, с. 57-80

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 911.2

ДИНАМИКА ЛАНДШАФТОВ И КЛИМАТА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ВОСТОЧНОЙ ЕВРОПЕ В ГОЛОЦЕНЕ: ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗА ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ[1]

© 2020 г. Е.Ю. Новенко*, **

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет*
Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1. E-mail: lenanov@mail.ru
***Институт географии РАН*
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29

Поступила в редакцию 30.10.2020. После доработки 30.11.2020. Принята к публикации 01.12.2020

В статье представлен обзор современных исследований ландшафтно-климатических изменений в голоцене. Проведен анализ большого массива накопленных к настоящему времени палеоботанических данных и основанных на них палеоклиматических реконструкций для лесной зоны Центральной и Восточной Европы в полосе субширотного трансекта между 52 и 58° с.ш. в сопоставлении с опубликованными для этой территории материалами палеоэкологических и палеогеографических исследований. Рассмотрены ожидаемые климатические изменения согласно сценариям репрезентативных траекторий концентраций парниковых газов, разработанных Межправительственной группой экспертов по изменению климата. Рассмотренные данные позволили выделить три основных этапа ландшафтно-климатических изменений в голоцене. 1) Быстрое потепление ранних фаз голоцена (11.7-8.0 тысяч календарных лет назад (тыс. кал. л.н.)), осложненное серией осцилляций; в течение этого периода широколиственные леса вытеснили березовые и сосново-березовые леса, распространившиеся на месте перигляциальных формаций в начале голоцена. Экспансия широколиственных пород деревьев в Восточной Европе произошла на 2 тыс. лет позже, чем в Центральной Европе. 2) Термический максимум голоцена (8.0-5.7 тыс. кал. л.н.), для которого было характерно отсутствие короткопериодных и резких климатический изменений; в этот период в Центральной и Восточной Европе существовала единая зона широколиственных лесов. 3) Направленное похолодание второй половины голоцена (5.7 тыс. кал. л.н. – настоящее время), с наложенными на него квазигармоническими колебаниями температуры и осадков. Усиливается секторная дифференциация ландшафтного покрова. В западных районах начинается экспансия бука и граба, на востоке начинает распространяться ель. Считая климатические реконструкции для голоцена изучаемой территории разными сценариями возможных изменений климата в текущем столетии, можно ожидать, что рост температур, особенно в летний период, приведет к иссушению климата за счет изменения баланса осадков/испарения и может стать причиной возрастания частоты пожаров и погодных экстремумов, связанных с неравномерностью выпадения осадков.

Ключевые слова: голоцен, палеоклиматические реконструкции, динамика экосистем, палеоэкологические данные, палеогеография, Центральная Европа, Европейская территория России.

DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10074

Оценка реакции ландшафтных компонентов на глобальные изменения климата долгое

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-15-50126 – экспансия.

время остается одной из актуальнейших фундаментальных научных проблем, требующих всестороннего изучения. Учитывая современные тенденции изменений климата, проявляющиеся прежде всего в стремительном росте глобальной температуры воздуха (IPCC, 2013), ретроспективный анализ ландшафтно-климатических условий Центральной и Восточной Европы в голоцене может быть очень полезным и эффективным для адекватного понимания современных процессов трансформации природной среды в условиях глобального потепления и определения основных трендов ее эволюции (Величко, 2012; Bradley, 2008). Особый интерес представляет анализ резких и короткопериодных климатических колебаний, когда возрастала неустойчивость («колебательность») климатической системы.

Первые обобщения палинологических данных, соответствующих послеледниковому этапу развития природы, для территории Европы к северу от Альп принадлежат Ф. Фирбасу (Firbas, 1949), М.И. Нейштадту (1957) и В.П. Гричуку (1969, 1982). Большой вклад в изучение флоры и растительности позднеледниковья и голоцена внесли исследования Н.А. Хотинского (1977). Обобщающие работы, посвященные климатическим условиям голоцена в глобальном и макрорегиональном масштабах, принадлежат А.А. Величко с соавторами (серия атласов-монографий «Динамика ландшафтных компонентов …» (2002), «Палеоклиматы и палеоландшафты …» (2009), «Климаты и ландшафты Северной Евразии …» (2010)), О.Н. Соломиной (2010), О.К. Борисовой (2014) и ряду коллективов зарубежных исследователей (Davis et al., 2003; Mayewski et al., 2004; Wanner et al., 2008; Mann et al., 2009; Mauri et al., 2015; Christiansen, Ljungqvist, 2017; PAGES 2k Consortium, 2013, 2017). Огромное количество работ посвящено реконструкции растительности и климата в голоцене на региональном уровне, основанной на палинологических данных по разрезам аллювиальных, озерных и болотных отложений в Центральной и Восточной Европе (наиболее значимые из них будут рассмотрены ниже).

В статье представлено обобщение палеогеографических данных для голоцена Центральной и Восточной Европы для территории в полосе субширотного трансекта в пределах лесной зоны между 52° и 58° с.ш. Разнообразие физико-географических условий и провинциальные различия современной растительности вдоль рассматриваемого субширотного профиля дают возможность проанализировать географические закономерности и региональные особенности реакции растительности Восточной и Центральной Европы на климатические изменения, как в настоящее время, так и в прошлые эпохи. В основу анализа динамики ландшафтов и климата в голоцене положены, в первую очередь, накопленные к настоящему моменту палеоботанические данные и основанные на них палеоклиматические реконструкции, выполненные различными методами, в сопоставлении с опубликованными для этой территории материалов ризоподных, геоморфологических, изотопно-геохимических и других методов исследований.

Возраст нижней границы голоцена определен по изменениям изотопно-кислородного состава льдов скважины NGRIP в Гренландии как 11.7 тыс. календарных лет назад (далее − кал. л.н.; Walker et al., 2019; Head, 2019). Для изучения динамики растительности и климата голоцена в России часто используется схема периодизации Блитта-Сернандера, первоначально созданная для Северной Европы и модифицированная для Европейской части России Н.А. Хотинским (1977). За рубежом региональные модификации этой периодизации широко использовались до 1990-х годов, но сейчас практически вышли из употребления, и исследователи при реконструкции последовательности событий в голоцене в основном оперируют определениями абсолютного возраста. Согласно схеме Блитта-Сернандера голоценовая эпоха включает в себя пять климатических периодов: пребореальный (11.7-10.5 тыс. кал. л.н.), бореальный (10.5-8.8 тыс. кал. л.н.), атлантический (8.8-5.3 тыс. кал. л.н.), суббореальный (5.3-2.6 тыс. кал. л.н.) и субатлантический (2.6 тыс. кал. л.н. – настоящее

время). Международной стратиграфической комиссией принято трехчленное деление голоцена на ранний (гренландий, 11700-8236 кал. л.н.), средний (нордгриппий, 8236-4250 кал. л.н.) и поздний (мегхалий, 4250 кал. л.н. – настоящее время) на основе изучения ледовых кернов и спелеотем (Head, 2019; Walker et al., 2019). Однако границы подэпох, особенно между средним и поздним голоценом, вызвали серьезные дискуссии среди исследователей. В представленной статье для анализа последовательности событий в голоцене, автор, преимущественно, использует данные абсолютного датирования в сопоставлении с принятыми схемами периодизации, которые рассматриваются скорее, как хронологические, а не климатостратиграфические подразделения.

Временной интервал 11.7-8.0 тыс. кал. л.н. (ранний голоцен, пребореальный, бореальный и начало атлантического периода)

Ландшафтно-климатические реконструкции для пребореального периода голоцена немногочисленны. В большинстве случаев пребореал определен, как единый интервал развития березовых или сосново-березовых лесов. Несмотря на очень близкий состав пыльцевых спектров, в растительности вдоль изучаемого нами субширотного трансекта проявляется секторная дифференциация. В составе лесных сообществ в его западной части уже в начале пребореала появился вяз, и в конце фазы дуб, ольха и лещина (рис. 1; Litt et al., 2001; de Klerk, 2008). В разрезах Латвии пыльца лещины и вяза отмечена в спектрах, начиная с 11.0 тыс. кал. л.н., а пыльца ольхи и дуба становится постоянным компонентом спорово-пыльцевых спектров с 10.1 тыс. кал. л.н. (Heikkilä et al., 2009). В то же время в восточных районах в составе растительности сохранялись элементы перигляциальной флоры (Хотинский, 1977). Единичные зерна пыльцы широколиственных пород появились в спектрах из разрезов Восточно-Европейской равнины только после 9.7 тыс. кал. л.н. (рис. 2).

Гляциологические, палинологические и изотопно-геохимические исследования разрезов континентальных и морских отложений в Северной Европе, выполненные с высоким временным разрешением (Bjorck et al., 1996), а также изменения изотопно-кислородного состава ледяных кернов в Гренландии (Thomas et al., 2007), свидетельствуют о фазах похолодания внутри пребореального периода (рис. 3). Первое похолодание, получившее название «пребореальная осцилляция» реконструировано для интервала 11.3-11.15 тыс. кал. л.н. Второе похолодание, так называемое «событие 10.2 тыс. кал. л.н.», имело место на рубеже пребореального и бореального периодов голоцена. По данным изменения содержания катиона K^+ в ледяном керне GISP2 в Гренландии (Mayewski et al., 2004), являющимся индикатором интенсивности Сибирского антициклона, и катиона Na^+, отражающего глубину развития Исландского минимума, в этот период происходило ослабление западного переноса воздушных масс и усиление Сибирского антициклона (рис. 3).

Короткопериодные ландшафтно-климатические изменения в течение пребореального периода выявлены на основании детальных исследований ряда разрезов озерных отложений в Нидерландах (Bos et al., 2007) и Швейцарии (Lotter et al., 1992). На северо-западе Восточно-Европейской равнины изменения палеосреды, связанные пребореальной осцилляцией, выявлены в разрезах озер Медведевское и Пасторское в Карелии (Суббето и др., 2003). В восточном секторе наших исследований в разрезе Половецко-Купанского болота пребореал разделяется на 2 фазы – потепление в начале, получившее название «половецкое потепление», и похолодание во второй половине, так называемое «переславское похолодание» по Н.А. Хотинскому (1977).

Отложения бореального периода голоцена представлены в многочисленных разрезах, как на территории Центральной, так и Восточной Европы.

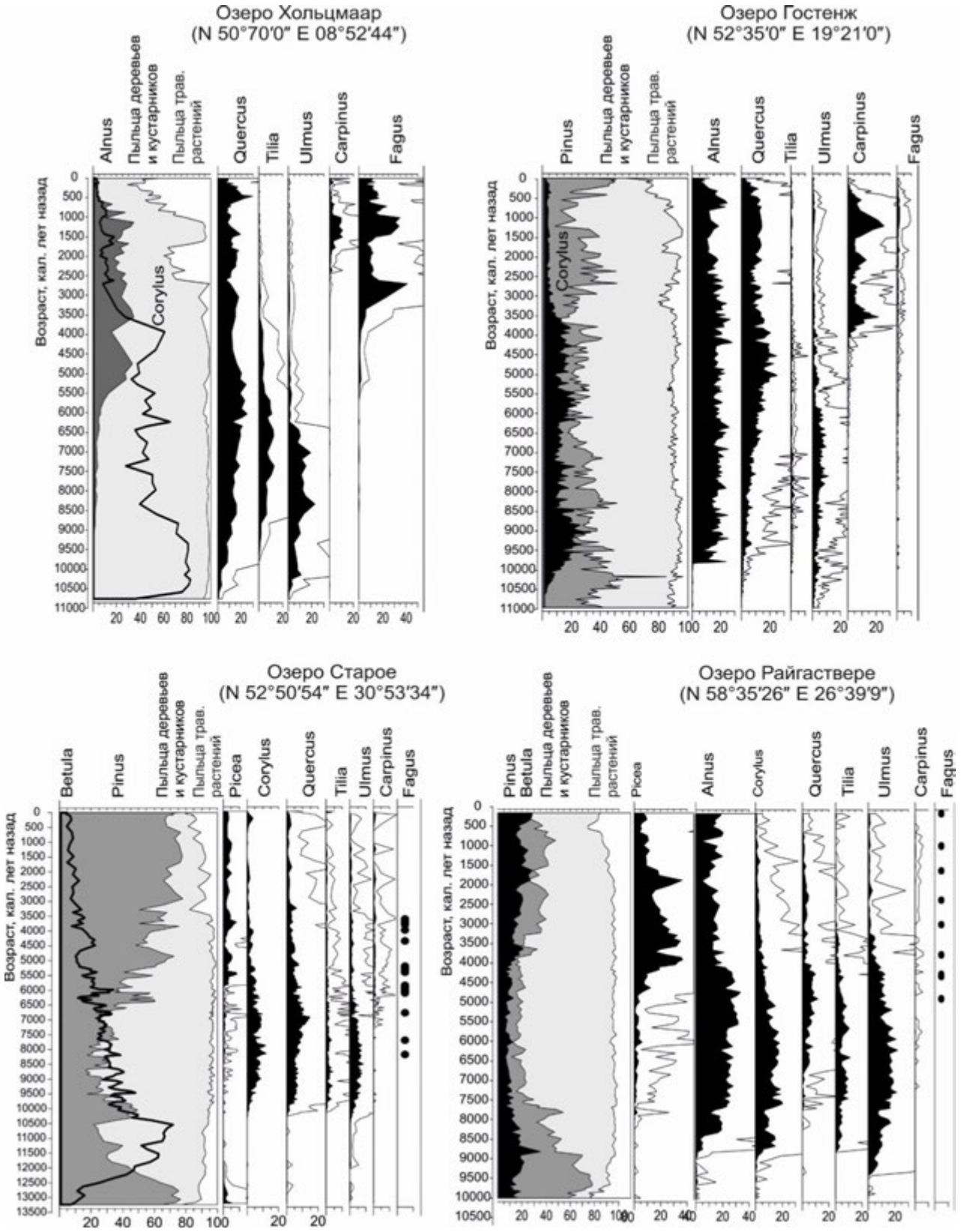


Рис. 1. Изменение содержания пыльцы основных лесообразующих пород на спорово-пыльцевых диаграммах разрезов озерных отложений Центральной и Восточной Европы. Сокращенные спорово-пыльцевые диаграммы построены по материалам Европейской палинологической базы данных (European Pollen Database, 2007).

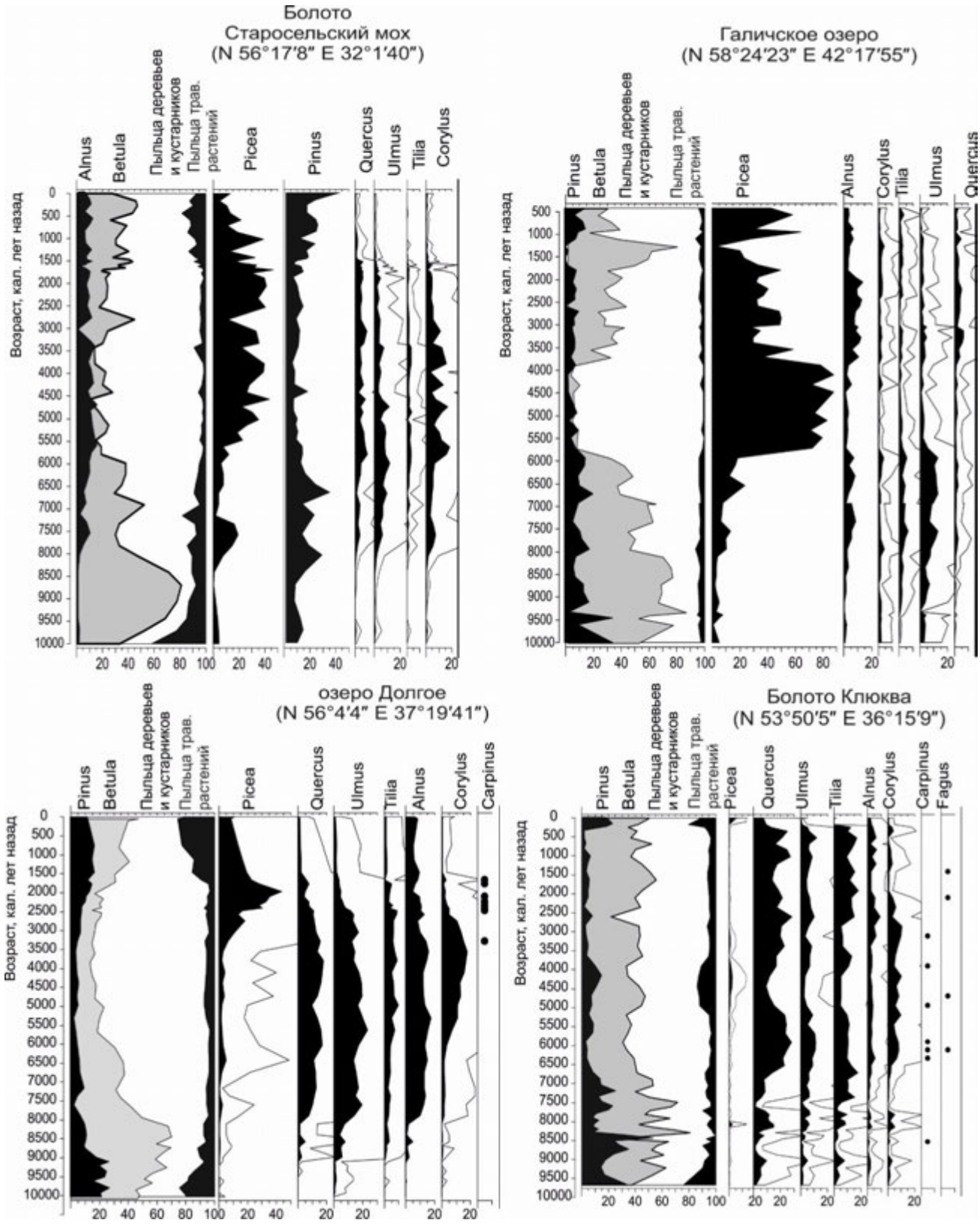


Рис. 2. Изменения содержания пыльцы основных лесообразующих пород на спорово-пыльцевых диаграммах разрезов Восточно-Европейской равнины (диаграмма разреза оз. Долгое построена по материалам О.К.Борисовой, К.В. Кременецкого и Э.М. Зеликсон, по «European Pollen Database» (2007), остальные разрезы – материалы автора).

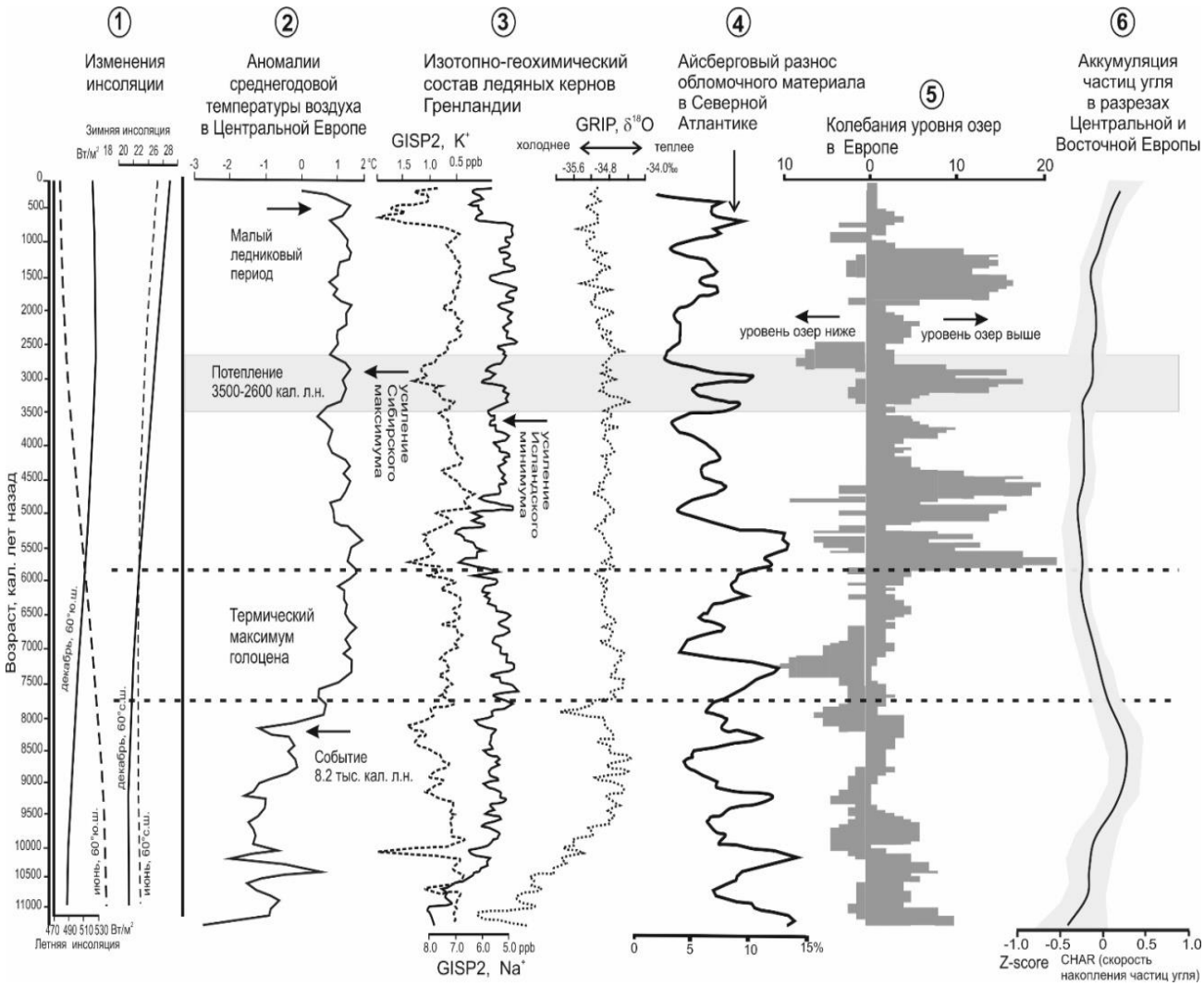


Рис. 3. Основные ландшафтно-климатические изменения на территории Европы в голоцене. *Условные обозначения:* 1 – зимняя и летняя инсоляция на 60° с.ш. и 60° ю.ш. (Berger, Loutre, 1991); 2 – реконструкции среднегодовой температуры в Европе, выраженная в отклонениях от современных значений (Davis et al., 2003); 3 – изменения изотопно-геохимического состава льда в кернах скважин GISP2 и GRIP в Гренландии: содержание катиона K^+ и катиона Na^+ скважины GISP2 (Mayewski et al., 2004), изменения $\delta^{18}O$ скважины GRIP (Johnsen et al., 1992); 4 – изменение интенсивности айсбергового разноса обломочного материала в Северной Атлантике, выраженное в процентном соотношении петрологических маркеров (Bond et al., 1993); 5 – колебания уровня озер на территории Франции и Швейцарии, количество радиоуглеродных дат с шагом 50 лет, характеризующих более высокий или низкий уровень озер по сравнению с современным (Magny, 2004); 6 – изменения скорости аккумуляции микро- и макро-частиц угля в озерных и болотных отложениях в Центральной и Восточной Европе, выраженные в Z-score (стандартизованная оценка) значений “charcoal accumulation rate” (CHAR; Feurdean et al., 2020).

Как показывают палинологические данные, в период 10.5-8.8 тыс. кал. л.н. на территории современной Германии, Польши и стран Балтии были распространены березово-сосновые и дубово-сосновые леса с участием вяза и подлеском из лещины (рис. 1; Jahns, 2000, 2007; Bos, Urz, 2003; Heikillä, Seppä, 2004; Seppä, Poska, 2004; Lamentowicz et al., 2008; Gałka et al.,

2013). Исследования Т. Гизике с соавторами (Giesecke et al., 2011), основанные на большом фактическом материале, показали, что кульминация содержания пыльцы лещины в раннем голоцене происходит почти синхронно на обширной территории Западной и Центральной Европы в период 10.5-8.0 кал. л.н. В восточном направлении можно заметить некоторое запаздывание увеличения доли пыльцы широколиственных пород. Так, например, в разрезах озер Межужол и Старое в Беларуси сумма пыльцы широколиственных пород деревьев в интервале 10.5-10.0 тыс. кал. л.н. не превышала 5%, а к 9.5 тыс. кал. л.н. возросла до 20% (Зерницкая, Новенко, 2016; Зерницкая и др., 2019)

Согласно результатам изучения ряда разрезов из центральных районов Восточно-Европейской равнины, обширные территории были покрыты сосново-березовыми редколесьями (Хотинский, 1977; Величко и др., 2001; Khotinski, Kilmanov, 1997; Krementsky et al., 2000; Wohlfarth et al., 2007). Южнее, на Среднерусской возвышенности, были распространены сосново-березовые леса с небольшим участием широколиственных пород (рис. 2; Климанов, Серебряная, 1986; Novenko et al., 2015).

Климатические реконструкции для Центральной Европы показали, что в течение бореального периода средняя температура января не превышала -2°С, а средняя температура июля не опускалась ниже 15°С (Zagwijn, 1994). Согласно реконструкциям, основанным на соотношении видов фауны жесткокрылых, летние температуры в Северной Европе были в интервале 17-19°С, а в Центральной Европе могли быть даже выше (Coope, 1998). Реконструкции по палинологическим данным разреза оз. Межужол в северной Беларуси (Зерницкая, Новенко, 2016) показали, что в интервале 10.5-9.5 тыс. кал. л.н. среднегодовые, зимние и летние температуры составляли 4, -8 и 16°С соответственно, что примерно на 2°С ниже, чем в настоящее время, а в период 9.5-8.5 тыс. кал. л.н. зимние и годовые температуры существенно возросли и составили около -6.5 и 6.0°С, а значения летних температур стали близки к современным (18°С). Быстрое потепление и относительно теплые климатические условия в бореале выявлены и для побережья Балтийского моря. Так, например, в Латвии летние температуры 10.0 тыс. кал. л.н. были около 17°С (на 1°С ниже современных значений), но уже к 9.0 тыс. кал. л.н. повысились на 1.5°С (Heikkilä, Seppä, 2010). В центральных районах Восточно-Европейской равнины все температурные показатели были ниже современных значений в период 10.1-7.9 тыс. кал. л.н. (Khotinski, Kilmanov, 1997; Novenko, Olchev, 2015).

Реконструкции палеотемператур, полученные по разным природным архивам, позволяют выделить кратковременное и резкое похолодание климата, так называемое «событие 8.2 тыс. кал. л.н» (Борзенкова и др., 2017; Alley et al., 1997; Thomas et al., 2007; Daley et al., 2011). Согласно результатам наших исследований, среднегодовая температура в бассейне Верхней Волги в период 8.1-8.5 тыс. кал. л.н. понизилась на 2-3°С (Novenko, Olchev, 2015). Реконструкции по палинологическим данным разрезов Эстонии (Seppä, Poska, 2004), Финляндии (Heikkilä, Seppä, 2003) и южной Швеции (Antonsson, Seppä, 2007), показали падение среднегодовых температур на 1.5-2.0°С в период похолодания, соответствующего «событию 8.2 тыс. кал. л.н.». Реконструкции, основанные на данных диатомового анализа, указывают на снижение летних температур на 0.75-1.0°С на севере Финляндии (Korhola et al., 2000). Обобщение большого количества пыльцевых диаграмм и климатических реконструкции позволило Б. Дэвису с соавторами (Davis et al., 2003) реконструировать снижение среднегодовой температуры в целом для Европы на 1°С около 8.2 тыс. кал. л.н. (рис. 1). Причиной этого существенного похолодания, реконструируемого в Европе в интервале 8.4-8.0 тыс. кал. л.н., возможно, как и более ранних уже рассмотренных нами похолоданий в пребореале, было ослабление термогалинной циркуляции в Северной Атлантике (Teller et al., 2002). Во время похолодания 8.2 тыс. кал. л.н. эти изменения могли быть вызваны выбросом в океан больших масс пресной воды из крупного приледникового

озера Агассис в Северной Америки (Борзенкова и др., 2017; Keigwin, Boyle, 2000).

Реконструкции годовой суммы осадков и количественных характеристик влажности климата до настоящего времени остается довольно сложной задачей, и результаты подобных исследований для раннего голоцена на территории Европы представлены лишь в небольшом числе работ (Barber et al., 2004; Harrison et al., 1996; Allen et al., 2007). Еще со времен работ А. Блитта в конце 19-го века установилось мнение, что климат бореального периода голоцена был сухим, что впоследствии было отмечено во многих исследованиях и закрепилось в климатостратиграфических схемах голоцена (Хотинский, 1977).

Данные о влажности климата, полученные для Восточно-Европейской равнины, свидетельствуют о сложной временной и пространственной динамике количества осадков. Согласно нашим данным, в период до 9.5 тыс. кал. л.н. среднегодовое количество осадков было меньше современных значений в бассейне Верхней Волги и на Валдае, но превышало их на северо-западе Среднерусской возвышенности (рис. 4). Почти синхронное увеличение количества осадков на всей территории центральных районов Европейской части России реконструировано для периода 9.1-8.5 тыс. кал. л.н., когда осадков выпадало в год на 100-200 мм больше, чем в настоящее время (Novenko, Olchev, 2015).

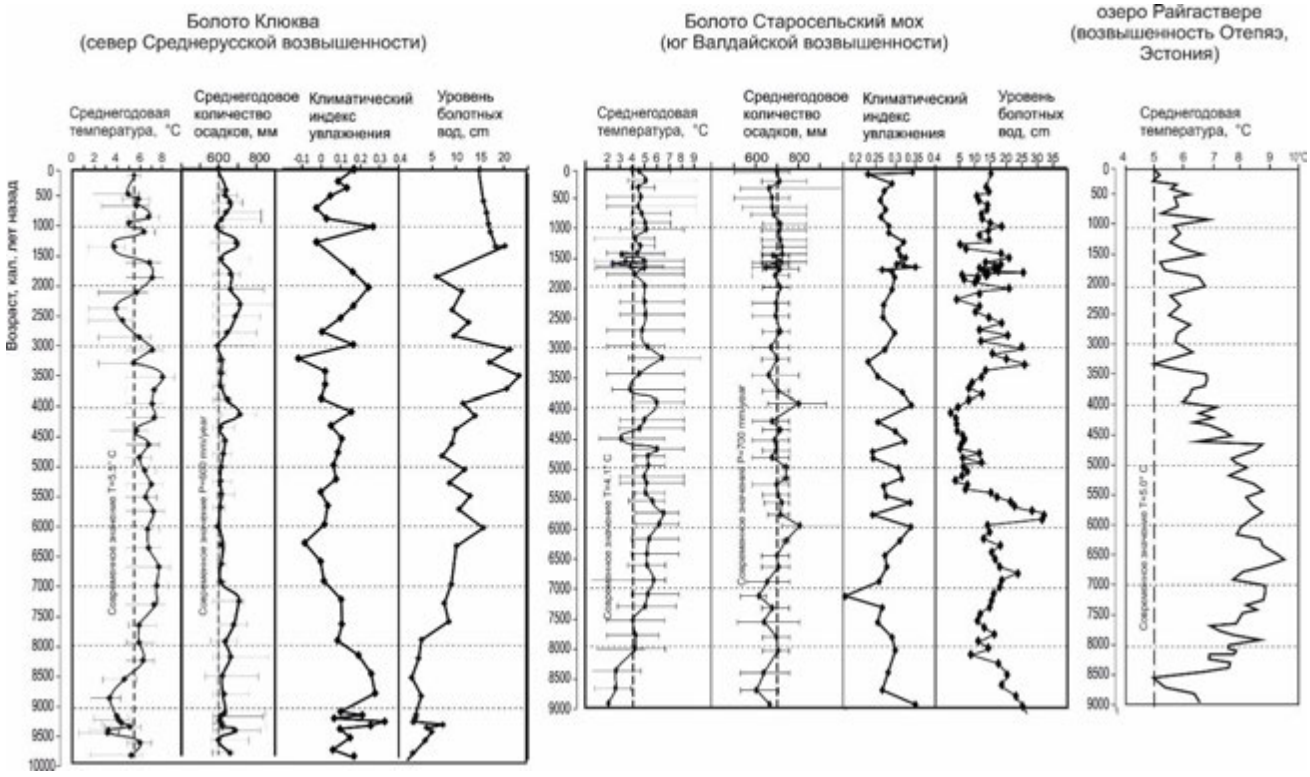


Рис. 4. Климатические изменения на Восточно-Европейской равнине в голоцене. Палеоклиматические реконструкции по разрезам болота Клюква (Novenko et al., 2019), болота Старосельский мох (Novenko et al., 2018) и озера Райгаствере (Seppä, Poska, 2004).

Реконструкции изменения пожарных режимов в голоцене показали возрастание частоты пожаров в бореальном периоде в различных регионах (Зерницкая и др., 2019; Novenko et al., 2016), что может быть индикатором неравномерности выпадения осадков в летний период и повторяемости пожароопасных метеорологических условий. Обобщение данных по концентрации микро- и макрочастиц угля в озерных и болотных отложениях из 117 разрезов в Центральной и Восточной Европе (Feurdean et al., 2020) выявило максимальные за весь голоцен

скорости аккумуляции угольных частиц между 9.0 и 8.0 тыс. кал. л.н. для всего макрорегиона в целом (рис. 3), что свидетельствует о частых и интенсивных природных пожарах.

Косвенными источниками информации о влажности климата могут служить данные о колебаниях уровня озер. Результаты изучения серии озер в Швейцарии и Французских Альпах (Magny, 2010), основанные на 180 радиоуглеродных, дендрохронологических и археологических датировках, показали сложную динамику увлажнения в раннем голоцене. Выявлены фазы повышения уровня озер 10.3-10.0 и 9.55-9.15 тыс. кал. л.н., разделенные периодом, когда уровень озер был значительно ниже современного. Исследования в Южной Швеции (Harrison, Digerfeldt, 1993) показали экстремально низкий уровень озер в интервале примерно 10.5-9.7 тыс. кал. л.н., который затем сменился его быстрым подъемом.

Временной интервал 8.0-5.7 тыс. кал. л.н. (средний голоцен, средняя и поздняя фаза атлантического периода)

Огромное количество работ, посвященных изменению растительности и климата в голоцене, показали, что период 8.0-5.7 тыс. кал. л.н. в Европе отличается наивысшей теплообеспеченностью (Хотинский, 1977; Динамика ландшафтных компонентов …, 2002; Палеоклиматы и палеоландшафты …, 2009; Zagwijn, 1994; Davis et al., 2003; Mauri et al., 2015; Borisova, 2019) и относительно стабильными климатическими условиями (Борисова, 2014; Mayewski et al., 2004). В отечественной литературе этот период носит название климатического оптимума голоцена (Хотинский, 1977). В зарубежной литературе чаще используется термин − среднеголоценовый термический максимум.

В интервале 8.0-5.7 тыс. кал. л.н. в Центральной и Восточной Европе существовала единая зона широколиственных лесов (рис. 1, 2). В северо-западном приатлантическом секторе Европы произрастали широколиственные леса, состоящие из дуба, липы, вяза и ольхи, с небольшим участием тиса и падуба. В Германии, в южной Швеции, в Дании и Польше наивысшего развития достигали дубовые леса, оттеснив на второй план сосновые формации (Latalowa, Nalepka, 1987; Jahns, 2000, 2007; Kalis et al., 2003; Lamentowicz et al., 2008; Kulesza et al., 2012; Gałka et al., 2013). Значительную роль в этих лесах играли вяз, липа, ольха и лещина. В области Герцинских массивов (Шварцвальд, Тюрингский бассейн, Чешский массив) в состав древостоев входили ель и пихта (Harmata, 1987).

В странах Балтии широкое распространение приобрели смешанные дубово-вязово-липовые леса с большим участием ольхи. В северных и восточных районах Беларуси преобладали дубовые леса, в западных – широколиственные леса перемежались с сосново-широколиственными лесами. Как показывают публикации, посвященные истории развития растительности Европейской части России в голоцене (Хотинский, 1977; Величко и др., 2001; Сапелко и др., 2014; Ершова, Кренке, 2014; Новенко, 2016; Низовцев и др., 2020; Kremenetski et al., 2000; Nosova et al., 2019; Tarasov et al., 2019; Miagkaia, Ershova, 2020), в центральных районах Восточно-Европейской равнины произрастали широколиственные леса из дуба, вяза, липы с подлеском из лещины. На низменностях Белорусского Полесья, Принеманья и Мещерской полесской низины существовали сосновые боры с участием широколиственных пород и ольхи (Болиховская, 1988; Зерницкая и др., 2019, 2010; Novenko et al., 2016).

Обширная литература посвящена реконструкциям климатических условий атлантического периода голоцена, как в глобальном масштабе (Guiot et al., 1993; Cheddadi et al., 1997; Tarasov et al., 1999; Davis et al., 2003, Mayewski et al., 2004; Wu et al., 2007; Mauri et al., 2015 и другие публикации), так и на региональном уровне (Korhola et al., 2000; Heikkilä, Seppä, 2003; Seppä, Poska, 2004; Antonsson, Seppä, 2007; Borisova, 2019). Рассматривая имеющиеся данные о палеоклиматических условиях периода 8.0-5.7 тыс. кал. л.н. в Центральной и Восточной Европе, можно сделать заключение о потеплении

климата и ослаблении градиента температур в направлении с запада на восток. Так, например, реконструкции В. Загвийна (Zagwijn, 1994) методом индикаторных видов на основе данных по 136 разрезам в Европе, показали, что как летние, так и зимние температуры на территории Германии и на западе Польши были близки к современным (T_I= -1…0°C; T_{VII}=19°C). Реконструкции палеотемператур «методом лучших аналогов» по данным по разрезу озера Ледница в центральной Польше (Barber et al., 2004) выявили среднюю температуру января около 0°C, что на 2°C выше современных значений.

Реконструкции, полученные при помощи переходной функции по палинологическим данным по разрезам озер Райгаствере (рис. 4), Виитна и Руила в Эстонии, свидетельствуют о повышении среднегодовых температур в среднем голоцене до 8-9°C, что на 3-3.5°C превышает современный уровень (Seppä, Poska, 2004), а реконструкции летних температур этим же методом по данным по разрезу озера Курьяновас в Латвии указывают на рост летних температур до 19-20°C, что на 2-3°C выше, чем в настоящее время (Heikillä, Seppä, 2010). Обобщение палеотемпературных данных (Seppä, Poska, 2004), основанное на 36 реконструкциях среднегодовой и июльской температуры по отдельным разрезам Скандинавии и стран Балтии, показало, что в период 8.0-4.8 тыс. кал. л.н. имел место четко выраженный максимум теплообеспеченности климата, когда годовые температуры превышали современные значения в среднем на 2°C.

Значительное потепление климата в период 8.5-5.7 тыс. кал. л.н. установлено также для территории северной Беларуси. Выявлено повышение среднегодовых температур на 2-4°C по сравнению с современными значениями, а также существенный рост зимних температур (Зерницкая, Новенко, 2016).

В восточной части рассматриваемого субширотного трансекта реконструкции климатических характеристик, проведенные по палинологическим данным болота Старосельский мох (рис. 4), выявили, что во временном интервале 7.5-6.5 тыс. кал. л.н. условия теплообеспеченности юга Валдайской возвышенности были близки к современным, а в период 6.5-5.9 тыс. кал. л.н. среднегодовая температура превышала современные значения на 2°C и была равна 6°C. Согласно реконструкциям О.К. Борисовой (Borisova, 2019), основанным на анализе экологической приуроченности и географического распространения видов ископаемой флоры из отложений атлантического периода голоцена, теплообеспеченность в бассейне Верхней Волги была значительно выше для всего периода 7.6–5.9 тыс. кал. л.н. Средняя температура января превышала современные значения на 6°C, средняя температура июля была близка к современным значениям (17°C). Южнее, как показывают наши реконструкции, сделанные по палинологическим данным по болоту Клюква (рис. 4) на северо-западе Среднерусской возвышенности, существенное потепление установлено для периода 7.5-5.7 тыс. кал. л.н., когда средняя температура года была на 3°C выше, чем в настоящее время.

Обобщение палинологических данных по более чем 500 разрезам в Европе (Davis et al., 2003; Mauri et al., 2015) позволило выделить шесть региональных типов изменений палеоклиматических характеристик. Эти расчеты показали, что максимум теплообеспеченности в атлантическом периоде хорошо прослеживается в Северной Европе и в Феноскандии, преимущественно за счет роста летних температур. В Центральной Европе среднеголоценовый термический максимум выражен слабее, положительные аномалии среднегодовых температур не превышали 1°C (рис. 3). Похожие результаты получены группой исследователей проекта BIOME600 (Wu et al., 2007) и Р. Чеддади (Cheddadi et al., 1997), использующих данные биоклиматического моделирования на основе палинологических материалов по всему миру. Однако потепление климата северных и приатлантических районов Европы, согласно этим модельным расчетам, происходило как в летний, так и в зимний период. Следует заметить, что при анализе климатических изменений

в упомянутых работах использовано очень малое количество данных из регионов, расположенных к востоку от Польши.

Реконструкции количественных значений климатических характеристик для Северного полушария, выполненные А.А. Величко с соавторами (Плеоклиматы и палеоландшафты …, 2009) на основе данных по 400 спорово-пыльцевым диаграммам показали, что наибольшие положительные отклонения среднегодовой температуры имели место в приполярных районах. Для среднеширотного пояса Европы среднегодовая температура превышала современные значения на 1-2°С. Реконструкции, полученные П.Е. Тарасовым с соавторами (Tarasov et al., 1999) для хроносреза 6000 ^{14}C лет назад (около 6.8 тыс. кал. л.н.) для территории бывшего Советского Союза и Монголии, также показали превышение среднегодовых температур на 2°С для Европейской части России.

Количественные оценки среднегодового количества осадков в голоцене немногочисленны. В основном преобладают косвенные данные об изменении увлажнения климата для различных регионов. Согласно реконструкции среднего отклонения годовой сумы осадков от современных значений для Северного полушария для хроносреза примерно 6.8-6.3 тыс. кал. л.н. (6.0-5.5 тыс. ^{14}C л.н.), полученной А.А. Величко с соавторами (Палеоклиматы и палеоландшафты …, 2009), на территории Центральной Европы среднегодовое количество осадков было близко к современным показателям, а на территории Восточной Европы в пределах рассматриваемого трансекта было характерно сокращение осадков на 25 мм в год. Аналогичные результаты были получены для этой же территории Ж. Гуйо с соавторами (Guiot et al., 1993). Расчеты разности между осадками и потенциальным испарением, выполненные этими авторами, показали, что около 6.8 тыс. кал. л.н. (6000 ^{14}C л.н.) климат был немного более сухим в Центральной Европе, а на территории Восточно-Европейской равнины условия увлажнения были близки к современным, за исключением восточной части Европейской территории России.

Полученные нами характеристики изменений увлажнения климата на территории Восточно-Европейской равнины показали, что годовое количество осадков в северной части Беларуси (Зерницкая, Новенко, 2016), на западе Европейской части России в Приильменской низменности (Nososva et al., 2019), а также на северо-западе Среднерусской возвышенности (разрез болота Клюква) было близким к современному, что при повышении летних температур, возможно, могло приводить к иссушению климата за счет увеличения испарения. На юге Валдайской возвышенности, согласно реконструкции по данным разреза болота Старосельский мох, в период 7.5-6.8 тыс. кал. л.н. осадков в год выпадало на 50-75 мм меньше, чем сейчас, а в период 6.8-6.1 тыс. кал. л.н. условия увлажнения были близки к современным. Реконструкции, выполненные В.А. Климановым по данным из разреза Половецко-Купанского болота также указывают на снижение среднегодового количества осадков на 25-50 мм в Ярославском Поволжье в течение всего атлантического периода голоцена (Khotinsky, Klimanov, 1997). По оценкам О.К. Борисовой для этой же территории осадков выпадало около 600 мм в год (Borisova, 2019), что близко к современным значениям.

Для характеристики условий увлажнения в течение голоцена нами был применен климатический индекс увлажнения (climate moisture index, CMI). В основу CMI положено соотношение годового количества осадков и величины потенциального испарения или испаряемости (Olchev et al., 2020). Необходимое для расчетов потенциальное испарение рассчитывается с помощью уравнения Пристли-Тейлора с использованием информации об изменении растительности и температуры, реконструированным по палинологическим данным разрезов болот Старосельский мох и Клюква. Расчеты показали, что на Валдайской возвышенности величина испаряемости была почти равна количеству выпадающих осадкой в период 7.0-5.5 тыс. кал. л.н., а на севере Среднерусской возвышенности превышала их (рис. 4), что указывает на относительно сухие климатические условия (Novenko et al., 2018, 2019).

Одним из косвенных показателей уменьшения влажности климата в среднем голоцене являются данные о колебаниях уровня озер. Для территории Центральной Европы в целом характерно понижение уровня озер около 7.0 тыс. ^{14}C л. н. (Magny, 2004). Однако в озерах в отдельных регионах, например, в южной Швеции могло происходить, как существенное снижение, так и повышение уровня (Harrison, Digerfeldt, 1993). Об уменьшении водности рек в этот же период на Восточно-Европейской равнине свидетельствуют результаты исследований морфологии речных излучин, проведенные А.Ю. Сидорчуком с соавторами (2012). Формирование малых палеорусел и почвенных горизонтов на поймах на севере и в центральной части Восточно-Европейской равнины указывают на длительное и значительное снижение руслоформирующих расходов воды и затопление пойм в среднем голоцене (Сидорчук и др., 2018).

Другой подход к оценке условий увлажнения – реконструкции колебания уровня болотных вод по ризоподным данным. Подобные расчеты при помощи переходной функции на основе изменений видового состава сообществ раковинных амеб из разреза болота Тухола в северной Польше (Lamentowicz et al., 2008) показали экстремально сухой период 7.15-6.8 тыс. кал. л.н., что хорошо согласуется с данными по колебаниям уровня озер этого региона (Ralska-Jasiewiczowa, 1989). Исследования на юге Валдайской возвышенности позволили выделить два периода понижения поверхностной влажности в болоте Староселький мох (рис. 4), очевидно, обусловленных сухими условиями в летний период – 7.0-6.2 и 6.0-5.5 тыс. кал. л.н. (Novenko et al., 2018). Сходные результаты получены по данным ризоподного анализа болота Клюква на Среднерусской возвышенности (Novenko et al., 2019), где период понижения уровня болотных вод выделен между 6.8 и 5.5 тыс. кал. л.н. (рис. 4).

Временной интервал 5.7 тыс. кал. л.н. – настоящее время (средний-поздний голоцен, суббореальный и субатлантический периоды)

Ландшафтно-климатические реконструкции в различных регионах мира убедительно демонстрируют, что после 5.7-5.5 тыс. кал. л.н. глобальное потепление термического максимума голоцена сменилось похолоданием (Хотинский, 1977; Борисова, 2014; Davis et al., 2003; Wanner et al., 2008; Mauri et al., 2015), причиной которого, очевидно, явилось сокращение прихода солнечной радиации в летний период (рис. 3; Berger, Loutre, 1991). Этому времени соответствуют повсеместное наступание горных ледников (начало “неогляциала”; Wanner et al., 2008; Solomina et al., 2008), усиление западного переноса воздушных масс (рис. 3; Mayewski et al., 2004). В морских отложениях в Северной Атлантике вновь отмечается увеличение поступления минеральных частиц за счет айсбергового разноса (рис. 3) и появление холодолюбивых видов планктонных фораминифер (Bond et al., 2001). Глобальный тренд к похолоданию в позднем голоцене четко прослеживается по изменению изотопно-кислородного состава ледниковых кернов Гренландии (Mayewski et al., 2004; Vinther et al., 2006).

Вторая половина голоцена характеризовалась сложной динамикой растительных сообществ в Центральной и Восточной Европе, обусловленной, как климатическими изменениями, так и действием антропогенного фактора, влияние которого особенно усилилось в последнее тысячелетие. В западной части рассматриваемого субширотного трансекта, начиная с 5.7 тыс. кал. л.н., происходило сокращение площадей дубовых и сосново-дубовых лесов, распространение граба и бука и усиление их роли в качестве доминантов лесных сообществ (рис. 1). В распространении буковых лесов отмечается некоторое запаздывание в направлении с запада на восток. Так, в западной и центральной Германии, в бассейнах Рейна, Везера и Заале подъем кривой бука относится ко времени

около 3.7-3.9 тыс. кал. л.н., но уже на востоке Германии в бассейнах Эльбы и Одера и в западной Польше бук становится основной лесообразующей породой только около 2.8-2.6 тыс. кал. л.н. (Jahns, 2000; Lamentowicz et al., 2008, Gałka et al., 2013). В центральной и восточной Польше (Ralska-Jasiewiczowa et al., 2003) основными лесообразующим породами были граб и сосна, при значительном участии дуба. Бук присутствовал на этих территориях в виде примеси. Формирование грабовых лесов началось около 3.5 тыс. кал. л.н, когда граб постепенно вытеснил из древостоев дуб и липу.

На территории северной и центральной части Беларуси (Белорусское Поозерье), в Эстонии, Латвии и Литве вторая половина голоцена характеризовалась распространением ели (Зерницкая и др., 2010; Seppä, Poska, 2004; Zernitskaya, Mikhailov, 2009, Niinemets, Saarse, 2009). Начиная примерно с 5.7 тыс. кал. л.н., исследователи этих регионов выделяют несколько последовательных фаз увеличения и сокращения доли ели и широколиственных пород в лесных сообществах. Пыльца граба отмечена в спорово-пыльцевых спектрах из разрезов на территории, прилегающей к Балтийскому морю, повсеместно. Однако ее содержание не превышает 1-2%.

В центре Восточно-Европейской равнины перестройка растительного покрова была связана с увеличением обилия ели, которая происходила трансгрессивно с севера на юг (рис. 2). На Валдайской возвышенности и в бассейне Верхней Волги формирование елово-широколиственных лесов («верхний максимум ели») относится к 5.5 тыс. кал. л.н. (Климанов и др., 1995; Величко и др., 2001; Клименко, Климанов, 2003; Новенко, 2016). В Вятско-Камском крае возрастало участие пихты в лесных сообществах (Лычагина и др., 2016). На Смоленско-Московской возвышенности увеличение численности ели в древостоях началась около 2.7-2.5. тыс. кал. л.н., хотя в небольшом количестве ель присутствовала на этой территории и ранее (Kremenetski et al., 2000; Ершова, Кренке, 2014; Низовцев и др., 2020; Miagkaia, Ershova, 2020). Южнее, в бассейне Верхней Оки на Среднерусской возвышенности широколиственные леса из дуба, вяза и липы сохранялись на протяжении всего голоцена. Ель, будучи на границе своего ареала, входила в лесные ценозы в виде примеси в благоприятных экотопах, начиная с 2.5 тыс. кал. л.н..

В области распространения псаммофитно-боровых ландшафтов Полесий сосновые и широколиственно-сосновые леса сохранялись в растительном покрове до 2.7 тыс. кал. л.н. В Белорусском Полесье в течение интервала 2.7-1.0 тыс. кал. л.н. возрастает участие в спектрах пыльцы граба (до 10%), что указывает на распространение смешанных сосново-широколиственных лесов с участием дуба и граба и с примесью липы, вяза, ели, и возможно, бука (Зерницкая и др., 2010, 2019). При движении на восток в поясе полесий Европейской части России участие пыльцы широколиственных пород сокращается, пыльца граба встречается единично, возрастает доля сосны, березы и трав (Болиховская, 1988; Novenko et al., 2016, 2018).

Начиная с 5.7 тыс. кал. л.н., основная тенденция климатических изменений проявилась в снижении теплообеспеченности и в увеличении влажности климата (Динамика ландшафтных компонентов …, 2002; Борисова, 2014). Реконструкции изменения палеотемператур для территории Центральной Европы, полученные Б. Дэвисом с соавторами по палинологическим данным (Davis et al., 2003) показали, что в отличие от Северной Европы, где похолодание последних пяти тысяч лет было выражено особенно отчетливо, в среднеширотной области Европы снижение средних температур января, июля и года за этот период не превышало 2°С.

Поскольку возможности реконструкции характеристик палеоклимата для западной части рассматриваемого в работе субширотного трансекта ограничены ввиду искажений спорово-пыльцевых спектров, связанных с действием антропогенного фактора, то в ряде работ для восстановления условий прошлого часто применяются другие источники

палеогеографической информации. Принимая во внимание большой массив данных о строении торфяных залежей, степени гумификации торфа и результатах ризоподного анализа отложений разрезов верховых болот в Великобритании, Ирландии, Нидерландах, Северной Германии, Дании и Швеции, можно выделить фазы похолодания и увлажнения климата около 4.4-4.0, 2.8-2.2, 1.8-1.7, 1.4-1.3 и 1.1-1.0 тыс. кал. л.н., а также колебания климата последнего тысячелетия (Charman, Hendon, 2000; Barber et al., 2004; Lücke et al., 2003). На существенное похолодание и увеличение количества осадков около 2.6 тыс. кал. л.н. указывает Б. Ван Гиил (Van Geel, 1978) на основании результатов палеоботанического анализа болотных отложений в Нидерландах.

Косвенным показателем похолодания и увлажнения климата могут служить данные о периодах увеличения высоты половодий, полученные для территории Польши на основании результатов геоморфологических исследований. Л. Старкеля с соавторами (Starkel et al., 2013) во вторую половину голоцена выделили три таких периода, соответствующие 6350-6300, 4825-4775 и 3230-1950 кал. л.н. Реконструкции уровня болотных вод в экосистемах верховых болот на севере Польши по данным о степени разложения торфа и соотношению видов в сообществах раковинных амеб позволили выделить влажную фазу 2.75-2.4 тыс. кал. л.н. и сухую фазу 2.25-2.1 тыс. кал. л.н. (Lamentowicz et al., 2008). На территории Восточно-Европейской равнины на основании результатов изучения состава и радиоуглеродного датирования аллювиальных отложений (Panin, Matlakhova, 2015), выявлено увеличение водности рек в начале суббореала (около 5.7 тыс. кал. л.н.) и в начале субатлантика (около 2.6 тыс. кал. л.н.).

На северо-западе Восточно-Европейской равнины в странах Балтии согласно климатическим реконструкциям по палинологическим данным по разрезу озера Курьяновас в Латвии (Heikkilä, Seppä, 2010) и озер Райгаствере, Виитна и Руила в Эстонии (Seppä, Poska, 2004), снижение средней температуры июля и среднегодовой температуры за период с 5.7 тыс. кал. л.н. до настоящего времени составило 3-3.5°С. На фоне общего тренда к похолоданию выделяются периоды потеплений около 3.6 и 2.0 тыс. кал. л.н., похолодание около 2.5 тыс. кал. л.н. и резкое и глубокое снижение теплообеспеченности Малого ледникового периода (рис. 4).

Климатические реконструкции по данным разрезов на севере Беларуси (Зерницкая, Новенко, 2016) и в Европейской России на Приильменской низменности (Nosova et al., 2019) и на Валдайской возвышенности (Novenko et al., 2018) показали, что около 5.7 тыс. кал. л.н. выявлено понижение среднегодовых температур на 2-3°С (рис. 4), осадки были близки к современным значениям, а около 4.5 тыс. кал. л.н. их количество возросло до 800 мм/год (на 100 мм выше, чем сейчас). На юге лесной зоны на Среднерусской возвышенности (данные по болоту Клюква) среднегодовые температуры понизились на 1-2°С и достигли современных значений, осадков выпадало около 600 мм/год (рис. 4). Выделенное нами похолодание и рост влажности климата около 4.5 тыс. кал. л.н. с очень высокой долей условности можно сопоставить с «событием 4.2 тыс. кал. л.н.».

«Событие 4.2 тыс. кал. л.н.» до настоящего времени недостаточно изучено. На территории Европы очень мало работ, где бы реконструкции климатических условий и изменениям палеосреды в это время было уделено значительное внимание. И, кроме того, реконструкции, полученные по различным природным архивам противоречивы и выделенные климатические сигналы асинхронны (Roland et al., 2014; Pleskot et al., 2020). В целом для Северной Евразии была выдвинута гипотеза об увеличении амплитуды температур между сезонами года в период «события 4.2 кал. л.н.» (Perşoiu et al., 2019). Понижение зимних температур связывают с ослаблением исландского минимума (Bradley, Bakke, 2019).

Полученные нами климатические реконструкции по данным разрезов оз. Межужол

(Зерницкая, Новенко, 2016) и болот Старосельский мох и Клюква позволили выделить теплую и экстремально сухую фазу между 3.5 и 2.5 тыс. кал. л.н. В этот период среднегодовые и летние температуры превышали современные значения на 1-2°С, количество осадков было близким к современным или немного ниже (рис. 4). Для этого временного интервала по данным из разрезов болот Старосельский мох и Клюква реконструирован низкий показатель CMI, а также наиболее низкий уровень болотных вод за весь голоцен, что указывает на существенное снижение поверхностной влажности болотных экосистем в летний период, очевидно, за счет изменения баланса осадки/испарение (Novenko et al., 2018, 2019). Потепление около 3.5 тыс. кал. л.н. зафиксировано также в климатических реконструкциях для Ярославского Поволжья, полученных по палинологическим материалам Половецко-Купанского болота и озера Галич (Климанов и др., 1995, Величко и др., 2001), согласно которым все температурные показатели превышали современные на 1.5°С. Увеличение содержания катиона K^+ в ледяном керне GISP2 в Гренландии в этот временной интервал (рис. 3; Mayevski et al., 2004) указывает на усиление действия Сибирского антициклона, что вероятно, приводило к увеличению повторяемости антициклональных обстановок на Восточно-Европейской равнине, и в летний период могло вызывать засухи и создавать условия для возникновения природных пожаров. Результаты изучения изменения пожарных режимов на территории Восточно-Европейской равнины в голоцене, основанные на подсчетах концентрации микро- и макрочастиц угля в отложениях, показали увеличение частоты и интенсивности лесных пожаров в период 3.5-2.5 тыс. кал. л.н. в различных регионах (Novenko et al., 2016, 2019).

Потепление сменилось плавным похолоданием в начале субатлантического периода (около 2.6-2.5 тыс. кал. л.н.). Это похолодание отчетливо зафиксировано по палеоботаническим данным (Davis et al., 2003; Mauri et al., 2015) и изотопно-кислородному составу ледяных кернов Гренландии (Thomas et al., 2007), а также сопровождалось синхронным увеличением размеров ледников во всех горных странах Европы (Wanner et al., 2008; Solomina et al., 2008). Похолодание не было монотонным и включало серию теплых и холодных фаз. В течение первого тысячелетия нашей эры многие авторы выделяют Римское Потепление (2.0-1.7 тыс. кал. л.н.) и Похолодание Темных веков (1.7-1.2 тыс. кал. л.н.; Buntgen et al., 2011; Helama et al., 2017; Gouw-Bouman et al., 2019). Обзор 114 статей, посвященных Похолоданию Темных веков по всему миру, выполненное С. Хеламой с соавторами (Helama et al., 2017), показал, что климат Европы в это время был более прохладный и влажный, чем в настоящее время. В период 1.7-1.5 тыс. кал. л.н. происходило увеличение горного оледенения (Solomina et al., 2008), подъем уровня озер (Magny, 2004), увеличение лесистости в лесостепной зоне (Новенко, 2016). Однако реконструкции, полученные для Восточно-Европейской равнины информационно-статистическим методом по данным болота Усвятский Мох (Западная Двина), свидетельствуют о потеплении и иссушении климата между 1700 и 1500 кал. л.н. (Кожаринов и др., 2003), а расчеты по данным Половецко-Купанского болота в Ярославском Поволжье указывают на потепление и увеличение осадков в тот же период (Климанов и др., 1995). Полученные нами реконструкции «методом лучших аналогов» в целом отражают увеличение теплообеспеченности и сокращение влажности климата во время Римского потепления и последующее похолодание и увеличение осадков. К сожалению, в изученных разрезах эти интервалы представлены небольшим количеством образцов, что затрудняет реконструкцию.

Ландшафтно-климатические изменения последнего тысячелетия детально изучены различными методами с широким географическим охватом (Климанов и др., 1995; Mann et al., 2009; Wanner et al., 2008; Christiansen and Ljungqvist, 2012; Pages 2k Consortium, 2013, 2017). Выделены две ярко выраженных климатических фазы: *Средневековая климатическая аномалия* (СКА, 950-1250 гг. н.э.) и *Малый ледниковый период* (МЛП, 1400-1850 гг. н.э.).

Палеоклиматические реконструкции с использование различных природных архивов характеризуют СКА как теплый и относительно сухой период (Goosse et al., 2005). Есть данные о повторяющихся летних засухах, выявленных в ряде регионов Европы (Büntgen et al., 2010) и о снижении стока рек в этот период (Panin, Matlakhova, 2015). Хотя результаты некоторых палеоклиматических исследований указывают на рост среднегодового количества осадков (Davis et al., 2003).

Согласно палеоклиматическим реконструкциям по палинологических данным с оз. Райгаствере, среднегодовая температура в период СКА в странах Балтии превышала современный уровень на 1°С (Seppa, Poska, 2004). В спорово-пыльцевых спектрах из отложений ряда разрезов центральных районов Европейской части России (Хотинский, 1977; Климанов и др., 1995), относящихся к СКА, отмечено увеличение доли широколиственных пород: дуба, липы, вяз). Реконструкции палеотемператур для территории юга Валдайской возвышенности указывают на повышение среднегодовых температур на 1.5°С. Расчеты В.А. Климанова для Ярославского Поволжья показали, что все характеристики температур в течение СКА были близки к современным, а количество осадков − на 25-50 мм ниже (Климанов и др., 1995).

Резкое и глубокое снижение теплообеспеченности в течение МЛП прослеживается повсеместно как на рассматриваемой территории, так и по всему Северному полушарию (Christiansen, Ljungqvist, 2017). Возможно, понижение температуры в Малый ледниковый период было наиболее значительным из всех климатических осцилляций на протяжении голоцена, за исключением, вероятно, «события 8.2 тыс. кал. л.н.».

Для Центральной Европы аномалии летних, зимних и среднегодовых температур в это время составляли 1°С (Davis et al., 2003; Mauri et al., 2015). Реконструкции К. Барбер с соавторами (Barber et al., 2004) с использованием палинологических данных по разрезу оз. Ледница в западной Польше выявили более значительное похолодание в зимнее время, когда средние температуры января и среднегодовые температуры были ниже современных значений на 2.5°С. Для территории Прибалтики существенное снижение теплообеспеченности установлено по данным ряда разрезов. Среднегодовые температуры были на 2°С ниже, чем в настоящее время (Seppa, Poska, 2004).

МЛП на Валдайской возвышенности характеризовался понижением средней температуры января на 3°С (до –12°С) и среднегодовой температуры на 2°С, июльская температура менялась незначительно. В спорово-пыльцевых спектрах этого временного интервала происходит резкое падение доли термофильных элементов, практически до их полного исчезновения, и увеличение роли пыльцы ели. В спорово-пыльцевых спектрах Половецко-Купанского болота МЛП проявился, помимо деградации широколиственных пород, в существенном увеличении доли кустарниковых берез. В.А. Климанов охарактеризовал это похолодание не только падением зимних температур, но и летних, и среднегодовых (Климанов и др., 1995). Отклонения последних от современных значений составляли 2°С.

Изменения климата в МЛП оказали большое влияние на флювиальное осадконакопление, как в Центральной, так и в Восточной Европе. Рост частоты и высоты весенних половодий, формирование вторичных врезов в оврагах и балках свидетельствует об увеличении влажности климата в этот период (Сидорчук и др., 2018; Panin, Matlakhova, 2015).

Основные закономерности динамики климата в Центральной и Восточной Европе в голоцене и ожидаемые ландшафтно-климатические изменения

Согласно концепции об асимметрии основного климатического тренда в межледниковье (Величко, 2012), среднегодовая температура для Северной Евразии быстро росла в начальные фазы голоцена и плавно понижалась в его второй половине. Расчеты показали,

что тренд к потеплению от позднеледниковья до оптимума голоцена составил 0.5° за 1000 лет, а для второй половины теплого периода этот показатель не превышает 0.3° за 1000 лет (Борисова, 2014). Однако следует отметить, что рассмотренные реконструкции палеотемператур для территории Центральной и Восточной Европы в голоцене демонстрируют, что снижение теплообеспеченности за период, прошедший после термического максимума, еще не достигло уровня раннего голоцена (Davis et al., 2003; Novenko et al., 2018, 2019).

Рассмотренные выше данные позволили выделить три основных этапа изменения климатического режима в голоцене: быстрое потепление ранних фаз голоцена (11.7-8.0 тыс. кал. л.н.), осложненное серией осциляций; термический максимум голоцена (8.0-5.7 тыс. кал. л.н.), для которого было характерно отсутствие короткопериодных и резких климатический изменений; направленное похолодание второй половины голоцена (5.7 тыс. кал. л.н. – настоящее время), с наложенными на него квазигармоническими колебаниями температуры и осадков.

Проведенный анализ ландшафтно-климатических реконструкций для территории Центральной и Восточной Европы показал, что выделенные периоды похолоданий и разделяющих их потеплений климата в целом совпадают с этапами, установленными в глобальном масштабе (Mayewski et al., 2004). Расхождения во времени начала и конца теплых и холодных фаз в различных районах составляют 100-200 лет, что находится в пределах допустимой погрешности радиоуглеродных дат и также может быть связано с неточностями построения моделей возраст/глубина для конкретных разрезов, по которым проводились реконструкции.

«Критическая точка» климатических изменений, связанная с «событием 8.2 тыс. кал. л.н.», которое предложено международной стратиграфической комиссией в качестве границы раннего и среднего голоцена (Walker et al., 2019; Head, 2019) в Центральной и Восточной Европе, является поворотным событием при переходе климатической системы от потепления раннего голоцена к его термическому максимуму. Изменения климата, связанные с «событием 4.2 тыс. кал. л.н.», предложенного как рубеж среднего и позднего голоцена (Head, 2019), по нашим данным прослеживаются не так отчетливо, как похолодание около 5.7 тыс. кал. л.н. В Центральной и Восточной Европе, начиная с 5.7 тыс. кал. л.н., меняется направленность климатического тренда, усиливается секторная дифференциация растительного покрова. В западных районах начинается экспансия бука и граба, на востоке начинает распространяться ель.

Согласно последним оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2013), основанным на результатах модельных экспериментов CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5) по четырем основным сценариям репрезентативных траекторий концентраций парниковых газов (RCP2.6; RCP4.5; RCP6.0 и RCP8.5), рост среднеглобальной температуры к концу текущего столетия составит от 0.3°C (наиболее мягкий сценарий RCP2.6) до 4.8°C (наиболее жесткий сценарий RCP8.5) . Увеличение количества осадков составит от 6% (RCP2.6) до 12% (RCP8.5). Оценка роста среднегодовой температуры воздуха в Центральной и Восточной Европе к концу XXI века в рамках этих сценариев предполагает ее увеличение на 2.0-2.5°C по наиболее мягкому сценарию и на 6.0-7.0°C по наиболее жесткому. Прирост среднегодового количества осадков составит от 7% (RCP2.6) до 15% (RCP8.5; IPCC, 2013).

Используя метод палеоаналогов, предложенный М.И. Будыко (1980) и широко применяемый А.А. Величко с соавторами (Величко, 2012; Климаты и ландшафты Северной Евразии …, 2010) для прогнозирования возможной динамики ландшафтов и климата с использованием палеогеографических данных, можно предложить условия термического максимума голоцена (8.0-5.7 тыс. кал. л.н.), когда среднегодовые температуры превышали

современные в рассматриваемом регионе на 2-3°С, и условия периодов потеплений в интервалах 3.5-2.5 тыс. кал. л.н., 2.0-1.7 тыс. кал. л.н. (Римский теплый период) и Средневековой климатической аномалии, когда отклонения среднегодовых температур от современных значений составляли от 1.0 до 2.0°С, в качестве возможных траекторий изменения природной среды при потеплении климата в случае реализации сценариев RCP2.6 и RCP4.5. Сценарии RCP6.0 и RCP8.5 предполагают большее отклонение температур от современных значений, чем было выявлено в течение голоцена. Палеоаналоги этих обстановок следует искать в условиях более ранних межледниковий.

Принимая во внимание ландшафтно-климатические реконструкции для голоцена Центральной и Восточной Европы, можно ожидать изменений внутренней структуры геосистем, особенно, в восточной секторе рассматриваемого трансекта, а также увеличение частоты пожаров, вызванных естественными причинами, а также возрастание частоты катастрофических явлений, связанных с неравномерностью выпадения осадков. Однако даже для наиболее резких перестроек ландшафтных компонентов в голоцене требовались столетия и даже тысячелетия, в то время как ожидаемое в XXI веке потепление климата может занять период менее ста лет. Адаптивные механизмы геосистем обладают определенной инерцией, и, очевидно, при прогнозе следует учитывать некоторое запаздывание отклика ландшафтных компонентов на потепление климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Болиховская Н.С. 1988. К истории растительности и климата Подмосковной Мещеры в голоцене // Палеоклиматы голоцена Европейской территории СССР. М.: Наука. С. 76-85.

Борзенкова И.И., Борисова О.К., Жильцова Е.Л., Сапелко Т.В. 2017. Холодный эпизод около 8200 лет назад в Северной Европе: анализ эмпирических данных и возможных причин // Лед и снег. Т. 57. № 1. С. 117-132.

Борисова О.К. 2014. Ландшафтно-климатические изменения в голоцене // Известия РАН. Серия географическая. № 2. С. 5-20.

*Будыко М.И. 1*980. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеоиздат. 352 с.

Величко А.А. 2012. Эволюционная география: проблемы и решения. М.: ГЕОС. 563 с.

Величко А.А., Кременецкий К.В., Негенданк Й., Минграм Й., Борисова О.К., Грибченко Ю.Н., Зеликсон Э.М., Климанов В.А., Новенко Е.Ю., Пирумова Л.Г., Писарева В.В., Разумовский Л.В., Тимирева С.Н. 2001. Позднечетвертичная палеогеография северо-востока Европы (по данным комплексного изучения осадков Галичского озера) // Известия РАН. Серия географическая. № 3. С. 42-54.

Гричук В.П. 1969. Опыт реконструкции некоторых элементов климатов северного полушария в атлантический период голоцена // Голоцен. М.: Наука. С. 41-57.

Гричук В.П. 1989. История флоры и растительности Русской равнины в плейстоцене. М.: Наука. 183 с.

Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 130000 лет (общая палеогеография). Атлас-монография. 2002. М.: ГЕОС. 232 с.

Ершова Е.Г., Кренке Н.А. 2014. Изучение природных и культурных ландшафтов железного века в долине Москвы-реки методами палинологии и археологии // Вестник археологии, антропологии и этнографии. № 3. С. 159-172.

Зерницкая В.П., Новенко Е.Ю. 2016. Реконструкция климата Беларуси в позднеледниковье и голоцене // Инженерный журнал: наука и инновации. Т. 9. № 163. С. 21-24.

Зерницкая В.П., Новенко Е.Ю., Станчикайте М., Власов Б.П. 2019. Изменения окружающей среды в позднеледниковье и голоцене на юго-востоке Беларуси // Доклады НАН

Беларуси. Т. 63. № 5. С. 584-596.

Зерницкая В.П., Матвеев А.В., Тимерева С.Н. 2010. История формирования болота Иванисовка (Белорусское Полесье) // Літасфера. № 1 (32). С. 20-30.

Климанов В.А., Серебряная Т.А. 1986. Изменения растительности и климата на Среднерусской возвышенности в голоцене // Известия АН СССР. Серия географическая. № 2. С. 93-101.

Климанов В.А., Хотинский Н.А., Благовещенская Н.В. 1995. Колебания климата за исторический период в центре русской равнины // Известия РАН. Серия географическая. № 1. С. 89-96.

Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и сценарии. Атлас-монография. 2010. М.: ГЕОС. 220 с.

Клименко В.В., Климанов В.А. 2003. Холодный климат ранней субатлантической эпохи в Северном полушарии // Доклады Академии наук. Т. 391. № 3. С. 393-397.

Кожаринов А.В., Сирин А.А., Клименко В.В., Климанов В.А., Малясова Е.С., Слепцов А.М. 2003. Динамика растительного покрова и климата Западнодвинской низины (Тверская область) за последние 5 тысяч лет // Ботанический журнал. Т. 88. № 3. С. 90-97.

Лычагина Е.Л., Зарецкая Н.Е., Чернов А.В., Лаптева Е.Г., Трофимова С.С., Зиновьев Е.В. 2016. Палеоэкологические исследования в районе Чашкинского озера (Среднее Предуралье) // Седьмые Берсовские чтения. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Екатеринбург. С. 294-302.

Нейштадт М.И. 1957. История лесов и палеогеография СССР в голоцене. М.: Наука. 404 с.

Низовцев В.А., Новенко Е.Ю., Эрман Н.М., Мазей Н.Г., Матасов В.М., Лаврова Н.Б., Филимонова Л.В. 2020. Эволюция ландшафтов бассейна Средней Протвы в голоцене // Вестник Московского университета. Серия 5: География. № 1. С. 73-86.

Новенко Е.Ю. 2016. Изменения растительности и климата Центральной и Восточной Европы в позднем плейстоцене и голоцене в межледниковые и переходные этапы климатических макроциклов. М.: ГЕОС. 228 с.

Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северной Евразии. Поздний плейстоцен-голоцен. Атлас-монография. 2009. М.: ГЕОС. 120 с.

Сапелко Т.В., Кузнецов Д.Д., Корнеенкова Н.Ю., Денисенков В.П., Лудикова А.В. 2014. Палеолимнология внутренних озер острова Путсаари (Ладожское озеро) // Известия Русского географического общества. Т. 146. № 3. С. 29-40.

Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. 2012. Снижение стока рек равнин Северной Евразии в оптимум голоцена // Водные ресурсы. Т. 39. № 1. С. 40.

Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. 2018. Речной сток на восточно-европейской равнине за последние 20 тысяч лет и проблема изменения уровней южных морей // Вопросы географии. № 145. С. 144-168.

Соломина О.Н. 2010. Климатические причины колебаний горных ледников в голоцене // Лед и снег. № 1. С. 103-110.

Субетто Д.А., Давыдова Н.Н., Сапелко Т.В., Вольфарт Б., Вастегорд С., Кузнецов Д.Д. 2003. Климат северо-запада России на рубеже плейстоцена и голоцена // Известия РАН. Серия географическая. № 5. С. 80-91.

Хотинский Н.А. 1977. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука. 200 с.

Allen J.R.M., Long A.J., Chris J., Pearson D.G., Huntley B. 2007. Holocene climate variability in northernmost Europe // Quaternary Science Reviews. Vol. 26. P. 1432-1453.

Alley R.B., Mayewski P.A., Sowers T., Stuiver M., Taylor K.C., Clark P.U. 1997. Holocene climatic instability: a prominent, widespread event 8200 yr ago // Geology. Vol. 25. P. 483-486.

Antonsson K., Seppä H. 2007. Holocene temperatures in Bohusläп, southwest Sweden: a quantitative reconstruction from fossil pollen Data // Boreas. Vol. 36. P. 400-410.

Barber K., Zolitschka B., Tarasov P., Lotter A.F. 2004. Atlantic to Urals − the Holocene climatic record of mid-latitude Europe // Past Climate Variability through Europe and Africa / Eds. R.W. Battarbee, F. Gasse, C.E. Stickley. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. P. 417-442.

Berger A., Loutre M.F. 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quaternary Science Reviews. Vol. 10. P. 297-317.

Björck S., Kromer B., Johnsen S., Bennike O., Hammarlund D., Lehmdahl G., Possnert G., Rasmussen T.L., Wohlfarth B., Hammer C.U., Spurk M. 1996. Synchronised terrestrial-atmospheric deglacial records around the North Atlantic // Science. Vol. 274. P. 1155-1160.

Bond G., Broecker W., Johnsen S., McManus J., Labeyrie L., Jouzel J., Bonani G. 1993. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice // Nature. Vol. 365. P. 143-147.

Bond G., Kromer B., Beer J. et al. 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene // Science. Vol. 294. P. 2130-2136.

Borisova O. 2019. Environmental and climatic conditions of human occupation in the central east European plain during the middle Holocene: Reconstruction from palaeofloristic data // Quaternary International. Vol. 516. P. 42-57.

Bos J.A.A., Urz R. 2003. Late Glacial and early Holocene environment in the middle Lahn river valley (Hessen, central-west Germany) and the local impact of early Mesolithic people − pollen and macrofossil evidence // Vegetation History Archaeobotany. Vol. 12. P. 19-36.

Bos J.A.A., van Geel B., van der Plicht J., Bohncke S.J.P. 2007. Preboreal climate oscillations in Europe: Wiggle-match dating and synthesis of Dutch high-resolution multi-proxy records // Quaternary Science Reviews. Vol. 26. P. 1927-1950.

Bradley R.S. 2008. Holocene perspectives on future climate change // Natural climate variability and global warming: A Holocene perspective / Eds: R.W. Battarbee, H.A. Binney. Chichester: J. Wiley & Sons. P. 254-268.

Bradley R.S., Bakke J. 2019. Is there evidence for a 4.2 ka BP event in the northern North Atlantic region? // Climate in the Past. Vol. 15. P. 1665-1676.

Büntgen U., Tegel W., Nicolussi K., McCormick M., Frank D., Trouet V., Kaplan J.O., Herzig F., Heussner K.-U., Wanner H., Luterbacher J., Esper J. 2011. 2500 years of European climate variability and human susceptibility // Science. Vol. 331. P. 578-582.

Büntgen U., Trouet V., Frank D., Leuschner H.H., Friedrichs D., Luterbacher J., Esper J. 2010. Tree ring indicators of German summer drought over the last millennium // Quaternary Science Reviews. Vol. 29. P. 1005-1016.

Charman D.J., Hendon D. 2000. Long-term changes in soil water tables over the past 4500 years: relationships with climate and North Atlantic atmospheric circulation and sea surface temperature // Climatic Change. Vol. 47. P. 45-59.

Cheddadi R., Yu G., Guiot J., Harrison S.P., Prentice I.C. 1997. The climate of Europe 6000 years ago // Climate Dynamics. Vol. 13. P. 1-9.

Christiansen B., Ljungqvist F.C. 2017. Challenges and perspectives for large-scale temperature reconstructions of the past two millennia // Reviews of Geophysics. Vol. 55. No. 1. P. 40-96.

Coope G.R., Lemdahl G., Lowe J.J., Walkling A. 1998. Temperature gradients in northern Europe during the last glacial-Holocene transition (14-9 ^{14}C kyr BP) interpreted from coleopteran assemblages // Journal of Quaternary Science. Vol. 13. No. 5. P. 419-433.

Daley T.J., Thomas E.R., Holmes K., Street-Perrott F.A., Chapman M.R., Tindall J.C., Valdes P.J., Loader NJ., Marshall J.D., Wolff E.W., Hopley P.J., Atkinson T., Barber K.E., Fisher EH., Robertson I., Hughes P.D.M., Roberts C.N.. 2011. The 8200yr BP cold event in stable isotope records from the North Atlantic region // Global and Planetary Change. Vol. 79. P. 288-302.

Davis B.A.S., Brewer S., Stevenson A.C., Guiot J. 2003. The temperature of Europe during the

Holocene reconstructed from pollen data // Quaternary Science Reviews. Vol. 22. P. 1701-1716.

De Klerk P. 2008. Patterns in vegetation and sedimentation during the Weichselian Late-glacial in north-eastern Germany // Journal of Biogeography. Vol. 35. P. 1308-1322.

Dynamics of Landscape Components and Inland Sea Basins of Northern Eurasia over the Past 130,000 Years (General Paleogeography). Atlas-monograph. 2002. Moscow: GEOS. 232 p. [in Russian; Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 130000 лет (общая палеогеография). Атлас-монография. 2002. М.: ГЕОС. 232 с.].

European Pollen Database. 2007 [Available at http://www.europeanpollendatabase.net (дата обращения03.06.2020)].

Feurdean A., Vannière B., Finsinger W. et al. 2020. Fire hazard modulation by long-term dynamics in land cover and dominant forest type in eastern and central Europe // Biogeosciences. Vol. 17. P. 1213-1230.

Firbas F. 1949. Spät- und nacheiszeitliche Waldgeschichte Mitteleuropas nördlich der Alpen. Bd. 1. Jena: Fischer. 326 p.

Gałka M., Miotk-Szpiganowicz G., Goslar T., Jęśko M., van der Knaap W.O., Lamentowicz M. 2013. Palaeohydrology, fires and vegetation succession in the southern Baltic during the last 7500 years reconstructed from a raised bog based on multi-proxy data // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol. 370. P. 209-221.

Giesecke T., Bennett K.D., Birks H.J.B., Bjune A.E., Bozilova E., Feurdean A., Finsinger W., Froyd C., Pokorny P., Rosch M., Seppa H., Tonkov S., Valsecchi V., Wolters S. 2011. The pace of Holocene vegetation change e testing for synchronous developments // Quaternary Science Reviews. Vol. 30. P. 2805-2814.

Goosse H., Renssen H., Timmermann A., Bradley R.S. 2005. Internal and forced climate variability during the last millennium: a model-data comparison using ensemble simulations // Quaternary Science Reviews. Vol. 24. Pp. 1345-1360.

Gouw-Bouman M.T.I.J., van Asch N., Engels S., Hoek W.Z. 2019. Late Holocene ecological shifts and chironomid-inferred summer temperature changes reconstructed from Lake Uddelermeer, the Netherlands // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol. 535. P. 109366.

Guiot J., Harrison S.P., Prentice C. 1993. Reconstruction of Holocene precipitation in Europe using pollen and lake level data // Quaternary Research. Vol. 49. P. 139-149.

Harmata K. 1987. Late-glacial and Holocene history of vegetation at Roztoki and Tarnowiec near Jasło (Jasło-Sanok Depression) // Acta Palaeobotanica. Vol. 27. No. 1. P. 43-65.

Harrison S.P., Digerfeld G. 1993. European lakes as palaeoclimatic indicators // Quaternary Science Reviews. Vol. 12. P. 233-248.

Head M.J. 2019. Formal subdivision of the Quaternary System/Period: Present status and future directions // Quaternary International. Vol. 500. P. 32-51.

Heikkilä M., Fontana S., Seppä H. 2009. Rapid Lateglacial tree population dynamics and ecosystem changes in the eastern Baltic region // Journal of Quaternary Science. Vol. 24. P. 802-815.

Heikkilä M., Seppä H., 2003. A 11,000 yr palaeotemperature reconstruction from southern boreal zone in Finland // Quaternary Science Reviews. Vol. 22. P. 541-554.

Heikkilä M., Seppä H. 2010. Holocene climate dynamics in Latvia, eastern Baltic region: a pollen-based summer temperature reconstruction and regional comparison // Boreas. Vol. 39. P. 705-719.

Helama S., Jones P.D., Briffa K.R. 2017. Dark Ages Cold Period: A literature review and directions for future research // The Holocene. Vol. 27. P. 1600-1606.

IPCC. 2013. Climate change 2013. The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press. 1535 p.

Jahns S. 2000. Late-glacial and Holocene woodland dynamics and land-use history of the Lower Oder valley, north-eastern Germany, based on two, AMS ^{14}C-dated, pollen profiles //

Vegetation History and Archaeobotany. Vol. 9. P. 111-123.

Jahns S. 2007. Palynological investigations into the Late Pleistocene and Holocene history of vegetation and settlement at the Löddigsee, Mecklenburg, Germany // Vegetation History Archaeobotany. Vol. 16. P. 157-169.

Johnsen S., Clausen H., Dansgaard W., Fuhrer K., Gundestrup N., Hammer C., Iversen P., Jouzel J., Stauffer B., Steffensen J. 1992. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core // Nature. Vol. 359. P. 311-313.

Kalis A.J., Merkt J., Wunderlich J. 2003. Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe - human impact and natural causes // Quaternary Science Reviews. Vol. 22. P. 33-79.

Keigwin L.D., Boyle E.A. 2000. Detecting Holocene changes in thermohaline circulation // Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 4. P. 1343-1346.

Khotinski N.A., Klimanov V.A. 1997. Allerod, Younger Dryas and Early Holocene Palaeo-Environmental Stratigraphy // Quaternary International. Vol. 41/42. P. 67-70.

Korhola A., Weckström J., Holmström L., Erästö P. 2000. A quantitative Holocene climatic record from diatoms in northern Fennoscandia // Quaternary Research. Vol. 54. P. 284-294.

Krementski K.V., Borisova O.K., Zelikson E.M. 2000. The Late Glacial and Holocene history of vegetation in the Moscow region // Paleontological Journal. Vol. 34. No. 1. P. 67-74.

Kulesza P., Suchora M., Irena A., Pidek I.A., Dobrowolski R., Alexandrowicz W.P. 2012. The Holocene palaeoenvironmental changes reflected in the multi-proxy studies of Lake Słone sediments (SE Poland) // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol. 363. P. 79-98.

Lamentowicz M., Obremska M., Mitchell E.A.D. 2008. Autogenic succession, land-use change, and climatic influences on the Holocene development of a kettle-hole mire in Northern Poland // Review of Palaeobotany and Palynology. Vol. 151. P. 21-40.

Latalowa M., Nalepka D. 1987. A study of the Late-Glacial and Holocene vegetational history of the Wolbrom area (Silesian-Cracovian Upland − S. Poland) // Acta Palaeobotanica. Vol. 27. No. 1. P. 75-115.

Litt T., Brauer A., Goslar T., Merkt J., Bałaga K., Müller H., Ralska-Jasiewiczowa M., Stebich M., Negendank J.F.W. 2001. Correlation and synchronisation of Lateglacial continental sequences in northern central Europe based on annually laminated lacustrine sediments // Quaternary Science Reviews. Vol. 20. P. 1233-1249.

Lotter A.F., Eicher U., Birks, H.J.B., Siegenthaler U. 1992. Late Glacial climatic oscillations as recorded in Swiss lake sediments // Journal of Quaternary Science. Vol. 7. P. 187-204.

Lücke A., Schleser G. H., Zolitschka B., Negendank J.F.W. 2003. A Lateglacial and Holocene organic carbon isotope record of lacustrine palaeoproductivity and climatic change derived from varved lake sediments of Lake Holzmaar, Germany // Quaternary Science Reviews. Vol. 22. P. 569-580.

Magny M. 2004. Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations andits probable impact on prehistoric human settlements // Quaternary International. Vol. 113. P. 65-79.

Mann M.E., Zhang Z., Rutherford S., Bradley R.S., Hughes M.K., Shindell D., Ammann C., Faluvegi G., Ni F. 2009. Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly // Science. Vol. 326. P. 1256-1260.

Mauri A., Davis B.A.S., Collins P.M., Kaplan J.O. 2015. The climate of Europe during the Holocene: a gridded pollen-based reconstruction and its multi-proxy evaluation // Quaternary Science Reviews. Vol. 112. P. 109-127.

Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager J.C. et al. 2004. Holocene climate variability // Quaternary Research. Vol. 62. P. 243-255.

Miagkaia A., Ershova E. 2020. A 10 000-year pollen and plant macrofossil record from the Losiny

Ostrov National Park (Moscow, Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 438. P. 012018 (1-9).

Niinemets E., Saarse L. 2009. Holocene vegetation and land-use dynamics of south-eastern Estonia // Quaternary International. Vol. 207. P. 104-116.

Nosova M.B., Novenko E.Yu., Severova E.E., Volkova O.A. 2019. Vegetation and climate changes within and around the Polistovo-Lovatskaya mire system (Pskov Oblast, North-Western Russia) during the past 10,500 years // Vegetation History and Archaeobotany. Vol. 28. P. 123-140.

Novenko E., Tsyganov A., Volkova E., Kupriyanov D.A., Mironenko I.V., Babeshko K.V., Utkina A.S., Popov V., Mazei Y.A. 2016. Mid- and Late Holocene vegetation dynamics and fire history in the boreal forest of European Russia: A case study from Meshchera Lowlands // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol. 459. P. 570-584.

Novenko E.Y., Tsyganov A.N., Olchev A.V. 2018. Palaeoecological data as a tool to predict possible future vegetation changes in the boreal forest zone of European Russia: a case study from the Central Forest Biosphere Reserve // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 107. P. 012104 (1-6).

Novenko E.Yu., Olchev A.V. 2015. Early Holocene vegetation and climate dynamics in the central part of the East European Plain (Russia) // Quaternary International. Vol. 388. P. 12-22.

Novenko E.Yu., Tsyganov A.N., Babeshko K.V., Payne R.J., Li J., Mazei Y.A., Olchev A.V. 2019. Climatic moisture conditions in the north-west of the Mid-Russian Upland during the Holocene // Geography, Environment, Sustainability. Vol. 12. P. 188-202.

Novenko E., Tsyganov A., Volkova E., Mazei N.G., Volkova E.M., Chernyshov V.A., Kupriyanov D.A., Mazei Y.A. 2015. The Holocene palaeoenvironmental history of Central European Russia reconstructed from pollen, plant macrofossil and testate amoeba analyses of the Klukva peatland, Tula region // Quaternary Research. Vol. 83. P. 459-468.

Olchev A.V., Getmanova E.R., Novenko E.Y. 2020. A modeling approach for reconstruction of annual land surface evapotranspiration using palaeoecological data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 438. P. 012021.

PAGES 2k Consortium. 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia // Nature Geoscience. Vol. 6. P. 339-346.

PAGES 2k Consortium. 2017. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era // Scientific Data. Vol. 4 (170088). P. 1-33.

Panin A., Matlakhova E. 2015. Fluvial chronology in the East European plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications // Catena. Vol. 130. P. 46-61.

Perşoiu A., Ionita M., Weiss H. 2019. Atmospheric blocking induced by the strengthened Siberian High led to drying in west Asia during the 4.2 ka BP event – a hypothesis // Climate in the Past. Vol. 15. P. 781-793.

Pleskot K., Apolinarska K., Kołaczek P., Suchora M., Fojutowski M., Joniak T., Kotrys B., Kramkowski M., Słowiński M., Woźniak M., Lamentowicz M. 2020. Searching for the 4.2 ka climate event at Lake Spore, Poland // CATENA. Vol. 191. P. 104565. (1-14).

Ralska-Jasiewiczowa M. 1989. Environmental changes recorded in lakes and mires of Poland during the last 13,000 years // Acta Palaeobotanica. Vol. 29. P. 1-120.

Ralska-Jasiewiczowa M., Nalepka D., Goslar T. 2003. Some problems of forest transformation at the transition to the oligocratic/Homo sapiens phase of the Holocene interglacial in northern lowlands of central Europe // Vegetation History and Archaeobotany. Vol. 12. P. 233-247.

Roland T.P., Caseldine C.J., Charman D.J., Turney C.S.M., Amesbury M.J. 2014. Was there a '4.2 ka event' in Great Britain and Ireland? Evidence from the peatland record // Quaternary Science Reviews. Vol. 83. P. 11-27.

Seppä H., Poska A. 2004. Holocene annual mean temperature changes in Estonia and their relationship to solar insolation and atmospheric circulation patterns // Quaternary Research.

Vol. 61. Pp. 22-31.

Solomina O., Haeberli W., Kull C., Wiles G. 2008. Historical and Holocene glacier–climate variations: General concepts and overview // Global and Planetary Change. Vol. 60. P. 1-9.

Starkel L., Michczyńska D.J., Krąpiec M., Margielewski W., Nalepka D., Pazdur A. 22013. Progress in the Holocene chrono-climatostratigraphy of Polish territory // Geochronometria. Vol. 40. No. 1. P. 1-21.

Tarasov P.E., Guiot J., Cheddadi R., Andreev A.A., Bezusko L.G., Blyakharchuk T.A., Dorofeyuk N.I., Filimonova L.V., Volkova V.S., Zernitskaya V.P. 1999. Climate in northern Eurasia 6000 years ago reconstructed from pollen data // Earth and Planetary Science Letters. Vol. 171. P. 635-645.

Tarasov P.E., Savelieva L.A., Long T., Leipe C. 2019. Postglacial vegetation and climate history and traces of early human impact and agriculture in the present-day cool mixed forest zone of European Russia // Quaternary International. Vol. 516. P. 21-41.

Teller J.T., Leverington D.W., Mann J.D. 2002. Freshwater outbursts to the oceans from glacial Lake Agassiz and their role in climate change during the last deglaciation // Quaternary Science Reviews. Vol. 21. P. 879-887.

Thomas E.R., Wolff E.W., Mulvaney R., Steffensen J.P., Johnsen S.J., Arrowsmith C., White J.W.C., Vaughn B.H., Popp T. 2007. The 8.2 ka event from Greenland ice cores // Quaternary Science Reviews. Vol. 26. P. 70-81.

Van Geel B. 1978: A palaeoecological study of Holocene peat bog sections in Germany and the Netherlands, based on the analyses of pollen, spores and macro- and microscopic remains of fungi, algae, cormophytes and animals // Review of Palaeobotany and Palynology. Vol. 25. P. 1-120.

Vinther B.M., Clausen H.B., Johnsen S.J., Rasmussen S.O., Andersen K.K., Buchardt S.L., Dahl-Jensen D., Seierstad I.K., Siggaard-Andersen M.-L., Steffensen J. P., Svensson A., Olsen J., Heinemeier J. 2006. A synchronized dating of three Greenland ice cores throughout the Holocene // Journal of Geophysical Research. Vol. 111. P. X1-X9.

Walker M., Head M.J., Berkelhammer M., Svante B., Cheng H., Cwynar L.C., Fisher D., Gkinis V., Long A., Newnham R., Rasmussen S.O., Weiss H. 2019. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalisation of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes // Journal of Quaternary Science. Vol. 34. P. 173-186.

Wanner H., Beer J., Butikofer J., T. J. Crowley, U. Cubasch, J. Flückiger, H. Goosse, M. Grosjean, F. Joos, J.O. Kaplan, M. Küttel, S.A. Müller, I.C. Prentice, O. Solomina, T.F. Stocker, P. Tarasov, M. Wagner, M. Widmann. 2008. Mid- to Late Holocene climate change: an overview // Quaternary Science Reviews. Vol. 27. P. 1791-1828.

Wohlfarth B., Lacourse T., Bennike O., Subetto D., Tarasov P., Demidov I., Filimonova L., Sapelko T. 2007. Climatic and environmental changes in north-western Russia between 15,000 and 8000 cal yr BP: a review // Quaternary Science Reviews. Vol. 26. P. 1871-1883.

Wu H., Guiot J., Brewer S., Guo Z. 2007. Climatic changes in Eurasia and Africa at the last glacial maximum and mid-Holocene: reconstruction from pollen data using inverse vegetation modeling // Climate Dynamics. Vol. 29. P. 211-229.

Zagwijn W.H. 1994. Reconstruction of climate change during the Holocene in western and central Europe based on pollen records of indicator species // Vegetation History and Archaeobotany. Vol. 3. P. 65-88.

Zernitskaya V., Mikhailov N. 2009. Evidence of early farming in the Holocene pollen spectra of Belarus // Quaternary International. Vol. 203. P. 91-104.

ECOSYSTEMS: ECOLOGY AND DYNAMICS, 2020, Vol. 4, No. 4, P. 81-104

DYNAMICS OF ECOSYSTEMS AND THEIR COMPONENTS

UDC 911.2

DYNAMICS OF LANDSCAPES AND CLIMATE IN CENTRAL AND EASTERN EUROPE IN THE HOLOCENE: PALEOGRAPHIC ASPECTS FOR PROGNOSIS OF POSSIBLE ENVIRONMENTAL CHANGES[1]

© 2020. E.Yu. Novenko

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography
Russia, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1. E-mail: lenanov@mail.ru
Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119017, Moscow, Staromonetny Per., 29

Received October 10, 2020. After revision November 10, 2020. Accepted December 01, 2020.

The paper presents a review of modern studies of the Holocene landscape and climatic changes. A large amount of paleobotanical data and paleoclimatic reconstructions for the forest zone of Central and Eastern Europe in a frame of latitudinal transect between N52° and N58° were summarized, and compared with the published materials of paleoecological and paleographical researches for the same regions. The author analyzed the expected climatic changes according to the scenarios of representative paths of greenhouse gases concentration, which were compiled by the Intergovernmental Panel on Climate Change. The obtained data allowed us to determine 3 main stages of the Holocene paleoenvironmental changes. 1) Fast warming in the early Holocene (11.7-8.0 ka BP), which included series of climate oscillations. During this period the broadleaf forests replaced the birch and pine-birch ones that were spread in the periglacial formations in the early Holocene. Expansion of broadleaf species in Eastern Europe occured 2 thousand years later than in Central Europe. 2) The Holocene Thermal Maximum (8.0-5.7 ka BP) without any abrupt and short-term climatic changes. During this period a continuous zone of broadleaf forests occupied Central and Eastern Europe. 3) Progressive cooling of the second half of the Holocene (5.7 ka BP − present) with quasiharmonic temperature and precipitation fluctuations. Regional differentiation of landscape cover became more prominent. Beech and hornbeam started to expanse into the eastern regions, while spruce spread through the western ones. The Holocene climatic reconstruction throughout the latitudinal transect in Central and Eastern Europe could be used as the different scenarios of possible climatic changes in the current century, the author can expect that temperatures growth, especially during summer, will eventually lead to climate aridization as a result of changes in precipitations/evaporation ratio, and will probably become there as of of increasing wildfires and weather extremes due to the uneven precipitation.

Keywords: Holocene, paleoclimatic reconstructions, ecosystems dynamic, paleoclimatic data, paleogeography, Central Europe, European Russia.
DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10075

For a long time the assessment of reaction of landscape components to the global climatic changes has been one of the most important and fundamental scientific issues in need of comprehensive study. Considering that current tendencies of climate change are primarily shown in the fast air temperature growth (IPCC, 2013), a retrospective analysis of landscape and climate conditions of Central and Eastern Europe during the Holocene can be a very useful and efficient for the adequate understanding of modern processes of environmental transformation under the influence of global warming, as well as for determination of its main evolutional trends (Velichko, 2012; Bradley, 2008). It is especially interesting to analyze the abrupt and short-term climate

[1] This study was funded by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-15-50126.

fluctuations when instability of climate system was more prominent.

First generalization of palynological data on the postglacial stage of nature evolution in Europe, north to the Alps was performed by F. Firbas (1949), M.I. Neyshtadt (1957) and V.P. Grichuk (1969, 1982). A significant input to the studies of flora and vegetation in the Late Glacial and Holocene periods was made by N.A. Khotinski (1977). The articles on climatic conditions of the Holocene on the global and macro-regional scale were written by A.A. Velichko et al. (a series of atlases-monographs "Dynamics of Landscape Complexes ..." (2002), "Paleoclimate and Paleolandscapes ..." (2009), "Climates and Landscapes of North Eurasia ..." (2010), by O.N. Solomina (2010), O.K. Borisova (2014) and some foreign researchers (Davis et al., 2003; Mayewski et al., 2004; Wanner et al., 2008; Mann et al., 2009; Mauri et al., 2015; Christiansen, Ljungqvist, 2017; PAGES 2k Consortium, 2013, 2017). A vast amount of works, the most significant of which the author will address below, was written on the subject of vegetation and climate reconstruction in the Holocene at the regional scale, where reconstruction was based on palynological data of the soil profiles of alluvial, lake and bog sediments in Central and West Europe.

In this article the author generalizes paleographic data for the Holocene of Central and West Europe, for the territory in the belt of latitudinal transect in forest area, between N52° and N58°. The diversity of physiographical conditions and provincial differences of the modern vegetation along the studied latitudinal profile allow us to analyze the geographical patterns and regional features of the way that vegetation of Central and West Europe reacts to climatic changes nowadays, as well as in the last eras. The Holocene landscapes and climate dynamics revealed from paleobotanical data and paleoclimatic reconstructions obtained by different methods, were compared to the materials of testate ameobae, geomorphological, isotope-geochemical and other proxy that were published for the same territory.

The age of the lower Holocene boundary was 11.7 ka BP, determined by the changes of isotope-oxygen ice composition in the NGRIP borehole in Greenland (Walker et al., 2019; Head, 2019). To study vegetation and climate dynamics of the Holocene, the Russian researchers usually use the Blytt-Sernander periodization scheme, which was originally created for North Europe and later modified by N.A. Khotinski (1977) for European part of Russia. The foreign regional modifications of the scheme were widely used until the 1990s and have almost fallen out of use today, so now researchers usually use the terms of absolute age to reconstruct a sequence of Holocene events. According to the Blytt-Sernander classification, the Holocene consists of 5 climate periods: Preboreal (11.7-10.5 ka BP), Boreal (10.5-8.8 ka BP), Atlantic (8.8-5.3 ka BP), Subboreal (5.3-2.6 ka BP) and Subatlantic (2.6 ka BP – present). On the basis of the studied ice cores and speleothems, the International Commission on Stratigraphy divides the Holocene into 3 periods: Greenlandian − 11700-8236 ka BP to 2000 CE, Northgrippian (mid) − 8236-4250 ka BP to 2000 CE, and Meghalayan (late) − 4250 ka BP to present (Head, 2019; Walker et al., 2019). However, the boundaries of sub-eras, especially between the Mid- and Late Holocene, were a subject of serious discussions between the scientists. In this article to analyze a sequence of the Holocene events, the author mostly uses the data of absolute date determination in comparison to the accepted periodization methods, which are considered to be chronological sub-divisions rather than climatic and stratigraphic.

11.7-8.0 ka BP (Early Holocene, Preboreal, Boreal and Early Atlantic Periods)

There are not many landscape-climate reconstructions for the Preboreal period of the Holocene. This period is mostly considered to be a unified span of birch and pine-birch forests development. Despite the very close composition of pollen spectrums, the vegetation along the studied latitudinal transect shows the signs of sectorial differentiation. In the Early Holocene the forest communities of its western area included elm, while in the later phase it also included oak, alder and hazel (Fig. 1; Litt

et al., 2001; de Klerk, 2008). The Latvian profiles showed the particles of hazel and elm pollen in the spectrum from 11.0 ka BP, while alder and oak became a constant component of spore-pollen spectrums from 10.1 ka BP (Heikkilä et al., 2009). Meanwhile, in the western areas vegetation composition kept the fractions of periglacial flora (Khotinski, 1977). Single pollen grains of deciduous species appeared in the spectrums of the East European Plain profiles only after 9.7 ka BP (Fig. 2).

Glaciological, palynological and isotope-geochemical studies of the profiles on the continental and marine sediments in North Europe, which were carried out with a high temporal resolution (Bjorck et al., 1996), and changes of isotope-oxygen composition of the Greenland ice cores (Thomas et al., 2007), show that the Preboreal period had some phases of temperature drop (Fig. 3). The first drop was named a "Preboreal oscillation" and reconstructed for the period of 11.3-11.15 ka BP. The second one, a so-called "10.2 ka BP event", happened right between the Preboreal and Boreal periods. According to the changes of K^+ composition in the GISP2 ice core in Greenland (Mayewski et al., 2004), acting as an indicator of the Siberian High intensity, and Na^+, reflecting the depth of the Icelandic Low development, the westerlies weakened during this period, while the Siberian High increased (Fig. 3).

Short-term landscape-climatic changes during the Preboreal period were registered after detailed studies of some profiles on lake sediments in Netherlands (Bos et al., 2007) and Switzerland (Lotter et al., 1992). Paleo-environmental changes in the northwest of the East European Plain connected by Preboreal oscillation were found in the profiles of Medvedevskoye and Pastorskoye Lakes in Karelia (Subbeto et al., 2003). In the eastern part of the studied area on the Polovetsko-Kupanskoye bog profile, the Preboreal consists of 2 phases: temperature rise or a "Polovtsian warming" on its early stage, and temperature drop in its second half, also called a "Pereslavsky cooling" according to N.A. Khotinski (1977).

Boreal sediments of the Holocene were found in numerous soil profiles in Central and Eastern Europe. The palynological data showed that at 10.5-8.8 ka BP the birch-pine and oak-pine forests with elm and hazel undergrowth were widespread in the territory of modern Germany, Poland and the Baltic states (Fig. 1; Jahns, 2000, 2007; Bos, Urz, 2003; Heikillä, Seppä, 2004; Seppä, Poska, 2004; Lamentowicz et al., 2008; Gałka et al., 2013). Researches of T. Giesecke et al. (2011) was based on large factual materials and showed that culmination of hazel pollen fraction in the Early Holocene was almost same both for Western and Central Europe at 10.5-8.0 ka BP. In the east the increase of deciduous species pollen was slightly delayed. For example, in the profiles of Mezhuzhol and Staroye Lakes in Belarus, the sum of pollen of broadleaf species at 10.5-10.0 ka BP did not exceed 5%, and grew up to 20% at 9.5 ka BP (Zernitskaya, Novenko, 2016; Zernitskaya et al., 2019).

According to the results obtained after some profiles study in the central regions of the East European Plain, its vast territories were covered with sparse pine-birch forests (Khotinski, 1977; Velichko et al., 2001; Khotinski, Kilmanov, 1997; Krementsky et al., 2000; Wohlfarth et al., 2007). In the south, on the Central Russian Upland, the pine-birch forests with some deciduous species were widespread (Fig. 2; Kilmanov, Serebryanaya, 1986; Novenko et al., 2015).

Climate reconstructions of Central Europe showed that during the Boreal the average air temperature in January did not exceed -2°C, and the average June temperature was never lower than 15°C (Zagwijn, 1994). According to those reconstructions that were based on the ratio of beetle species, the summer temperatures of Northern Europe were about 17-19°C, and even higher in Central Europe (Coope, 1998).

Reconstructions based on the palynological data taken from Mezhuzhol Lake profile in Northern Belarus (Zernitskaya, Novenko, 2016) showed that the average annual, winter and summer air temperatures were 4°, -8° and 16°C respectively at 10.5-9.5 ka BP, which was 2°C lower than nowadays; at 9.5-8.5 ka BP the winter and annual temperatures grew significantly and were about -6.5° and 6.0°C, while the summer temperatures were close to the current ones, about 18°C.

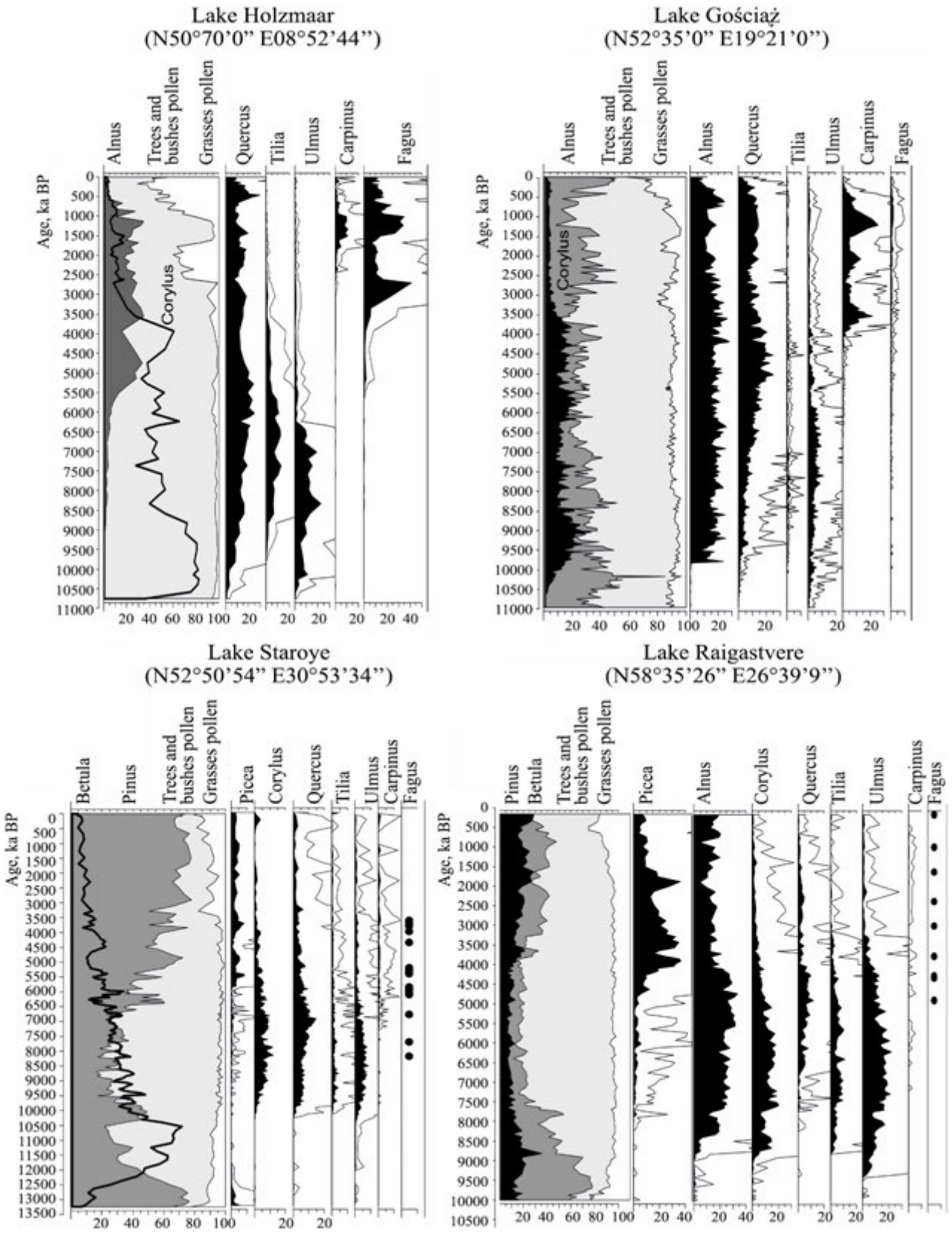


Fig. 1. Changes in pollen content of the main forest-forming tree species in the diagrams for the lake sediments from the Central and Eastern Europe profiles. The short diagrams were made on the basis of the "European Pollen Database" (2007).

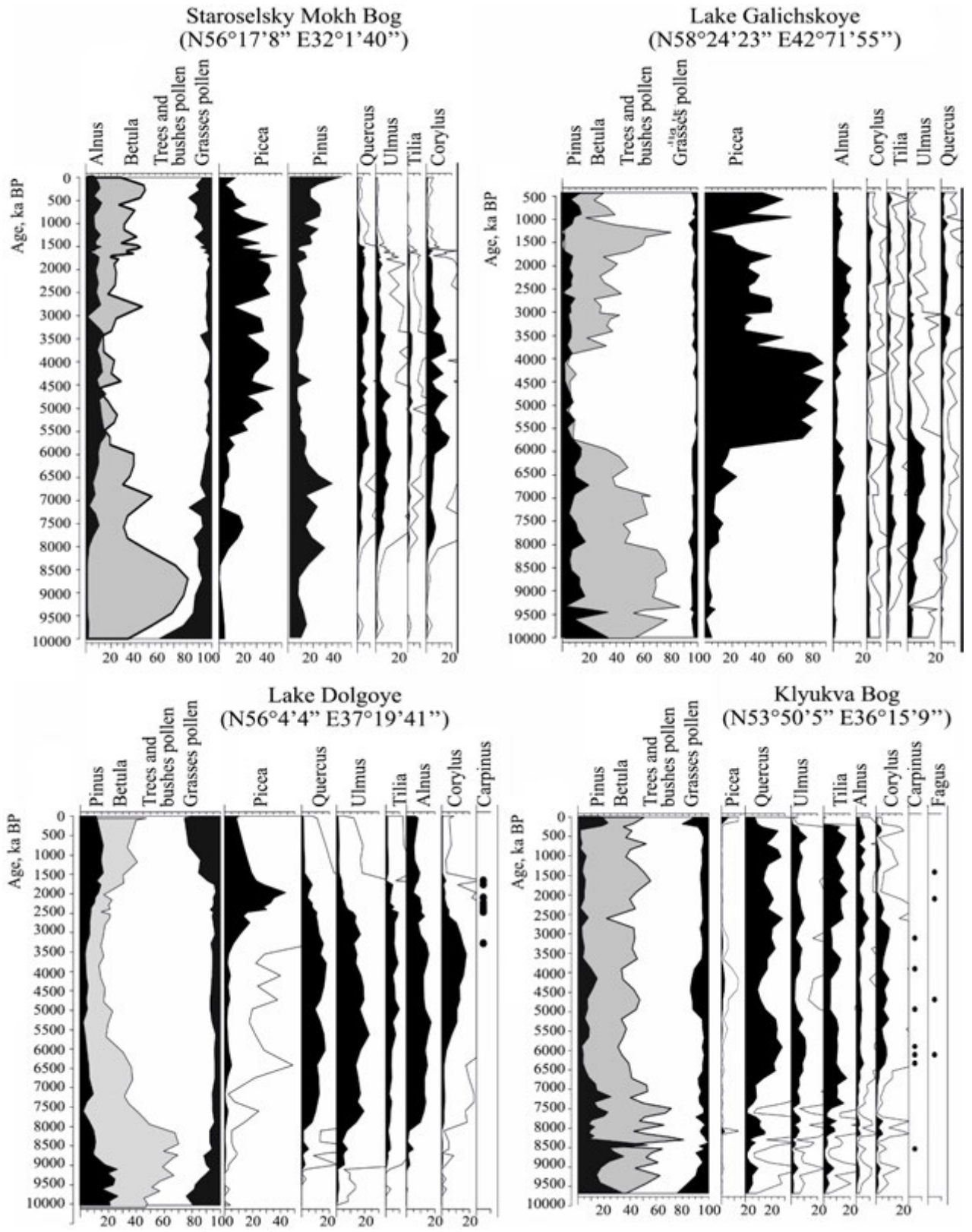


Fig. 2. Changes in pollen content of the main forest-forming tree species in the diagrams for the East European Plain profiles, recorded on the basis of O.K. Borisova, K.V. Kremenetsky and E.M. Zelikson researches on Dolgoye Lake and with the help of "European Pollen Database" (2007), other profiles were made on the basis of the author's records.

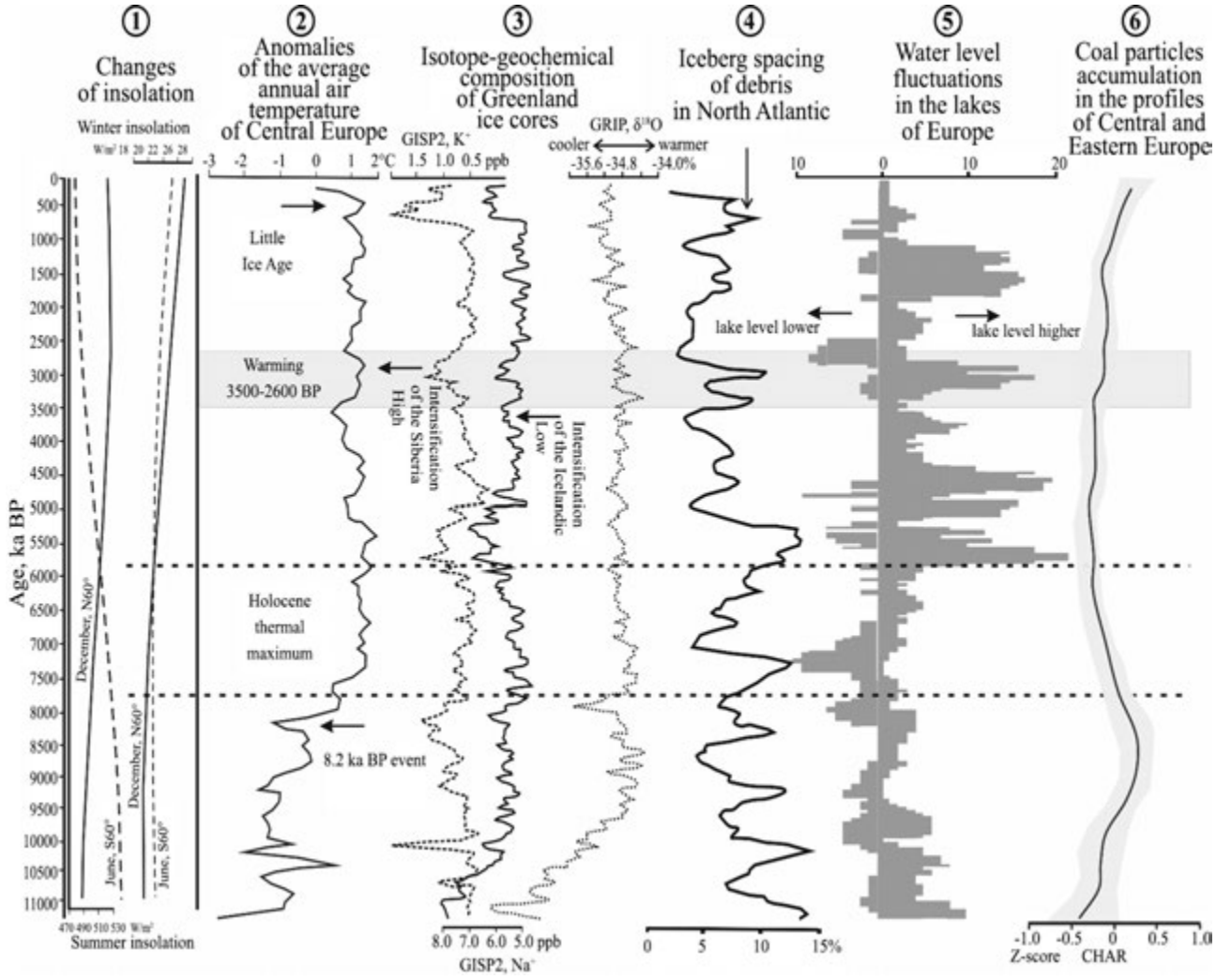


Fig. 3. The main landscape and climatic changes in Europe during the Holocene. *Legend:* 1 – winter and summer insolation values at 60°N and 60°S latitude (Berger, Loutre, 1991); 2 – reconstruction of the mean annual temperature in Europe during the Holocene, expressed as deviations from current values (Davis et al., 2003); 3 – change of the isotope-geochemical composition of ice cores GRIP and GISP2 in Greenland: the content of the cation K^+ and cation Na^+ GISP2 ice core (Mayewski et al., 2004), changes in $\delta^{18}O$ in ice core GRIP (Johnsen et al., 1992); 4 – change in the intensity of ice-rafted debris in the North Atlantic, expressed as a percentage of petrological markers (Bond et al., 1993); 5 – fluctuations in the level of lakes in France and Switzerland, the number of radiocarbon dates of higher and lower lake-level events in successive 50 years intervals (Magny, 2004); 6 – changes in micro- and macro-charcoal accumulation rates (CHAR) in lake and peat deposits in Central and Eastern Europe expressed as Z-score of CHAR (Feurdean et al., 2020).

Fast warming and relatively warm climate conditions in the Boreal period were also determined for the coastal territory of the Baltic Sea. For example, Latvian summer temperatures at 10.0 ka BP were about 17°C (i.e. 1°C lower than modern indices), but they increased by 1.5°C at 9.0 ka BP (Heikkilä, Seppä, 2010). All temperature indices were lower than the modern ones in the central regions of the East European Plain at 10.1-7.9 ka BP (Khotinski, Kilmanov, 1997; Novenko, Olchev, 2015).

Reconstructions of paleo-temperatures obtained from various natural archives, make it possible to find a short-term and abrupt climate cold snap, or the so-called "8.2 ka BP event" (Borzenkova et

al., 2017; Alley et al., 1997; Thomas et al., 2007; Daley et al., 2011). According to our results, the average annual temperature in the Upper Volga basin in 8.1-8.5 ka BP dropped by 2-3°C (Novenko, Olchev, 2015). Reconstructions based on the palynological data from the profiles of Estonia (Seppä, Poska, 2004), Finland (Heikkilä, Seppä, 2003) and Southern Sweden (Antonsson, Seppä, 2007), showed that the average annual temperatures decreased by 1.5-2.0°C during the "8.2 ka BP event". Reconstructions made on the basis of diatom analysis data showed that the summer temperatures dropped by 0.75-1.0°C in the north of Finland (Korhola et al., 2000). B.A.S. Davis et al. (2003) generalized a large number of pollen diagrams and climate reconstructions and reconstructed a decrease by 1°C in the average annual temperature for Europe at 8.2 ka BP (Fig. 1). The reason for this significant temperature drop, which was reconstructed in Europe at 8.4-8.0 ka BP, as well as for the previous Preboreal cold snaps that we already studied, was a weakening of thermohaline circulation in the North Atlantic region (Teller et al., 2002). During a cold snap at 8.2 ka BP these changes could be the result of a release of large fresh water masses into the ocean from the large periglacial Agassiz Lake in North America (Borzenkova et al., 2017; Keigwin, Boyle, 2000).

Reconstructions of the annual sum of precipitation and quantitative characteristics of climate humidity are a difficult task, and their results for the Early Holocene in Europe can be found only in a small amount of works (Barber et al., 2004; Harrison et al., 1996; Allen et al., 2007). Since the studies of A. Blitt at the end of the XIX century, a common opinion stated that the Boreal climate of the Holocene was dry, which was later noted in many other studies and then made it to climatic stratigraphic schemes of the Holocene (Khotinski, 1977).

Climate humidity data for the East European Plain proved that temporal and spatial dynamics of precipitation amount are complicated. According to our studies, the average annual amount at 9.5 ka BP was lower than the modern values of the Upper Volga basin and in Valday Upland, and higher in the northwest of the Central Russian Upland (Fig. 4). An almost simultaneous increase of precipitation in the entire territory of the central regions of European Russia was reconstructed for the period of 9.1-8.5 ka BP, when precipitation was 100-200 mm higher than nowadays (Novenko, Olchev, 2015).

Reconstructions of the wildfires changes in the Holocene showed an increased frequency of fires in different regions during the Boreal period (Zernitskaya et al., 2019; Novenko et al., 2016), which may indicate that summer precipitation was uneven and fire hazardous meteorological conditions were recurrent. Once the data on concentration of micro and macro coal particles in the lake and bog sediments from 117 profiles of Central and Eastern Europe was generalized (Feurdean et al., 2020), we determined the maximal accumulation speed of these particles in the Holocene, between 9.0 and 8.0 ka BP for the entire macro-region (Fig. 3). This indicated that wildfires were frequent and severe.

Data on lakes level fluctuations can be an indirect source of information on climate humidity. The studies of some lakes in Switzerland and the French Alps (Magny, 2010) resulted in a complex humidity dynamics in the Early Holocene and were based on 180 radiocarbon, dendro-chronological, and archaeological dating. The phases of increased water level in the lakes were revealed for the periods of 10.3-10.0 and 9.55-9.15 ka BP, between which the level was significantly lower than nowadays. The studies that took place in southern Sweden (Harrison, Digerfeldt, 1993) showed an extremely low water level in the lakes at approximately 10.5-9.7 ka BP, however, then it changed into a quick level rise.

8.0-5.7 ka BP (Mid-Holocene, Mid- and Late Atlantic Period)

Many works on the subject of vegetation and climatic changes in the Holocene showed that Europe was at its highest heat availability (Khotinski, 1977; Dynamics of Landscape Components ..., 2002; Paleoclimate and Paleolandscapes ..., 2009; Zagwijn, 1994; Davis et al., 2003; Mauri et al., 2015; Borisova, 2019) and relatively stable climate conditions (Borisova, 2014;

Mayewski et al., 2004) at 8.0-5.7 ka BP. In the Russian literary works this period is called the Holocene climatic optimum (Khotinski, 1977). In the foreign works it is usually called the Mid-Holocene thermal maximum.

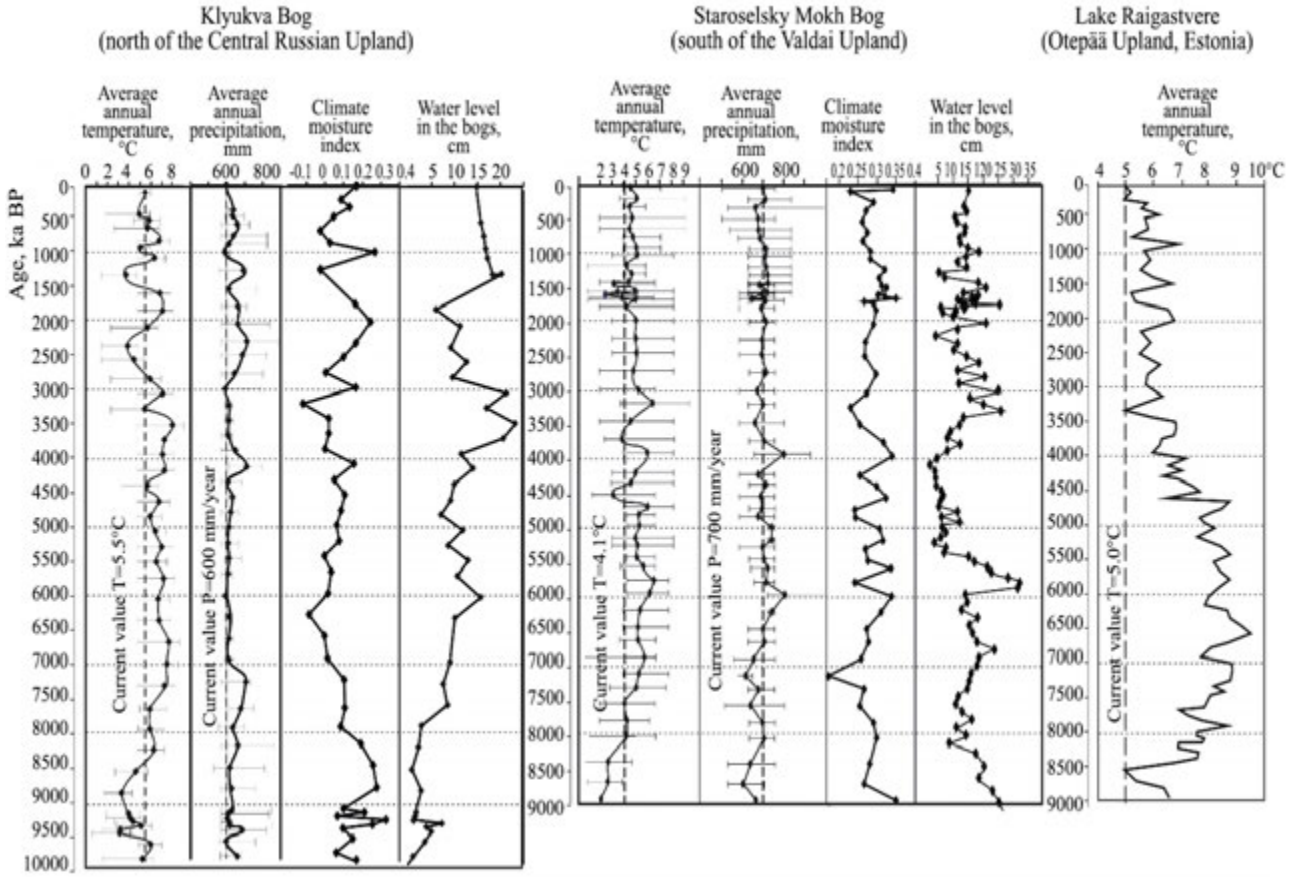


Fig. 4. Climatic changes in the East European Plain during the Holocene. Paleoclimatic reconstructions by data from the Klukva bog (Novenko et al., 2019), Staroselsky Mokh bog (Novenko et al., 2018) and Lake Raigastvere (Seppä, Poska, 2004).

At 8.0-5.7 ka BP Central and Eastern Europe had a unified zone of deciduous forests (Fig. 1, 2). Oak, linden, elm and alder forests with sparse yew and holly were growing in the northeastern Atlantic part of Europe. Oak forests were extremely developed in Germany, Southern Sweden, Denmark and Poland, supplanting pine formations (Latalowa, Nalepka, 1987; Jahns, 2000, 2007; Kalis et al., 2003; Lamentowicz et al., 2008; Kulesza et al., 2012; Gałka et al., 2013). Elm, linden, alder and hazel played a major role in those forests. Spruce and fir were part of the tree stand in the Hercynian mountains (Black Forest, Thuringian Basin, Bohemian Massif; Harmata, 1987).

In the Baltic states the mixed oak-elm-linden forests with a lot of alder were very widespread. In the north and east of Belarus oak forests were prevailing, while in the west deciduous forests were mixed with pine-deciduous ones. According to some works written on the subject of vegetation development in European Russia in the Holocene (Khotinski, 1977; Velichko et al., 2001; Sapelko et al., 2014; Ershova, Krenke, 2014; Novenko, 2016; Nizovtsev et al., 2020; Kremenetski et al., 2000; Nosova et al., 2019; Tarasov et al., 2019; Miagkaia, Ershova, 2020), the central regions of the East European Plain were covered with deciduous forests of oak, elm and linden with hazel undergrowth. In the lands of Belarusian Polesia, Prinemanye and Meshchera Polesia Lowlands the pine forests were growing along with some deciduous species and alder

(Bolikhovskaya, 1988; Zernitskaya et al., 2019, 2010; Novenko et al., 2016).

Many literary sources were written on the subject of reconstructions of the Atlantic climate conditions of the Holocene on a global scale (Guiot et al., 1993; Cheddadi et al., 1997; Tarasov et al., 1999; Davis et al., 2003, Mayewski et al., 2004; Wu et al., 2007; Mauri et al., 2015), as well as on a regional one (Korhola et al., 2000; Heikkilä, Seppä, 2003; Seppä, Poska, 2004; Antonsson, Seppä, 2007; Borisova, 2019). While analyzing the existing data on the paloclimate conditions at 8.0-5.7 ka BP in Central and Eastern Europe, we can conclude that climate became warmer and the temperature gradient weakened from east to west. For example, the reconstructions performed by W.H. Zagwijn (1994) with the method of indicator species, on the basis of the data taken from 136 profiles throughout Europe, showed that the summer and winter temperatures of Germany and Western Poland were very close to the modern ones (T_I=-1…0°C; T_{VII}=19°C). Reconstructions of paleotemperatures by the "Best Modern Analogue technique" on the basis of profile data obtained from Lednitza Lake in Central Poland (Barber et al., 2004) determined that the average January temperature was about 0°C, which is 2°C higher than nowadays.

The reconstructions obtained with the help of transfer function on the basis of the palynological data that was taken from the profiles of Raigastvere (Fig. 4), Viitna and Ruila lakes in Estonia, show that the average annual temperatures in the Mid-Holocene grew up to 8-9°C, which is 3-3.5°C higher than the modern temperatures (Seppä, Poska, 2004). The reconstructions of summer temperatures by the same method based on data from Kuryanovas Lake in Latvia, indicate that summer temperatures grew up to 19-20°C, i.e. 2-3°C higher than they are today (Heikillä, Seppä, 2010). When paleotemperature data (Seppä, Poska, 2004), based on 36 reconstructions of the average annual temperature and temperature of July, estimated for individual profiles of Scandinavia and the Baltic states, was generalized, it was determined that at 8.0-4.8 ka BP there was an obvious maximum of climate heat availability, when the annual air temperatures were exceeding the modern ones by 2°C in general.

A significant climate warming at 8.5-5.7 ka BP was also registered in Northern Belarus. The average annual temperatures increased by 2-4°C in comparison to the modern ones, and the winter temperatures grew significantly (Zernitskaya, Novenko, 2016).

The reconstructions of climatic characteristics in the eastern part of the studied latitudinal transect, were based on the palynological data of the Staroselsky Mokh bog (Fig. 4) and revealed that conditions of heat availability in the south of the Valdai Upland at 7.5-6.5 ka BP were close to the modern ones; while at 6.5-5.9 ka BP the average annual temperature was 6°C, exceeding the modern ones by 2°C. According to the reconstruction carried out by O.K. Borisova (2019) on the basis of the analysis of ecological confinement and geographic distribution of fossil flora from the Atlantic sediments of the Holocene, the heat availability in the Upper Volga Basin was significantly higher for the entire period of 7.6-5.9 ka BP. The average January temperature exceeded the modern values by 6°C, and the average July temperature was close to the modern ones (17°C). As our reconstructions demonstrate, based on palynological data from the Klyukva bog (Fig. 4), in the northwest of the Central Russian Upland a significant warming was registered for the period of 7.5-5.7 ka BP, when the average annual temperature was 3°C higher than nowadays.

Generalization of palynological data from more than 5000 profiles of Europe (Davis et al., 2003; Mauri et al., 2015) made it possible to determine 6 regional types of paleoclimatic changes. These calculations showed that the maximal heat availability in the Atlantic period was very prominent in Northern Europe and Fennoscandia, mostly due to the growth of summer temperatures. In Central Europe the thermal maximum of the Mid-Holocene was weaker, and the positive anomalies of average annual temperatures did not exceed 1°C (Fig. 3). The same results were obtained by the researchers of the BIOME600 Project (Wu et al., 2007) and by R. Cheddadi et al. (1997), who used the data of the bioclimatic modeling on the basis of the palynological materials around the world. However, according to these model calculations, climate warming in

the northern and Atlantic regions of Europe took place both during the summer and winter periods. It is worth noting that during the climatic changes analysis in the said works only a small amount of data from the regions east of Poland was took into account.

Reconstructions of quantitative values of climatic characteristics of the Northern Hemisphere were carried out by A.A. Velichko et al. (Paloclimates and Paleolandscapes …, 2009) on the basis of the data of 400 spore-pollen diagrams. They showed that the most positive deviations of average annual air temperature were common for the circumpolar regions. In the mid-latitude Europe belt the average annual temperature was higher than the modern one by 1-2°C. The reconstructions obtained by P.E. Tarasov et al. (1999) for the chronological profile 6000 ^{14}C BP (about 6.8 ka BP) for the territory of the former USSR and Mongolia showed the same result, with the average annual temperatures exceeding the modern ones by 2°C in European Russia.

There are not many quantitative estimations of the average annual precipitation in the Holocene. Mostly, they consist of indirect data on climate humidity changes for various regions. According to the reconstruction of the annual precipitation sum deviating from the modern values in the Northern Hemisphere at approximately 6.8-6.3 ka BP (6.0-5.5 ka ^{14}C years ago), calculated by A.A. Velichko et al. (Paleoclimates and Paleolandscapes ..., 2009), the average annual precipitation in Central Europe was close to the modern values, while in Eastern Europe it decreased by 25 mm per year in the studied transect. Similar results were obtained for the same area by G. Guiot et al. (1993). Their calculations of the difference between precipitation and potential evaporation showed that the climate was slightly drier in Central Europe at about 6.8 ka BP (6000 ^{14}C BP), and the humidity conditions were close to the modern ones in the territory of the East European Plain, with the exception of the eastern part of European Russia.

The characteristics of climate humidity changes which we obtained for the territory of the East European Plain, showed that the annual precipitation in Northern Belarus (Zernitskaya, Novenko, 2016), in the west of European Russia on the Ilmen Lowland (Nososva et al., 2019), and in the northwest of the Central Russian Upland (Klyukva bog) was close to the modern values, which, together with the summer temperatures rise, could possibly cause the drying of the climate due to increased evaporation. In the south of the Valdai Upland, according to the reconstruction based on the data from the Staroselsky Mokh bog, the annual precipitation at 7.5-6.8 ka BP was lower by 50-75 mm than now, while humidity conditions at 6.8-6.1 ka BP were close to the modern ones. Reconstructions made by V.A. Klimanov on the basis of the data from the Polovetsko-Kupansky bog, also showed that the average annual precipitation decreased by 25-50 mm in the Yaroslavl Volga Region during the entire Atlantic period of the Holocene (Khotinski, Klimanov, 1997). According to O.K. Borisova (2019), the annual precipitation was about 600 mm per year for the same territory, which is close to the modern values.

To characterize the humidity conditions during the Holocene, we used the climate moisture index (CMI). It is based on the ratio of annual precipitation and potential evaporation or volatility (Olchev et al., 2020). The required potential evaporation is calculated with the help of the Priestley-Taylor equation, using the data on vegetation and temperature changes, which was reconstructed from palynological data obtained from the Staroselsky Mokh and Klyukva bogs. The calculations showed that evaporation rate on the Valdai Upland was almost equal to the amount of precipitation at 7.0-5.5 ka BP, while in the north of the Central Russian Upland it exceeded them (Fig. 4), indicating there were relatively dry climatic conditions (Novenko et al., 2018, 2019).

One of the indirect indicators of humidity decrease in the Mid-Holocene is the data on the lake level changes. Generally, in Central Europe the decrease happened about 7.0 ka ^{14}C years ago (Magny, 2004). However, the lakes levels in some regions, i.e. Southern Sweden, could significantly drop as well as rise (Harrison, Digerfeldt, 1993). The research on the river bends morphology, carried out by A.Yu. Sidorchuk et al. (2012), proves that level of the rivers dropped during the same time period in the East European Plain. Formation of small river paleobeds and soil

horizons in the floodplains in the northern and central parts of the East European Plain indicates that in the Holocene water discharge that was forming the riverbeds significantly decreased for a long period, and the floodplains were waterlogged (Sidorchuk et al., 2018).

Another approach to the humidity conditions assessment is the reconstruction of the changes of the bog waters level by the rhizopoda data. These calculations used a transition function on the basis of the species composition changes in the testate amoebae communities from the Tukhola bog in Northern Poland (Lamentowicz et al., 2008). They identified an extremely dry period at 7.15-6.8 ka BP, which correlated well with the data on the level fluctuations in the lakes of the same region (Ralska-Jasiewiczowa, 1989). The researches in the south of the Valdai Upland allowed us to determine 2 periods at 7.0-6.2 and 6.0-5.5 ka BP, when the surface humidity decreased in the Staroselsky Mokh bog (Fig. 4), which was apparently due to the dry summer (Novenko et al., 2018). The similar results were obtained after a rhisopodic analysis of the Klyukva bog on the Central Russian Upland (Novenko et al., 2019), where the period of decreased water level in the bogs was registered between 6.8 and 5.5 ka BP (Fig. 4).

5.7 ka BP – present (Mid-Late Holocene, Subboreal and Subatlantic Periods)

Landscape-climatic reconstructions in the various regions worldwide are very convincing to demonstrate that after 5.7-5.5 ka BP the global warming of the Holocene thermal maximum changed to a cold snap (Khotinski, 1977; Borisova, 2014; Davis et al., 2003; Wanner et al., 2008; Mauri et al., 2015), which was apparently caused by a decrease of solar radiation during summer (Fig. 3; Berger, Loutre, 1991). During the same period the mountain glaciers started to advance widely, indicating the beginning of the “neoglacial” (Wanner et al., 2008; Solomina et al., 2008), and the westerlies intensified (Fig. 3; Mayewski et al., 2004). It was discovered that the amount of mineral particles in the North Atlantic marine sediments increased again due to iceberg spacing (Fig. 3), and the psychrophilic species of planktonic foraminifera appeared (Bond et al., 2001). The global cooling trend in the Late Holocene can be clearly traced by the change in the isotopic-oxygen composition of the Greenland glacial cores (Mayewski et al., 2004; Vinther et al., 2006).

The second half of the Holocene had a complex dynamics of plant communities in Central and Eastern Europe due to climatic changes and anthropogenic factor, the impact of which had intensified in the last millennium. Starting at 5.7 ka BP, in the eastern part of the studied latitudinal transect the area of oak and pine-oak forests decreased, while hornbeam and beech spread and strengthen their roles as the dominants of the forest communities (Fig. 1). The spread of beech forests was slightly delayed from west to east. Thus, the rise of its curve in Eastern and Central Germany, in the Rhine, Weser and Saale basins was at 3.7-3.9 ka BP; but in Western Germany, in the Elba and Oder basins as well as in Western Poland beech became the main forest-forming species only at 2.8-2.6 ka BP (Jahns, 2000; Lamentowicz et al., 2008; Gałka et al., 2013). In Central and Eastern Poland (Ralska-Jasiewiczowa et al., 2003) hornbeam and pine with a significant amount of oak were the main forest-forming species. The formation of hornbeam forests started at about 3.5 ka BP after it gradually replaced oak and linden.

The second half of the Holocene in the territory of Northern and Central Belarus (Belorussian Lakeland), in Estonia, Latvia and Lithuania, was characterized by the spreading spruce (Zernitskaya et al., 2010; Seppä, Poska, 2004; Zernitskaya, Mikhailov, 2009; Niinemets, Saarse, 2009). The researchers of these regions distinguish several consistent phases of increase and decrease in the fraction of spruce and deciduous species of forest communities starting from about 5.7 ka BP. The hornbeam pollen was found everywhere in the spore-pollen spectrum from the profiles in the territory adjacent to the Baltic Sea. However, its content did not exceed 1-2%.

In the center of the East European Plain the reconstruction of vegetation cover happened due to

an increase of spruce abundance, which occurred transgressively from north to south (Fig. 2). On the Valdai Upland and in the Upper Volga basin the formation of spruce-deciduous forests (the "upper maximum of spruce") happened at 5.5 ka BP (Klimanov et al., 1995; Velichko et al., 2001; Klimenko, Klimanov, 2003; Novenko, 2016). In the Vyatka-Kama territory the amount of fir in forest communities increased (Lychagina et al., 2016). On the Smolensk-Moscow Upland the increase of spruce fraction began around 2.7-2.5. ka BP, although it was already presented there in small amounts (Kremenetski et al., 2000; Ershova, Krenke, 2014; Nizovtsev et al., 2020; Miagkaia, Ershova, 2020). In the south, in the basin of the Upper Oka of the Central Russian Upland deciduous forests of oak, elm and linden were preserved throughout the Holocene. Spruce grew on the edge of its habitat and began to enter forest cenoses at 2.5 ka BP in the ecotopes with favorable conditions.

In the area of psammophytic-pine-forest landscapes of Polesie, pine and deciduous-pine forests remained a part of vegetation cover until 2.7 ka BP. In Belarusian Polesia during the 2.7-1.0 ka BP the amount of hornbeam pollen in the spectrum increased up to 10%, which indicated the distribution of mixed pine-deciduous forests with oak and hornbeam, with addition of linden, elm, spruce, and possibly beech as well (Zernitskaya et al., 2010, 2019). In the east, in the forest belt of European Russia, the participation of deciduous pollen decreased, the hornbeam pollen was found sporadically, and the fraction of pine, birch and grasses increased (Bolikhovskaya, 1988; Novenko et al., 2016, 2018).

From 5.7 ka BP the main tendency of climatic changes was showing in decreasing heat availability and increasing climate humidity (Dynamics of Landscape Components …, 2002; Borisova, 2014). The reconstructions of paleotemperatures changes in Central Europe were obtained by B. Davis et al. (2003) on the basis of palynological data showed that unlike in Northern Europe, where the cold snap of the last 5 millennia was especially pronounced, the average temperature drop for January, July and the entire year in the mid-latitude Europe was not higher than 2°C.

Since the reconstruction possibilities of paleoclimatic characteristics in the eastern part of the studied latitudinal transect are limited due to the distorted spore-pollen spectrums, which are the result of anthropogenic factor impact, some works usually use different sources of paleographic information to restore the conditions of the past. Considering a large amount of data on the structure of peat deposits, stage of peat humufication and results of rhisopodic analysis of the sediments from the upper bogs of the United Kingdom, Ireland, Netherlands, Northern Germany, Denmark and Sweden, we can define the phases of cold snaps and climate humidity at about 4.4-4.0, 2.8-2.2, 1.8-1.7, 1.4-1.3 and 1.1-1.0 ka BP, as well as climate fluctuations during the last millennium (Charman, Hendon, 2000; Barber et al., 2004; Lücke et al., 2003). On the basis of the paleobotanical analysis of the bog sediments in Netherlands, B. Van Geel (1978) discovered a significant cold snap and increase of precipitation at about 2.6 ka BP.

The indirect indication of cooling and climate humidification can be the data on the periods of increased flood level, obtained in Poland on the basis of the geomorphological researches. L. Starkel et al. (2013) determined the 3 periods of the second half of the Holocene: 6350-6300, 4825-4775 and 3230-1950 ka BP. The reconstructions of the water level in the upper bogs ecosystems in Northern Poland on the basis of peat decomposition data and species ratio in the testate amoebae communities made it possible to discover a humid phase at 2.75-2.4 ka BP and a dry phase at 2.25-2.1 ka BP (Lamentowicz et al., 2008). According to the results obtained after a study of the composition and radiocarbon dating of alluvial sediments in the East European Plain (Panin, Matlakhova, 2015), the increase of river flow in the Early Subboreal (about 5.7 ka BP) and Early Subatlantic periods (about 2.6 ka BP) was discovered.

In the northwest of the East European Plain, in the Baltic states, according to climatic reconstructions based on palynological data from Kuryanovas Lake in Latvia (Heikkilä, Seppä, 2010) and Raigastvere, Viitna, and Ruila lakes in Estonia (Seppä, Poska, 2004), the average July

temperature and the average annual temperature from 5.7 ka BP up to the present time decreased by 3-3.5°C. In the general cooling trend the periods of warming at about 3.6 and 2.0 ka BP, of cooling at 2.5 ka BP, and an abrupt and deep decrease of heat availability of the Little Ice Age can be distinguished (Fig. 4).

Climatic reconstructions made on the basis of the data from North Belarus (Zernitskaya, Novenko, 2016) and European Russia on the Ilmen Lowland (Nosova et al., 2019) and Valdai Upland (Novenko et al., 2018), showed that at about 5.7 ka BP the average annual air temperatures decreased by 2-3°C (Fig. 4), and precipitation values were close to the modern ones, while at about 4.5 ka BP their amount increased up to 800 mm/year, i.e. they were 100 mm higher than now. In the south of forest zone of the Central Russian Upland (on the Klyukva bog) the average annual temperatures dropped by 1-2°C and reached the modern values, and precipitation was about 600 mm/year (Fig. 4). The cold snap and increased humidity that happened at 4.5 ka BP can be compared quite conditionally to the "4.2 ka BP event".

The "4.2 ka BP event" is not fully studied yet. There are very few works in Europe with climatic reconstruction and paleoenvironment changes being the center of attention. Moreover, the reconstructions from various natural archives are contradictory, and the climatic signals that were identified in them are asynchronous (Roland et al., 2014; Pleskot et al., 2020). Generally, for Northern Eurasia there was a hypothesis about an increased temperature amplitude between the seasons during the "4.2 ka BP event" (Perşoiu et al., 2019). A decrease in winter temperatures is considered to be due to the weakening Icelandic minimum (Bradley, Bakke, 2019).

The climatic reconstructions that we obtained from the profiles of Mezhuzhol Lake (Zernitskaya, Novenko, 2016) and the Staroselsky Mokh and Klyukva bogs made it possible to distinguish a warm and extremely dry phase between 3.5 and 2.5 ka BP. During this period the average annual and summer air temperatures exceeded the modern ones by 1-2°C, while the amount of precipitation was close to the modern ones or just slightly lower (Fig. 4). According to the data from the Staroselsky Mokh and Klyukva bogs profiles, for this period a low CMI index, as well as the lowest water level for the entire Holocene was reconstructed, which indicates there was a significant drop of surface humidity of bog ecosystems during summer, apparently, due to a change in the precipitation/evaporation balance (Novenko et al., 2018, 2019). The warming at 3.5 ka BP was also recorded in the climatic reconstructions for the Yaroslavl Volga region, based on the palynological materials of the Polovetsko-Kupan bog and Galich Lake (Klimanov et al., 1995; Velichko et al., 2001), according to which all temperature indices exceeded the modern ones by 1.5°C. The increased K^+ content in the GISP2 ice core in Greenland during the said period (Fig. 3; Mayevski et al., 2004) indicates that the impact of the Siberian High intensified, which probably caused an increased frequency of anicyclonic situations in the East European Plain, causing droughts in summer and creating conditions for wildfires. The studies of the changes in fire regimes in the East European Plain during the Holocene were based on calculations of coal micro- and macroparticles concentration in sediments, and showed that frequency and intensity of forest wildfires at 3.5-2.5 ka BP increased for different regions (Novenko et al., 2016, 2019).

The warming was gradually replaced with a cold snap in the Early Subatlantic period (at about 2.6-2.5 ka BP). The cooling can be clearly traced by the paleobotanical data (Davis et al. 2003; Mauri et al., 2015) and isotope-oxygen composition of Greenland ice cores (Thomas et al., 2007). It was also accompanied by a simultaneous growth of glaciers around all European mountainous countries (Wanner et al., 2008; Solomina et al., 2008). The cold snap was not monotonous and had a series of warm and cool phases. During the first millennium AD many researchers distinguish the Roman Warm Period (2.0-1.7 ka BP) and the Dark Ages Cold Period (1.7-1.2 ka BP; Buntgen et al., 2011; Helama et al., 2017; Gouw-Bouman et al., 2019).

The review of 114 articles on the subject of the Dark Ages Cold Period around the world was carried out by S. Helama et al. (2017). It showed that European climate was more cool and humid

than it is nowadays. At 1.7-1.5 ka BP the mountain glaciation increased (Solomina et al., 2008), the lakes level rose (Magny, 2004), and the amount of forests grew in the forest-steppe zone (Novenko, 2016). However, the reconstructions obtained for the East European Plain by the informational-statistical method and based on the data from the Usvyatsky Mokh bog (Daugava River) prove there was a climate warming and drying between 1700 and 1500 BP (Kozharinov et al., 2003); the calculations on the basis of the data from the Polovetsko-Kupanskoye bog in the Yaroslavl Volga Region show there was a warming and an increase of precipitation during the same period (Klimanov et al., 1995). The reconstructions that we obtained by the "method of better analogues" generally showed a growth of heat availability and decrease of humidity during the Roman Warm Period, followed by a cold snap and increasing precipitation. Unfortunately, in the studied profiles the said time periods are represented by a small amount of samples, which makes it difficult to reconstruct.

Landscape-climatic changes in the last millennium are studied thoroughly and widely with the help of different methods (Klimanov et al., 1995; Mann et al., 2009; Wanner et al., 2008; Christiansen, Ljungqvist, 2017; Pages 2k Consortium, 2013, 2017). As the result, 2 main climatic phases were classified: *Medieval Climate Anomaly* (950-1250 AD) and *Little Ice Age* (1400-1850 AD).

Paleoclimatic reconstructions that were made using various nature archives characterize the Medieval Climate Anomaly as a warm and relatively dry period (Goosse et al., 2005). There is a data on repeating summer droughts in some European regions (Büntgen et al., 2010) and on decreasing river flow during the same period (Panin, Matlakhova, 2015), although the results of some paleoclimatic researches indicate that the average annual precipitation sum increased (Davis et al., 2003).

According to paleoclimatic reconstructions based on the palynological data for Raigastvere Lake, the average annual air temperature during the Medieval Climate Anomaly in the Baltic states exceeded the modern ones by 1°C (Seppa, Poska, 2004). In the spore-pollen spectrum from the sediments of some profiles from the central regions of European Russia (Khotinski, 1977; Klimanov et al., 1995), which are part of the Medieval Climate Anomaly, an increase of the deciduous species (oak, linden, elm) fraction was registered. Reconstructions of paleotemperatures for the south of the Valdai Upland showed an increase in the average annual temperatures by 1.5°C. The calculations carried out by V.A. Klimanov et al. (1995) for the Yaroslavl Volga region, showed that all temperature characteristics during the Medieval Climate Anomaly were close to the modern ones, while the amount of precipitation was 25-50 mm lower.

An abrupt and deep drop of heat availability during the Little Ice Age was registered everywhere in the studied territory as well as in the entire Northern Hemisphere (Christiansen, Ljungqvist, 2017). It is possible that temperature decrease in the Little Ice Age was the most significant one among all climate oscillations of the Holocene, with the exception of "8.2 ka BP event".

During that period the anomalies of summer, winter and average annual air temperatures in Central Europe were 1°C (Davis et al., 2003; Mauri et al., 2015). The reconstructions carried out by K. Barber et al. (2004) on the basis of palynological data of the profile from Lednitsa Lake in Eastern Poland revealed a more significant winter cold snap, when the average January temperatures and average annual ones were lower by 2.5°C than the modern ones. For Baltic territory a significant increase of heat availability was determined on the basis of some profiles. The average annual temperatures were lower by 2°C than the modern ones (Seppa, Poska, 2004).

On the Valdai Upland the average January temperature during the Little Ice Age declined by 3°C (down to –12°C), while the average annual temperature decreased by 2°C, and the temperature of June did not change significantly. The share of thermophilic elements in the spore-pollen spectrums of that period abruptly dropped and became almost absent, although the role of spruce pollen increased. In the spectrums of the Polovetsko-Kupanskoe Bog that period resulted in degradation of deciduous species and a significant increase of dwarf birch. V.A. Klimanov et al. (1995) wrote that aside from a winter temperatures drop, this cold snap had a summer temperatures

and average annual temperatures drop as well. The deviation of the average annual ones from the modern ones was 2°C.

Climatic changes during the Little Ice Age had a great effect on a fluvial sedimentation both in Central and Eastern Europe. The increasing frequency and level of spring floods, as well as formation of secondary down-cuttings in the ravines and gullies prove the climate humidity growth during that period (Sidorchuk et al., 2018; Panin, Matlakhova, 2015).

The main patterns of climate dynamics in Central and Eastern Europe in the Holocene and the expected landscape-climatic changes

According to the concept of asymmetry of the main climate trend during the interglacial period (Velichko, 2012), the average annual air temperature was growing fast in Northern Eurasia during the Early Holocene and gradually declining during its second half. The estimations showed that the warming trend from the Late Glacial period to the Holocene optimum was 0.5° for 1000 years, while for the second half of the warm period this trend did not exceed 0.3° for 1000 years (Borisova, 2014). However, it should be noted that the said reconstructions of peleotemperatures for Central and Eastern Europe in the Holocene demonstrate that declining heat availability for the period which came after thermal maximum, has not yet reached the Early Holocene level (Davis et al., 2003; Novenko et al., 2018, 2019).

The data studied above made it possible for us to determine 3 main stages of the changes in the Holocene climatic regime: rapid warming in the Early Holocene (11.7-8.0 ka BP), complicated by oscillations; Holocene thermal maximum (8.0-5.7 ka BP), without any short-term and abrupt climatic changes; directed temperature drop in the second half of the Holocene (5.7 ka BP − present), with quasi-harmonic fluctuations of air temperature and precipitation.

The analysis of landscape-climatic reconstructions for Central and Eastern Europe showed that the periods of cold snaps, separated with climate warming, generally match the global periods (Mayewski et al., 2004). The time differences between beginning and end of the warm and cold periods in different regions are about 100-200 years, which falls within the admissible error of radiocarbon dates and may also depend on constructing errors of the age/depth models for specific profiles which were used for reconstructions.

A “critical point” of climatic changes related to “8.2 ka BP event”, which the International Commission on Stratigraphy suggests considering as a border between the Early and Mid-Holocene (Walker et al., 2019; Head, 2019) in Central and Eastern Europe, is a turning point of climate system transition from the warming in the Early Holocene to the thermal maximum. Climatic changes related to “4.2 ka BP event”, which is considered to be a border between the Mid- and Late Holocene (Head, 2019), is not seen as clearly in our materials as the cold snap at 5.7 ka BP. Starting from 5.7 ka BP, the direction of climatic trend was changing in Central and Eastern Europe, and sectorial differentiation of vegetation cover was increasing. Beech and hornbeam expanded throughout the western regions, while spruce was spreading in the east.

According to the last estimations of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013), based on the results of the Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5, by the 4 main scenarios of representative trajectories of green gasses concentrations (RCP2.6; RCP4.5; RCP6.0, RCP8.5), the rise of average global temperature by the end of the current century will start at 0.3°C (RCP2.6 is the most gentle scenario) and go up to 4.8°C (RCP8.5 is the most harsh scenario). The amount of precipitation will grow by 6% (RCP2.6) up to 12% (RCP8.5). When estimating the increase of average annual air temperature in Central and Eastern Europe by the end of the XXI century, the said scenarios make us to assume that it will rise by 2.0-2.5°C according to the gentle scenario and by 6.0-7.0°C according to the harsh one. The increase of average annual precipitation will start from 7% (RCP2.6) up to 15% (RCP8.5; IPCC, 2013).

Using the method of paleoanalogues that was offered by M.I. Budyko (1980) and is widely used A.A. Velichko et al. (2012; Climates and Landscapes of Northern Eurasia ..., 2010) to predict the possible dynamics of landscapes and climate with the help of paleogeographic data, we can suggest some conditions to be considered as possible trajectories of environment changes during climate warming in case of RCP2.6 and RCP4.5 scenarios coming true. First, the conditions for the Holocene thermal maximum (8.0-5.7 ka BP), when the average annual temperatures in the studied region exceeded the modern ones by 2-3°C; second, the conditions for the warming periods during 3.5-2.5 ka BP, 2.0-1.7 ka BP (Roman warming) and the Medieval climatic anomaly, when the average annual temperatures deviated from the modern ones by 1.0 and 2.0°C. The RCP6.0 and RCP8.5 scenarios suggest a greater temperatures deviation than it was previously determined for the Holocene. The paleoanalogues of these conditions should be sought in the conditions of earlier interglacial periods.

Considering the landscape-climatic reconstructions for the Holocene of Central and Eastern Europe, the internal structure of geosystems can be expected to change, especially in the eastern area of the studied transect, as well as the frequency of wildfires caused by natural causes to grow, and the frequency of catastrophes due to uneven precipitation to increase. However, even the most abrupt transformations of landscape components in the Holocene took hundreds and thousands years to happen, while the expected climate warming in the XXI century may take less than a hundred years. The adaptive mechanisms of geosystems are relatively inert, so it is obvious that forecast should take into account some response delay of landscape components to the process of climate warming.

REFERENCES

Allen J.R.M., Long A.J., Chris J., Pearson D.G., Huntley B. 2007. Holocene climate variability in northernmost Europe // Quaternary Science Reviews. Vol. 26. P. 1432-1453.

Alley R.B., Mayewski P.A., Sowers T., Stuiver M., Taylor K.C., Clark P.U. 1997. Holocene climatic instability: a prominent, widespread event 8200 yr ago // Geology. Vol. 25. P. 483-486.

Antonsson K., Seppä H. 2007. Holocene temperatures in Bohuslän, southwest Sweden: a quantitative reconstruction from fossil pollen Data // Boreas. Vol. 36. P. 400-410.

Barber K., Zolitschka B., Tarasov P., Lotter A.F. 2004. Atlantic to Urals − the Holocene climatic record of mid-latitude Europe // Past Climate Variability through Europe and Africa / Eds. R.W. Battarbee, F. Gasse, C.E. Stickley. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. P. 417-442.

Berger A., Loutre M.F. 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quaternary Science Reviews. Vol. 10. P. 297-317.

Björck S., Kromer B., Johnsen S., Bennike O., Hammarlund D., Lehmdahl G., Possnert G., Rasmussen T.L., Wohlfarth B., Hammer C.U., Spurk M. 1996. Synchronised terrestrial-atmospheric deglacial records around the North Atlantic // Science. Vol. 274. P. 1155-1160.

Bolikhovskaya N.S. 1988. On the History of Vegetation and Climate of the Moscow Meshchera in the Holocene // Holocene Paleoclimates of the European Territory of the USSR. Moscow: Nauka. P. 76-85. [in Russian; *Болиховская Н.С.* 1988. К истории растительности и климата Подмосковной Мещеры в голоцене // Палеоклиматы голоцена Европейской территории СССР. М.: Наука. С. 76-85.]

Bond G., Broecker W., Johnsen S., McManus J., Labeyrie L., Jouzel J., Bonani G. 1993. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice // Nature. Vol. 365. P. 143-147.

Bond G., Kromer B., Beer J. Muscheler R., Evans M., Showers W., Hoffmann S. 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene // Science. Vol. 294. P. 2130-

2136.

Borisova O.K. 2014. Landscape and Climatic Changes in the Holocene // News of RAN. Geographic Series. No. 2. Pp. 5-20. [in Russian; *Борисова О.К.* 2014. Ландшафтно-климатические изменения в голоцене // Известия РАН. Серия географическая. № 2. С. 5-20.]

Borisova O. 2019. Environmental and climatic conditions of human occupation in the central east European plain during the middle Holocene: Reconstruction from palaeofloristic data // Quaternary International. Vol. 516. P. 42-57.

Borzenkova I.I., Borisova O.K., Zhiltsova E.L., Sapelko T.V. 2017. Cold Episode about 8200 Years Ago in Northern Europe: An Analysis of Empirical Data and Possible Causes // Ice and Snow. Vol. 57. No. 1. P. 117-132. [in Russian; *Борзенкова И.И., Борисова О.К., Жильцова Е.Л., Сапелко Т.В.* 2017. Холодный эпизод около 8200 лет назад в Северной Европе: анализ эмпирических данных и возможных причин // Лед и снег. Т. 57. № 1. С. 117-132.]

Bos J.A.A., Urz R. 2003. Late Glacial and early Holocene environment in the middle Lahn river valley (Hessen, central-west Germany) and the local impact of early Mesolithic people − pollen and macrofossil evidence // Vegetation History Archaeobotany. Vol. 12. P. 19-36.

Bos J.A.A., van Geel B., van der Plicht J., Bohncke S.J.P. 2007. Preboreal climate oscillations in Europe: Wiggle-match dating and synthesis of Dutch high-resolution multi-proxy records // Quaternary Science Reviews. Vol. 26. P. 1927-1950.

Bradley R.S. 2008. Holocene perspectives on future climate change // Natural climate variability and global warming: A Holocene perspective / Eds: R.W. Battarbee, H.A. Binney. Chichester: J. Wiley & Sons. P. 254-268.

Bradley R.S., Bakke J. 2019. Is there evidence for a 4.2 ka BP event in the northern North Atlantic region? // Climate in the Past. Vol. 15. P. 1665-1676.

Budyko M.I. 1980. Climate of the Past and the Future. Leningrad: Hydrometeoizdat. 352 p. [in Russian; *Будыко М.И.* 1980. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеоиздат. 352 с.]

Büntgen U., Tegel W., Nicolussi K., McCormick M., Frank D., Trouet V., Kaplan J.O., Herzig F., Heussner K.-U., Wanner H., Luterbacher J., Esper J. 2011. 2500 years of European climate variability and human susceptibility // Science. Vol. 331. P. 578-582.

Büntgen U., Trouet V., Frank D., Leuschner H.H., Friedrichs D., Luterbacher J., Esper J. 2010. Tree ring indicators of German summer drought over the last millennium // Quaternary Science Reviews. Vol. 29. P. 1005-1016.

Charman D.J., Hendon D. 2000. Long-term changes in soil water tables over the past 4500 years: relationships with climate and North Atlantic atmospheric circulation and sea surface temperature // Climatic Change. Vol. 47. P. 45-59.

Cheddadi R., Yu G., Guiot J., Harrison S.P., Prentice I.C. 1997. The climate of Europe 6000 years ago // Climate Dynamics. Vol. 13. P. 1-9.

Christiansen B., Ljungqvist F.C. 2017. Challenges and perspectives for large-scale temperature reconstructions of the past two millennia // Reviews of Geophysics. Vol. 55. No. 1. P. 40-96.

Climates and Landscapes of Northern Eurasia in the Context of Global Warming. Retrospective Analysis and Scenarios. Atlas-monograph. 2010. Moscow: GEOS. 220 p. [in Russian; Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и сценарии. Атлас-монография. 2010. М.: ГЕОС. 220 с.]

Coope G.R., Lemdahl G., Lowe J.J., Walkling A. 1998. Temperature gradients in northern Europe during the last glacial-Holocene transition (14-9 ^{14}C kyr BP) interpreted from coleopteran assemblages // Journal of Quaternary Science. Vol. 13. No. 5. P. 419-433.

Daley T.J., Thomas E.R., Holmes K., Street-Perrott F.A., Chapman M.R., Tindall J.C., Valdes P.J., Loader NJ., Marshall J.D., Wolff E.W., Hopley P.J., Atkinson T., Barber K.E., Fisher EH., Robertson I., Hughes P.D.M., Roberts C.N.. 2011. The 8200yr BP cold event in stable isotope records from the North Atlantic region // Global and Planetary Change. Vol. 79. P. 288-302.

Davis B.A.S., Brewer S., Stevenson A.C., Guiot J. 2003. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data // Quaternary Science Reviews. Vol. 22. P. 1701-1716.

De Klerk P. 2008. Patterns in vegetation and sedimentation during the Weichselian Late-glacial in north-eastern Germany // Journal of Biogeography. Vol. 35. P. 1308-1322.

Dynamics of Landscape Components and Inland Sea Basins of Northern Eurasia over the Past 130,000 Years (General Paleogeography). Atlas-monograph. 2002. Moscow: GEOS. 232 p. [in Russian; Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 130000 лет (общая палеогеография). Атлас-монография. 2002. М.: ГЕОС. 232 с.].

European Pollen Database. 2007 [Available at http://www.europeanpollendatabase.net (Date of Access 03.06.2020)].

Feurdean A., Vannière B., Finsinger W. et al. 2020. Fire hazard modulation by long-term dynamics in land cover and dominant forest type in eastern and central Europe // Biogeosciences. Vol. 17. P. 1213-1230.

Firbas F. 1949. Spät- und nacheiszeitliche Waldgeschichte Mitteleuropas nördlich der Alpen. Bd. 1. Jena: Fischer. 326 p.

Gałka M., Miotk-Szpiganowicz G., Goslar T., Jęśko M., van der Knaap W.O., Lamentowicz M. 2013. Palaeohydrology, fires and vegetation succession in the southern Baltic during the last 7500 years reconstructed from a raised bog based on multi-proxy data // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol. 370. P. 209-221.

Giesecke T., Bennett K.D., Birks H.J.B., Bjune A.E., Bozilova E., Feurdean A., Finsinger W., Froyd C., Pokorny P., Rosch M., Seppa H., Tonkov S., Valsecchi V., Wolters S. 2011. The pace of Holocene vegetation change e testing for synchronous developments // Quaternary Science Reviews. Vol. 30. P. 2805-2814.

Goosse H., Renssen H., Timmermann A., Bradley R.S. 2005. Internal and forced climate variability during the last millennium: a model-data comparison using ensemble simulations // Quaternary Science Reviews. Vol. 24. P. 1345-1360.

Gouw-Bouman M.T.I.J., van Asch N., Engels S., Hoek W.Z. 2019. Late Holocene ecological shifts and chironomid-inferred summer temperature changes reconstructed from Lake Uddelermeer, the Netherlands // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol. 535. P. 109366.

Grichuk V.P. 1969. Experience of Reconstruction of Some Climatic Elements in the Northern Hemisphere during the Atlantic Period of the Holocene // Holocene. Moscow: Nauka. P. 41-57. [in Russian; *Гричук В.П.* 1969. Опыт реконструкции некоторых элементов климатов северного полушария в атлантический период голоцена // Голоцен. М.: Наука. С. 41-57.]

Grichuk V.P. 1989. History of Flora and Vegetation of the East European Plain in the Pleistocene. Moscow: Nauka. 183 p. [in Russian; *Гричук В.П.* 1989. История флоры и растительности Русской равнины в плейстоцене. М.: Наука. 183 с.]

Guiot J., Harrison S.P., Prentice C. 1993. Reconstruction of Holocene precipitation in Europe using pollen and lake level data // Quaternary Research. Vol. 49. P. 139-149.

Harmata K. 1987. Late-glacial and Holocene history of vegetation at Roztoki and Tarnowiec near Jasło (Jasło-Sanok Depression) // Acta Palaeobotanica. Vol. 27. No. 1. P. 43-65.

Harrison S.P., Digerfeld G. 1993. European lakes as palaeoclimatic indicators // Quaternary Science Reviews. Vol. 12. P. 233-248.

Head M.J. 2019. Formal subdivision of the Quaternary System/Period: Present status and future directions // Quaternary International. Vol. 500. P. 32-51.

Heikkilä M., Fontana S., Seppä H. 2009. Rapid Lateglacial tree population dynamics and ecosystem changes in the eastern Baltic region // Journal of Quaternary Science. Vol. 24. P. 802-815.

Heikkilä M., Seppä H. 2003. A 11,000 yr palaeotemperature reconstruction from southern boreal zone in Finland // Quaternary Science Reviews. Vol. 22. P. 541-554.

Heikkilä M., Seppä H. 2010. Holocene climate dynamics in Latvia, eastern Baltic region: a pollen-based summer temperature reconstruction and regional comparison // Boreas. Vol. 39. P. 705-719.

Helama S., Jones P.D., Briffa K.R. 2017. Dark Ages Cold Period: A literature review and directions for future research // The Holocene. Vol. 27. P. 1600-1606.

IPCC. 2013. Climate change 2013. The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press. 1535 p.

Jahns S. 2000. Late-glacial and Holocene woodland dynamics and land-use history of the Lower Oder valley, north-eastern Germany, based on two, AMS ^{14}C-dated, pollen profiles // Vegetation History and Archaeobotany. Vol. 9. P. 111-123.

Jahns S. 2007. Palynological investigations into the Late Pleistocene and Holocene history of vegetation and settlement at the Löddigsee, Mecklenburg, Germany // Vegetation History Archaeobotany. Vol. 16. P. 157-169.

Johnsen S., Clausen H., Dansgaard W., Fuhrer K., Gundestrup N., Hammer C., Iversen P., Jouzel J., Stauffer B., Steffensen J. 1992. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core // Nature. Vol. 359. P. 311-313.

Kalis A.J., Merkt J., Wunderlich J. 2003. Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe - human impact and natural causes // Quaternary Science Reviews. Vol. 22. P. 33-79.

Keigwin L.D., Boyle E.A. 2000. Detecting Holocene changes in thermohaline circulation // Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 4. P. 1343-1346.

Khotinski N.A. 1977. Holocene of Northern Eurasia. Moscow: Nauka. 200 p. [in Russian; *Хотинский Н.А.* 1977. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука. 200 с.]

Khotinski N.A., Klimanov V.A. 1997. Allerod, Younger Dryas and Early Holocene Palaeo-Environmental Stratigraphy // Quaternary International. Vol. 41/42. P. 67-70.

Klimanov V.A., Khotinski N.A., Blagoveshchenskaya N.V. 1995. Climate Fluctuations over the Historical Period in the Center of the East European Plain // News of RAN. Geographic Series. No. 1. P. 89-96. [in Russian; *Климанов В.А., Хотинский Н.А., Благовещенская Н.В.* 1995. Колебания климата за исторический период в центре русской равнины // Известия РАН. Серия географическая. № 1. С. 89-96.]

Klimanov V.A., Serebryanaya T.A. 1986. Changes in Vegetation and Climate on the Central Russian Upland in the Holocene // News of AN SSSR. Geographic Series. No. 2. P. 93-101. [in Russian; *Климанов В.А., Серебряная Т.А.* 1986. Изменения растительности и климата на Среднерусской возвышенности в голоцене // Известия АН СССР. Серия географическая. № 2. С. 93-101.]

Klimenko V.V., Klimanov V.A. 2003. Cold Climate of the Early Sub-Atlantic Era in the Northern Hemisphere // Reports of the Academy of Sciences. Vol. 391. No. 3. P. 393-397. [in Russian; *Клименко В.В., Климанов В.А.* 2003. Холодный климат ранней субатлантической эпохи в Северном полушарии // Доклады Академии наук. Т. 391. № 3. С. 393-397.]

Korhola A., Weckström J., Holmström L., Erästö P. 2000. A quantitative Holocene climatic record from diatoms in northern Fennoscandia // Quaternary Research. Vol. 54. P. 284-294.

Kozharinov A.V., Sirin A.A., Klimenko V.V., Klimanov V.A., Malyasova E.S., Sleptsov A.M. 2003. Dynamics of Vegetation Cover and Climate of the Daugava Lowland (Tver Region) for the Last 5 Thousand Years // Botanical Journal. Vol. 88. No. 3. P. 90-97. [in Russian; *Кожаринов А.В., Сирин А.А., Клименко В.В., Климанов В.А., Малясова Е.С., Слепцов А.М.* 2003. Динамика растительного покрова и климата Западнодвинской низины (Тверская область) за последние 5 тысяч лет // Ботанический журнал. Т. 88. № 3. С. 90-97.]

Krementski K.V., Borisova O.K., Zelikson E.M. 2000. The Late Glacial and Holocene history of vegetation in the Moscow region // Paleontological Journal. Vol. 34. No. 1. P. 67-74.

Kulesza P., Suchora M., Irena A., Pidek I.A., Dobrowolski R., Alexandrowicz W.P. 2012. The Holocene

palaeoenvironmental changes reflected in the multi-proxy studies of Lake Słone sediments (SE Poland) // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol. 363. P. 79-98.

Lamentowicz M., Obremska M., Mitchell E.A.D. 2008. Autogenic succession, land-use change, and climatic influences on the Holocene development of a kettle-hole mire in Northern Poland // Review of Palaeobotany and Palynology. Vol. 151. P. 21-40.

Latalowa M., Nalepka D. 1987. A study of the Late-Glacial and Holocene vegetational history of the Wolbrom area (Silesian-Cracovian Upland − S. Poland) // Acta Palaeobotanica. Vol. 27. No. 1. P. 75-115.

Litt T., Brauer A., Goslar T., Merkt J., Bałaga K., Müller H., Ralska-Jasiewiczowa M., Stebich M., Negendank J.F.W. 2001. Correlation and synchronisation of Lateglacial continental sequences in northern central Europe based on annually laminated lacustrine sediments // Quaternary Science Reviews. Vol. 20. P. 1233-1249.

Lotter A.F., Eicher U., Birks, H.J.B., Siegenthaler U. 1992. Late Glacial climatic oscillations as recorded in Swiss lake sediments // Journal of Quaternary Science. Vol. 7. P. 187-204.

Lücke A., Schleser G. H., Zolitschka B., Negendank J.F.W. 2003. A Lateglacial and Holocene organic carbon isotope record of lacustrine palaeoproductivity and climatic change derived from varved lake sediments of Lake Holzmaar, Germany // Quaternary Science Reviews. Vol. 22. P. 569-580.

Lychagina E.L., Zaretskaya N.E., Chernov A.V., Lapteva E.G., Trofimova S.S., Zinoviev E.V. 2016. Paleoecological Studies in the Area of Lake Chashkinskoye (Middle Urals) // 7th Bersov's Readings. Materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation. Yekaterinburg. Pp. 294-302. [in Russian; *Лычагина Е.Л., Зарецкая Н.Е., Чернов А.В., Лаптева Е.Г., Трофимова С.С., Зиновьев Е.В.* 2016. Палеоэкологические исследования в районе Чашкинского озера (Среднее Предуралье) // Седьмые Берсовские чтения. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Екатеринбург. С. 294-302.]

Magny M. 2004. Holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations andits probable impact on prehistoric human settlements // Quaternary International. Vol. 113. P. 65-79.

Mann M.E., Zhang Z., Rutherford S., Bradley R.S., Hughes M.K., Shindell D., Ammann C., Faluvegi G., Ni F. 2009. Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly // Science. Vol. 326. P. 1256-1260.

Mauri A., Davis B.A.S., Collins P.M., Kaplan J.O. 2015. The climate of Europe during the Holocene: a gridded pollen-based reconstruction and its multi-proxy evaluation // Quaternary Science Reviews. Vol. 112. P. 109-127.

Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager J.C. et al. 2004. Holocene climate variability // Quaternary Research. Vol. 62. Pp. 243-255.

Miagkaia A., Ershova E. 2020. A 10 000-year pollen and plant macrofossil record from the Losiny Ostrov National Park (Moscow, Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 438. P. 012018 (1-9).

Neishtadt M.I. 1957. History of Forests and Paleogeography of the USSR in the Holocene. Moscow: Nauka. 404 p. [in Russian; *Нейштадт М.И.* 1957. История лесов и палеогеография СССР в голоцене. М.: Наука. 404 с.]

Niinemets E., Saarse L. 2009. Holocene vegetation and land-use dynamics of south-eastern Estonia // Quaternary International. Vol. 207. P. 104-116.

Nizovtsev V.A., Novenko E.Yu., Erman N.M., Mazei N.G., Matasov V.M., Lavrova N.B., Filimonova L.V. 2020. Evolution of Landscapes of the Middle Protva Basin in the Holocene // Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography. No. 1. P. 73-86. [in Russian; *Низовцев В.А., Новенко Е.Ю., Эрман Н.М., Мазей Н.Г., Матасов В.М., Лаврова Н.Б., Филимонова*

Л.В. 2020. Эволюция ландшафтов бассейна Средней Протвы в голоцене // Вестник Московского университета. Серия 5: География. № 1. С. 73-86.]

Nosova M.B., Novenko E.Yu., Severova E.E., Volkova O.A. 2019. Vegetation and climate changes within and around the Polistovo-Lovatskaya mire system (Pskov Oblast, North-Western Russia) during the past 10,500 years // Vegetation History and Archaeobotany. Vol. 28. P. 123-140.

Novenko E.Yu. 2016. Changes in Vegetation and Climate of Central and Eastern Europe in the Late Pleistocene and Holocene in the Interglacial and Transitional Stages of Climatic Macrocycles. Moscow: GEOS. 228 p. [in Russian; *Новенко Е.Ю.* 2016. Изменения растительности и климата Центральной и Восточной Европы в позднем плейстоцене и голоцене в межледниковые и переходные этапы климатических макроциклов. М.: ГЕОС. 228 с.]

Novenko E., Tsyganov A., Volkova E., Kupriyanov D.A., Mironenko I.V., Babeshko K.V., Utkina A.S., Popov V., Mazei Y.A. 2016. Mid- and Late Holocene vegetation dynamics and fire history in the boreal forest of European Russia: A case study from Meshchera Lowlands // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol. 459. P. 570-584.

Novenko E.Y., Tsyganov A.N., Olchev A.V. 2018. Palaeoecological data as a tool to predict possible future vegetation changes in the boreal forest zone of European Russia: a case study from the Central Forest Biosphere Reserve // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 107. P. 012104 (1-6).

Novenko E.Yu., Olchev A.V. 2015. Early Holocene vegetation and climate dynamics in the central part of the East European Plain (Russia) // Quaternary International. Vol. 388. P. 12-22.

Novenko E.Yu., Tsyganov A.N., Babeshko K.V., Payne R.J., Li J., Mazei Y.A., Olchev A.V. 2019. Climatic moisture conditions in the north-west of the Mid-Russian Upland during the Holocene // Geography, Environment, Sustainability. Vol. 12. P. 188-202.

Novenko E., Tsyganov A., Volkova E., Mazei N.G., Volkova E.M., Chernyshov V.A., Kupriyanov D.A., Mazei Y.A. 2015. The Holocene palaeoenvironmental history of Central European Russia reconstructed from pollen, plant macrofossil and testate amoeba analyses of the Klukva peatland, Tula region // Quaternary Research. Vol. 83. P. 459-468.

Olchev A.V., Getmanova E.R., Novenko E.Y. 2020. A modeling approach for reconstruction of annual land surface evapotranspiration using palaeoecological data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 438. P. 012021.

PAGES 2k Consortium. 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia // Nature Geoscience. Vol. 6. P. 339-346.

PAGES 2k Consortium. 2017. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era // Scientific Data. Vol. 4 (170088). P. 1-33.

Paleoclimates and Paleolandscapes of the Extratropical Area of Northern Eurasia. Late Pleistocene-Holocene. Atlas-monograph. 2009. Moscow: GEOS. 120 p. [in Russian; Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северной Евразии. Поздний плейстоцен-голоцен. Атлас-монография. 2009. М.: ГЕОС. 120 с.]

Panin A., Matlakhova E. 2015. Fluvial chronology in the East European plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications // Catena. Vol. 130. P. 46-61.

Perşoiu A., Ionita M., Weiss H. 2019. Atmospheric blocking induced by the strengthened Siberian High led to drying in west Asia during the 4.2 ka BP event – a hypothesis // Climate in the Past. Vol. 15. P. 781-793.

Pleskot K., Apolinarska K., Kołaczek P., Suchora M., Fojutowski M., Joniak T., Kotrys B., Kramkowski M., Słowiński M., Woźniak M., Lamentowicz M. 2020. Searching for the 4.2 ka climate event at Lake Spore, Poland // CATENA. Vol. 191. P. 104565 (1-14).

Ralska-Jasiewiczowa M. 1989. Environmental changes recorded in lakes and mires of Poland during the last 13,000 years // Acta Palaeobotanica. Vol. 29. P. 1-120.

Ralska-Jasiewiczowa M., Nalepka D., Goslar T. 2003. Some problems of forest transformation at

the transition to the oligocratic/Homo sapiens phase of the Holocene interglacial in northern lowlands of central Europe // Vegetation History and Archaeobotany. Vol. 12. P. 233-247.

Roland T.P., Caseldine C.J., Charman D.J., Turney C.S.M., Amesbury M.J. 2014. Was there a '4.2 ka event' in Great Britain and Ireland? Evidence from the peatland record // Quaternary Science Reviews. Vol. 83. P. 11-27.

Sapelko T.V., Kuznetsov D.D., Korneenkova N.Yu., Denisenkov V.P., Ludikova A.V. 2014. Paleolimnology of the Inner Lakes of the Putsaari Island (Lake Ladoga) // News of the Russian Geographical Society. Vol. 146. No. 3. P. 29-40. [in Russian; *Сапелко Т.В., Кузнецов Д.Д., Корнеенкова Н.Ю., Денисенков В.П., Лудикова А.В.* 2014. Палеолимнология внутренних озер острова Путсаари (Ладожское озеро) // Известия Русского географического общества. Т. 146. № 3. С. 29-40.]

Seppä H., Poska A. 2004. Holocene annual mean temperature changes in Estonia and their relationship to solar insolation and atmospheric circulation patterns // Quaternary Research. Vol. 61. P. 22-31.

Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. 2012. Decrease in River Runoff in the Plains of Northern Eurasia during the Holocene Optimum // Water Resources. Vol. 39. No. 1. P. 40. [in Russian; *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* 2012. Снижение стока рек равнин Северной Евразии в оптимум голоцена // Водные ресурсы. Т. 39. № 1. С. 40.]

Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. 2018. River Runoff in the East European Plain over the Last 20 Thousand Years and the Problem of Changes in the Southern Seas Water Levels // Questions of Geography. No. 145. P. 144-168. [in Russian; *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* 2018. Речной сток на восточно-европейской равнине за последние 20 тысяч лет и проблема изменения уровней южных морей // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 144-168.]

Solomina O.N. 2010. Climatic Reasons for Fluctuations of the Mountain Glaciers in the Holocene // Ice and Snow. No. 1. P. 103-110. [in Russian; *Соломина О.Н.* 2010. Климатические причины колебаний горных ледников в голоцене // Лед и снег. № 1. С. 103-110.]

Solomina O., Haeberli W., Kull C., Wiles G. 2008. Historical and Holocene glacier–climate variations: General concepts and overview // Global and Planetary Change. Vol. 60. P. 1-9.

Starkel L., Michczyńska D.J., Krąpiec M., Margielewski W., Nalepka D., Pazdur A. 22013. Progress in the Holocene chrono-climatostratigraphy of Polish territory // Geochronometria. Vol. 40. No. 1. P. 1-21.

Subetto D.A., Davydova N.N., Sapelko T.V., Wolfart B., Vastegard S., Kuznetsov D.D. 2003. Climate of North-West Russia at the Turn of the Pleistocene and Holocene // News of RAN. Geographic Series. No. 5. P. 80-91. [in Russian; *Субетто Д.А., Давыдова Н.Н., Сапелко Т.В., Вольфарт Б., Вастегорд С., Кузнецов Д.Д.* 2003. Климат северо-запада России на рубеже плейстоцена и голоцена // Известия РАН. Серия географическая. № 5. С. 80-91.]

Tarasov P.E., Guiot J., Cheddadi R., Andreev A.A., Bezusko L.G., Blyakharchuk T.A., Dorofeyuk N.I., Filimonova L.V., Volkova V.S., Zernitskaya V.P. 1999. Climate in northern Eurasia 6000 years ago reconstructed from pollen data // Earth and Planetary Science Letters. Vol. 171. P. 635-645.

Tarasov P.E., Savelieva L.A., Long T., Leipe C. 2019. Postglacial vegetation and climate history and traces of early human impact and agriculture in the present-day cool mixed forest zone of European Russia // Quaternary International. Vol. 516. P. 21-41.

Teller J.T., Leverington D.W., Mann J.D. 2002. Freshwater outbursts to the oceans from glacial Lake Agassiz and their role in climate change during the last deglaciation // Quaternary Science Reviews. Vol. 21. P. 879-887.

Thomas E.R., Wolff E.W., Mulvaney R., Steffensen J.P., Johnsen S.J., Arrowsmith C., White J.W.C., Vaughn B.H., Popp T. 2007. The 8.2 ka event from Greenland ice cores // Quaternary Science Reviews. Vol. 26. P. 70-81.

Van Geel B. 1978: A palaeoecological study of Holocene peat bog sections in Germany and the Netherlands, based on the analyses of pollen, spores and macro- and microscopic remains of fungi, algae, cormophytes and animals // Review of Palaeobotany and Palynology. Vol. 25. P. 1-120.

Velichko A.A. 2012. Evolutionary Geography: Problems and Solutions. Moscow: GEOS. 563 p. [in Russian; *Величко А.А.* 2012. Эволюционная география: проблемы и решения. М.: ГЕОС. 563 с.]

Velichko A.A., Kremenetsky K.V., Negendank J., Mingram J., Borisova O.K., Gribchenko Yu.N., Zelikson E.M., Klimanov V.A., Novenko E.Yu., Pirumova L.G., Pisareva V.V., Razumovsky L.V., Timireva S.N. 2001. Late Quaternary Paleogeography of Northeastern Europe (Based on the Data of a Comprehensive Study of Sediments of Lake Galichskoye) // News of RAN. Geographic Series. No. 3. P. 42-54. [in Russian; *Величко А.А., Кременецкий К.В., Негенданк Й., Минграм Й., Борисова О.К., Грибченко Ю.Н., Зеликсон Э.М., Климанов В.А., Новенко Е.Ю., Пирумова Л.Г., Писарева В.В., Разумовский Л.В., Тимирева С.Н.* 2001. Позднечетвертичная палеогеография северо-востока Европы (по данным комплексного изучения осадков Галичского озера) // Известия РАН. Серия географическая. № 3. С. 42-54.]

Vinther B.M., Clausen H.B., Johnsen S.J., Rasmussen S.O., Andersen K.K., Buchardt S.L., Dahl-Jensen D., Seierstad I.K., Siggaard-Andersen M.-L., Steffensen J. P., Svensson A., Olsen J., Heinemeier J. 2006. A synchronized dating of three Greenland ice cores throughout the Holocene // Journal of Geophysical Research. Vol. 111. P. X1-X9.

Walker M., Head M.J., Berkelhammer M., Svante B., Cheng H., Cwynar L.C., Fisher D., Gkinis V., Long A., Newnham R., Rasmussen S.O., Weiss H. 2019. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalisation of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes // Journal of Quaternary Science. Vol. 34. P. 173-186.

Wanner H., Beer J., Butikofer J., T. J. Crowley, U. Cubasch, J. Flückiger, H. Goosse, M. Grosjean, F. Joos, J.O. Kaplan, M. Küttel, S.A. Müller, I.C. Prentice, O. Solomina, T.F. Stocker, P. Tarasov, M. Wagner, M. Widmann. 2008. Mid- to Late Holocene climate change: an overview // Quaternary Science Reviews. Vol. 27. P. 1791-1828.

Wohlfarth B., Lacourse T., Bennike O., Subetto D., Tarasov P., Demidov I., Filimonova L., Sapelko T. 2007. Climatic and environmental changes in north-western Russia between 15,000 and 8000 cal yr BP: a review // Quaternary Science Reviews. Vol. 26. P. 1871-1883.

Wu H., Guiot J., Brewer S., Guo Z. 2007. Climatic changes in Eurasia and Africa at the last glacial maximum and mid-Holocene: reconstruction from pollen data using inverse vegetation modeling // Climate Dynamics. Vol. 29. P. 211-229.

Yershova E.G., Krenke N.A. 2014. Study of Natural and Cultural Landscapes of the Iron Age in the Moskva River Valley Using Palynology and Archeology Methods // Bulletin of Archeology, Anthropology and Ethnography. No. 3. P. 159-172. [in Russian; *Ершова Е.Г., Кренке Н.А.* 2014. Изучение природных и культурных ландшафтов железного века в долине Москвы-реки методами палинологии и археологии // Вестник археологии, антропологии и этнографии. № 3. С. 159-172.]

Zagwijn W.H. 1994. Reconstruction of climate change during the Holocene in western and central Europe based on pollen records of indicator species // Vegetation History and Archaeobotany. Vol. 3. P. 65-88.

Zernitskaya V.P., Matveev A.V., Timereva S.N. 2010. The History of the Ivanisovka Bog Formation (Belarusian Polesia) // Lithosphere. No. 1 (32). P. 20-30. [in Russian; *Зерницкая В.П., Матвеев А.В., Тимерева С.Н.* 2010. История формирования болота Иванисовка (Белорусское Полесье) // Літасфера. № 1 (32). С. 20-30.]

Zernitskaya V., Mikhailov N. 2009. Evidence of early farming in the Holocene pollen spectra of

Belarus // Quaternary International. Vol. 203. P. 91-104.

Zernitskaya V.P., Novenko E.Yu. 2016. Reconstruction of Belarusian Climate in the Late Glacial and Holocene // Engineering Journal: Science and Innovations. Vol. 9. No. 163. P. 21-24. [in Russian; *Зерницкая В.П., Новенко Е.Ю.* 2016. Реконструкция климата Беларуси в позднеледниковье и голоцене // Инженерный журнал: наука и инновации. Т. 9. № 163. С. 21-24.]

Zernitskaya V.P., Novenko E.Yu., Stanchikayte M., Vlasov B.P. 2019. Environmental Changes in the Late Ice Age and Holocene in the South-East of Belarus // Reports of the National Academy of Sciences of Belarus. Vol. 63. No. 5. P. 584-596. [in Russian; *Зерницкая В.П., Новенко Е.Ю., Станчикайте М., Власов Б.П.* 2019. Изменения окружающей среды в позднеледниковье и голоцене на юго-востоке Беларуси // Доклады НАН Беларуси. Т. 63. № 5. С. 584-596.]

ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2020, том 4, № 4, с. 105-112

ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 574.4; 574.5

ТРАНСФОРМАЦИЯ ОРНИТОФАУНЫ ДОЛИНЫ РЕКИ ПТАНЬ (ЮГО-ВОСТОК ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ) В УСЛОВИЯХ ПОСТОЯННОГО АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ[1]

© 2020 г. И.Б. Шаповалова

Институт водных проблем РАН
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: ibshapovalova@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.11.2020. После доработки 30.11.2020. Принята к публикации 01.12.2020.

В работе изложены материалы исследований по изучению состояния лесостепных пойменных экосистем (в том числе орнитокомплексов) в условиях усиливающегося антропогенного воздействия (пресса) и климатических изменений. В ходе проведенных работ были уточнены физико-географические особенности района исследований (рельеф, климатические условия), проведены повторные геоботанические и почвенные исследования территории и прибрежных орнитокомплексов поймы средней части р. Птань, расположенной в Куркинском районе на юго-востоке Тульской области. Были уточнены состав и структура компонентов, проанализированы материалы литературных источников и использованы данные весенне-летних орнитологических учетов за 2019-2020 год. Дана количественная оценка изменений отдельных компонентов наземной экосистемы речной поймы на севере лесостепной зоны (в том числе орнитокомплексов), а также экологических последствий для поймы, долины реки и водораздельных территорий вследствие воздействия природных и антропогенных факторов изменения водного режима территории. В пойменных орнитокомплексах была выявлена динамика обилия у популяций отдельных видов птиц под влиянием водного и антропогенного факторов, Они были определены в качестве наиболее чувствительного компонента наземных экосистем и выделены в группу индикаторных видов.

Ключевые слова: оценка, фактор воздействия, лесостепная зона, пойменные экосистемы, речная пойма, интразональный ландшафт, гидрологический режим, климат, видовой состав, численность, плотность населения, обилие, орнитокомплексы, популяция, болотно-околоводный комплекс.

DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10076

В ходе проведенных работ в 2020 г. на территории долины р. Птань на юго-востоке Тульской области были продолжены работы по изучению физико-географических особенностей района исследований, внесены уточнения в характеристику состава и структуры отдельных компонентов экосистем (почвы, растительность, животный мир) речной поймы р. Птань на севере лесостепной зоны. Продолжены исследования по изучению экологических последствий для поймы, долины реки и водораздельных территорий под воздействием природных и антропогенных факторов изменения водного режима территории (Шаповалова, 2019). Проведен анализ динамики наземных экосистем (на примере орнитокомплексов) под влиянием водного и антропогенного факторов.

В работе проанализированы материалы литературных источников, а также использованы и проанализированы данные весенне-летних орнитологических учетов за период 2019-

[1] Работа выполнена по теме НИР фундаментальных исследований ИВП РАН за 2018-2021 гг. «Моделирование и прогнозирование процессов восстановления качества вод и экосистем при различных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности» (№ 0147-2018-0002) № государственной регистрации АААА-А18-118022090104-8, раздел темы 2.6 «Эволюция наземных экосистем в изменяющихся природных условиях».

2020 гг. Дана экологическая характеристика и современная оценка состояния прибрежных орнитокомплексов (видового разнообразия, численности и обилия птиц болотно-околоводного комплекса) в условиях усиления антропогенной нагрузки, проведен количественный анализ численности и выявлена динамика в орнитокомплексах прибрежной полосы р. Птань за период 2019-2020 гг. Выявлены основные особенности трансформации среды, играющие роль ведущих факторов, оказывающих воздействие на изменение авиафауны долины реки Птань.

Основной *целью исследований* было выявить и проанализировать динамику орнитокомплексов долины реки Птань на юге Тульской области, а также выявить трансформацию в составе и структуре природных компонентов пойменных экосистем р. Птань (в том числе орнитофауны) в условиях постоянного антропогенного воздействия.

В *задачи исследования* входило уточнение состава и структуры природных компонентов речной поймы (в том числе орнитокомплексов), количественная оценка динамики экосистем долины реки Птань лесостепной зоны Тульской области в условиях возрастающего антропогенного воздействия и климатических изменений.

Основным *объектом исследований* выбраны орнитокомплексы речной долины лесостепной зоны центральных районов России, в качестве предмета исследований определена оценка трансформации орнитокомплексов на основании таких показателей, как видовое разнообразие, численность и плотность населения в пойменных условиях.

Материалы и методы

В работе были использованы как данные опубликованных литературных источников, так и комплексных экологических наблюдений, полученных в период с мая по август 2019-2020 гг. на р. Птань, протекающей на юго-востоке Тульской области. Для анализа населения птиц в отдельных ландшафтных выделах использована бальная шкала (табл. 1; Кузякин, 1962; Валуев, 2007). Орнитологические исследования выполнены по стандартным методикам (маршрутные и точечные учёты в трансектах заданной величины) в сочетании с работой на стационарах (Равкин, 1967; Ларина и др., 1981; Vergeles, 1994). Русские и латинские названия таксонов птиц приводятся в соответствии со сводкой Л.С. Степаняна (1990, 2003) и Е.В. Коблика с соавторами (2006), типы фауны – по Б.К. Штегману (1938) с некоторыми изменениями и дополнениями (Равкин, 1967). В работе использована методика оценки трансформации орнитофауны болотно-околоводного комплекса при изменении водного режима, где учитывался фактор интразональности (Шаповалова, 2018). Исследования орнитофауны в районе работ проведены в соответствии с особенностями ботанико-географического районирования Тульской области (Шереметьева, 1988, 1999; Шереметьева и др., 2008).

Результаты и обсуждение

Итогом проведенных исследований стал количественный анализ трансформации пойменной экосистемы долины реки Птань и уточнение состава и структуры ее компонентов. Для этой территорий, расположенной на севере лесостепной зоны (Шаповалова, 2019), установлены некоторые особенности.

- Птань является малой рекой равнинного типа и расположена в лесостепной зоне. Ее пойма подвержена интенсивной хозяйственной деятельности человека. Территория ее бассейна имеет не ярко выраженную овражно-балочную систему.
- Климат района исследований – умеренно континентальный. Почвы представлены

выщелоченными и оподзоленными глинистыми черноземами мелкокомковатой структуры.

- Растительность поймы отличается большим разнообразием с преобладанием лугово-степных видов. Лесистость невелика − 3-5% от общей площади территории Куркинского района, что обусловлено особенностями лесостепной зоны и хозяйственной деятельностью человека (вырубки, излишняя эксплуатация площадей под распашку и выпас скота).
- В ходе работ в районе исследований было зарегистрировано 105 видов птиц, которые относятся к 11 отрядам и 24 семействам. Из них 104 вида постоянно гнездятся и составляют 65% от общей (182 вида) гнездовой фауны Тульской области.
- По видовому богатству преобладают лимнофильная и дендрофильная группы видов − 36.2% и 42%, наибольшей общей плотностью обладает группа дендрофильных видов − 1203.4 ос./км², за ней следует группа склерофильных видов − 860.8 ос./км² (рис. 1).
- По обилию среди дендрофильных видов наибольшим видовым богатством обладает группа многочисленных видов (CC) – 25, тогда как у лимнофильных видов выделяется группа обычных (C) – 14 и малочисленных (R) – 11 видов.

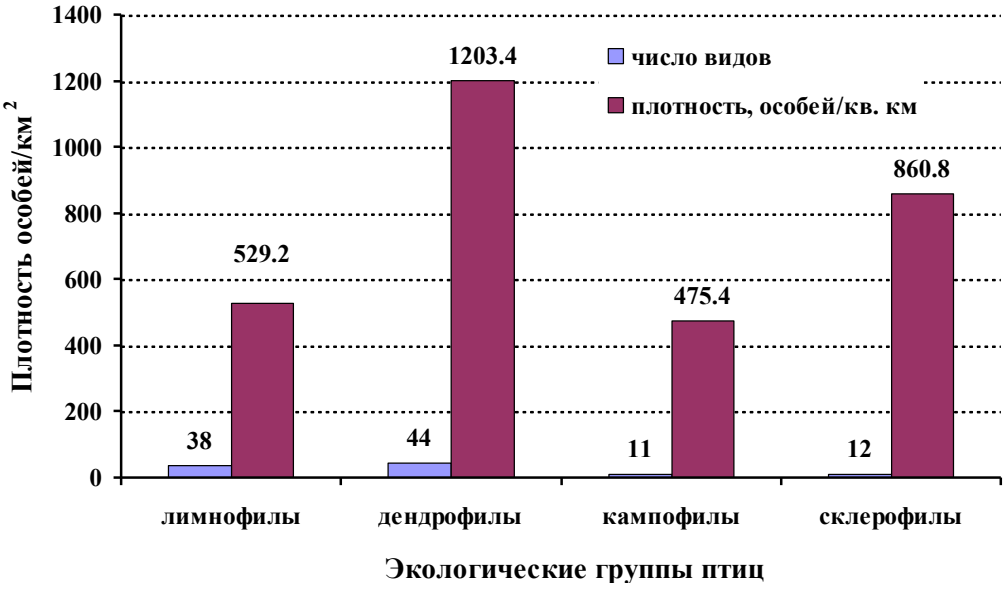


Рис. 1. Соотношение видового разнообразия и плотности птиц разных экологических групп.
Fig. 1. The correlation between species diversity and birds' density in different ecological groups.

В ходе работ было проведено сравнение результатов обилия, полученных за гнездовой период с 2019 по 2020 год, и установлено, что в целом в 2020 году в прибрежном орнитокомплексе долины р. Птань суммарное обилие птиц всех экологических групп было ниже по сравнению с 2019 годом, среди которых преобладает дендрофильная группа многочисленных видов птиц (рис. 2).

Вероятно, это было связано с повышенным количеством осадков в мае и июле в 2020 году по сравнению с 2019 годом, что привело к разрастанию прибрежной растительности и изменению некоторых гнездовых стаций, ставших малопригодными для гнездования, отдыха и поиска корма у некоторых видов птиц, что впоследствии вызвало сокращение их численности и общую трансформацию внутри орнитокомплекса дельты р. Птань. Например, зарастание заливных лугов ивовым подростом спровоцировало снижение численности некоторых видов болотно-околоводного комплекса (желтой трясогузки, бекаса, чибиса и др.).

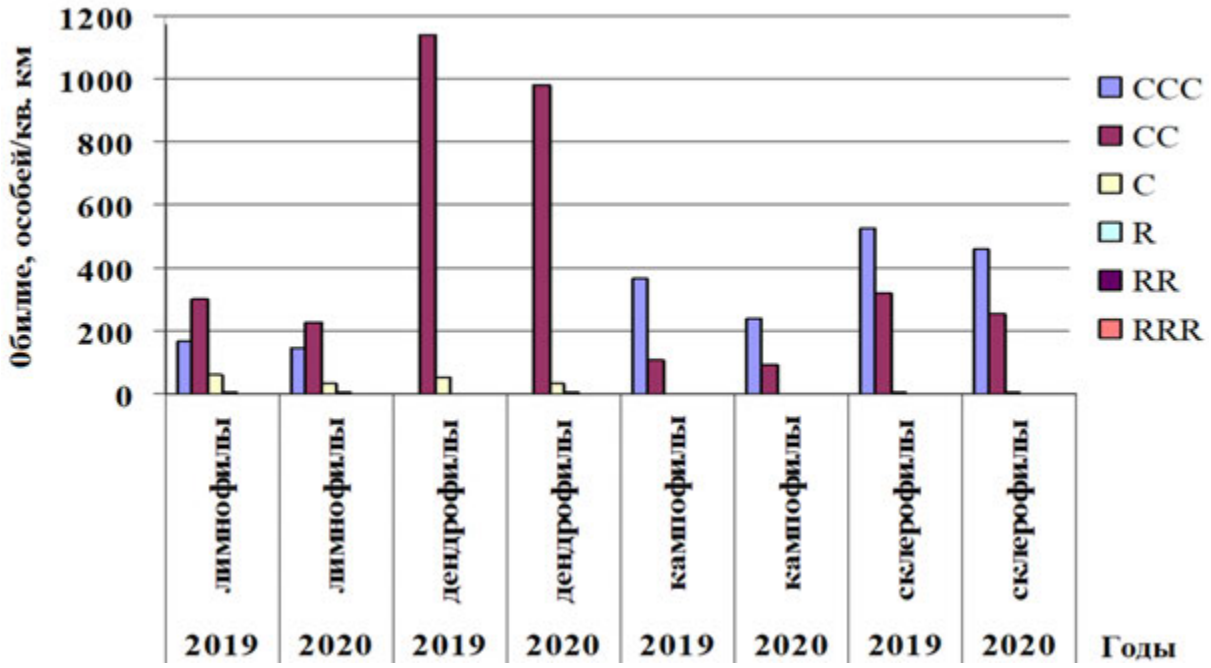


Рис. 2. Сравнение обилия птиц разных экологических групп в гнездовой сезон в долине р. Птань в зональных условиях лесостепи за период с 2019 по 2020 гг. **Fig. 2.** Comparison of the birds' abundance in different ecological groups during the breeding season in the Ptan River valley under the forest-steppe zonal conditions for 2019-2020.

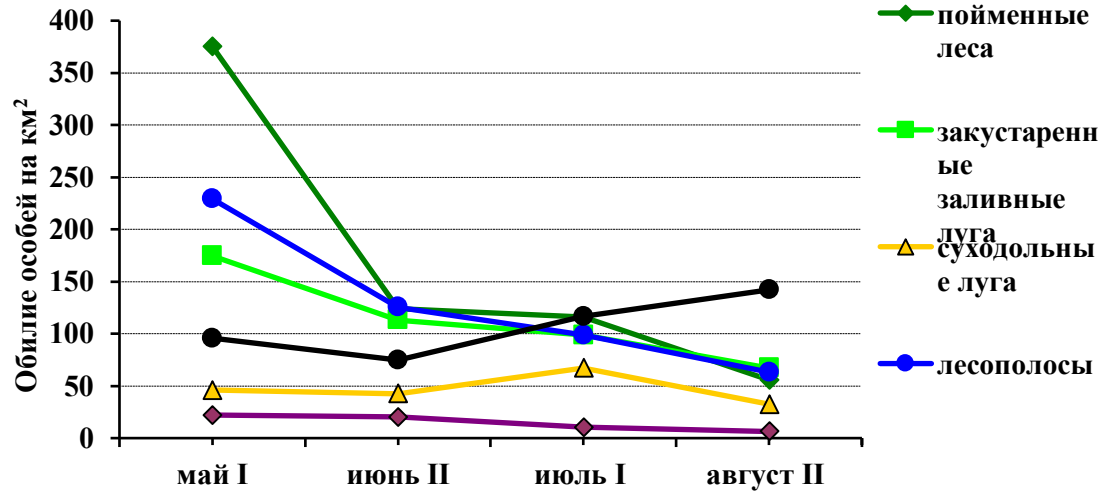
При анализе видового богатства в послегнездовой период отмечено снижение общего числа видов птиц в биотопах с преобладанием древесной и кустарниковой растительности (не более 15), т.к. в это время для птиц характерны активные кочевки, на которых в поисках корма они предпочитают открытые пространства. Также в послегнездовой период отмечено усиление различий по видовому разнообразию на 5 и более видов в разных биотопах, в основном за счет нерегулярно встречающихся видов (глухая кукушка, обыкновенная горлица, садовая овсянка, черный дрозд).

По показателям обилия в каждом из выделенных типов биотопа в 2020 году наблюдалось общее сокращение численности птиц в июле, в послегнездовой период, по сравнению с 2019 годом (рис. 3). По суммарному обилию заметно выделяется гнездовое население птиц пойменных лесов, закустаренных заливных лугов и лесополос (более 500 особей/км^2). В послегнездовой период стоит отметить увеличение биоразнообразия в поселках, хотя в остальных биотопах оно снижается более чем в три раза. Минимальным обилием в течение лета характеризуется население птиц суходольных лугов и полей (агроландшафтов) – менее 200 особей/км^2. При этом в остальных биотопах в 2020 году отмечено общее снижение обилия птиц в среднем за лето, а особенно в лесных массивах, где оно снизилось в 4-5 раз (рис. 3).

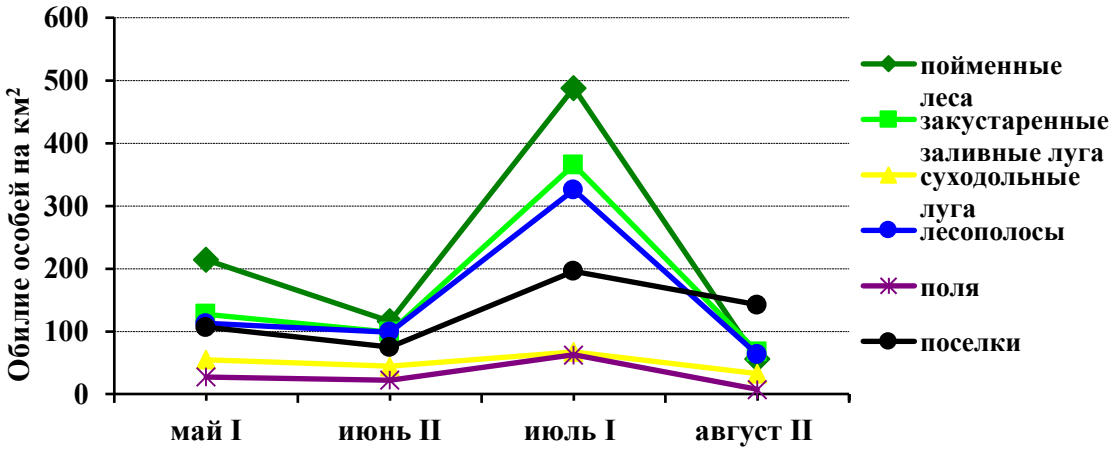
В процессе исследования установлено, что состав доминирующих видов 2020 года совпадает с составом 2019 года. В составе доминантов по обилию отмечено 25 видов: 23 – в гнездовой период, 9 – в послегнездовой. Некоторые виды доминировали в нескольких местообитаниях или же в течение сезона. Выявлено, что в гнездовой период 2020 г. в *широколиственных лесных местообитаниях* (*лесополосы* с примесью березняка) первое место по обилию занимает зяблик *Fringilla coélebs* (около 30%), большая синица (25%) и зарянка (17%). В 2019 г. данные виды также доминировали в этих биотопах (35% и 22%), но

к ним добавились дрозд-рябинник (17%), певчий дрозд (10%) и горихвостка (7%).

В *пойменных лесах* в гнездовой период среди доминантных видов в 2019 году регулярно отмечались дрозд-рябинник (15%), обыкновенный соловей (20%), белая трясогузка (8%), серая славка (13%), серая мухоловка (7%) и большая синица (31%), которая занимала первое место по обилию на протяжении всего периода исследований (2019-2020 гг.). Однако в 2020 году к большой синице (32%) присоединились обыкновенный соловей (23%) и дрозд-рябинник (18%). В 2020 году они лидировали по обилию в пойменных лесах.



А)



Б)

Рис. 3. Динамика суммарного обилия гнездового населения птиц в весеннее-летний период на различных местообитаниях долины р. Птань в лесостепной зоне: А) – 2020 г., Б) – 2019 г. *Условные обозначения.* Римскими цифрами (I, II) обозначенен временной период, когда были проведены исследования – I – первая половина месяца (май I); II – вторая половина месяца (август II). **Fig. 3.** The dynamics of the total abundance of the birds' nesting population in the spring-summer period in various habitats of the Ptan River valley in the forest-steppe zone: A) – 2020, Б) – 2019. *Legend.* Roman numerals (I, II) indicate the time period when the research was conducted – I – the first half of the month (may I); II – the second half of the month (August II).

На *прибрежных участках поймы в тростниково-камышовых зарослях* с примесью лоха узколистного преобладали тростниковая камышевка (33%), камышевка-барсучок (31%),

варакушка (17%), серая славка (15%) и речной сверчок (10%). Также в этом типе биотопа достаточно был обычен болотный лунь и серая цапля.

На *открытых пространствах закустаренных заливных лугов* в период исследования доминировали желтоголовая трясогузка (27%) и белая трясогузки (24%), луговой чекан (21%), камышовая овсянка (9%), а также чибис (7%). Однако по сравнению с 2019 г. состав лидеров в этих биотопах немного изменился. Ввиду сильного закустаривания и зарастания ивовым подростом открытых луговых участков и уменьшения их площади такие виды, как камышовая овсянка и чибис, вышли из состава доминирующих видов. В населении птиц *закустаренных участков заливных лугов* в числе лидеров присутствовали луговой чекан (35%), обыкновенная овсянка (20%), чечевица (12%), серая славка (25%) и садовая камышевка (10%), а также садовая славка (15%).

В *послегнездовой период 2020 г.* во всех обследованных лесных местообитаниях (пойменный леса, лесополосы) первое место по обилию занимала большая синица (35%). На открытых пространствах – луговой чекан (34%), обыкновенный жаворонок (27%), полевой воробей (37%) и белая трясогузка. Это наблюдалось и в 2019 г. Лишь на открытых пространствах (зарастающие заливные и суходольные луга) доминируют луговые виды (белая трясогузка, луговой чекан). В поселках первое место по обилию в течение лета занимали: полевой воробей (56%), деревенская ласточка (34%), воронок (10%). Состав доминирующих видов здесь относительно стабилен как в течение одного сезона, так и по годам. Отсутствие интенсивного скотоводства и сокращение сельскохозяйственной деятельности на участке исследований привели к закустариванию значительной части луговых площадей и уменьшению площадей открытых луговых участков поймы, что вызвало сокращение кормовых угодий ласточек и снижение их обилия.

Выводы

В результате сложившихся в районе исследования климатических условий в 2020 г. в послегнездовой период число отмеченных видов снизилось в 2-3 раза по сравнению с 2019 г. Такие изменения возможны, поскольку в послегнездовое время население птиц более подвижно и его показатели подвержены бóльшим межгодовым колебаниям, чем в гнездовой период (Граждан, 2002; Рахимов, 2002).

Кроме того, этому, очевидно, способствовало прохладное и сырое лето 2020 г. Исследователи отмечают влияние погодных условий (средней температуры весны и июня, количества осадков в гнездовой период и др.) на межгодовую динамику суммарных показателей гнездящихся птиц (Головатин, 2001; Граждан, 2002).

Население птиц всех обследованных местообитаний в 2020 г. характеризуется эмиграционным типом динамики летнего обилия (рис. 3, А), что отражает, скорее всего, погодные условия этого года (лето было дождливым и холодным). У многих видов не было возможности выкормить полноценные выводки, поэтому в период вылета молодого поколения не произошло заметного всплеска численности птиц. Такие тенденции слабо просматривались только в населении птиц закустаренных заливных лугов.

В отличие от 2020 г., в середине лета 2019 г. наблюдался массовый вылет слетков, за счет чего в районе исследований в целом преобладал пирамидальный тип летней динамики сообществ птиц. В биотопах пойменных лесов и лесополос на его фоне отмечались даже иммиграционные тенденции, а в поселках и на закустаренных заливных лугах воздействие иммиграционных процессов сочеталось с равновесно-динамическими, когда птицы активно совершали кормовые кочевки в послегнездовой период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Валуев В.А. 2007. Подход к оценке обилия хищных птиц // Сохранение разнообразия животных и охотничье хозяйство России. М.: МСХА имени К.А. Тимирязева. С. 350-351. Государственный водный реестр РФ: Птань [Электронный ресурс http://textual.ru/gvr/index.php?card=169920 (дата обращения 22.08.2019)].

Головатин М.Г. 2001. Связь динамики населения воробьиных птиц Субарктики с изменением климатических условий. Материалы международной конференции «Актуальные проблемы изучения и охраны птиц Восточной Европы и Северной Азии». Казань. С. 180-181.

Граждан К.В. 2002. Межгодовые отличия населения птиц Северо-Восточного Алтая (в начале 60-х и конце 90-х гг. XX в.). Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Новосибирск, Россия. 23 с.

Джапова Р.Р. 2007. Динамика растительного покрова Ергенинской возвышенности и Пркаспийской низменности в пределах республики Калмыкия. Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, Биологический факультет. 47 с.

Коблик Е.А., Редькин Я.А., Архипов В.Ю. 2006. Список птиц Российской Федерации. М.: Товарищество научных изданий КМК. 256 с.

Кузякин А.П. 1962. Зоогеография СССР // Ученые записки Московского областного педагогического института имени Н.К. Крупской. Т. 109. С. 3-182.

Ларина Н.И., Голикова В.Л., Лебедева Л.А. 1981. Учебное пособие по методике полевых исследований экологии наземных позвоночных. Саратов: Издательство Саратовского университета. 120 с.

Новикова Н.М., Конюшкова М.В., Уланова С.С. 2018. Постмелиоративное состояние растительности на агроземах на Приергенинской равнине (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. Т. 24. № 3 (76). С. 74-88. [*Novikova N.M., Konyushkova M.V., Ulanova S.S.* 2018. Vegetation Restoration on Reclaimed Soils on the Peri-Yergenian Plain (Republic of Kalmykia) // Arid Ecosystems. Vol. 8. No. 3. Pp. 213-224.]

Равкин Ю.С. 1967. К методике учета птиц в лесных ландшафтах // Природа очагов клещевого энцефалита на Алтае (Северо-Восточная часть). Новосибирск: Наука. С. 66-75.

Рахимов И.И. 2002. Авифауна Среднего Поволжья в условиях антропогенной трансформации естественных природных ландшафтов. Казань: Новое знание. 272 с.

Степанян Л.С. 1990. Конспект орнитологической фауны СССР. М.: Наука. 728 с.

Степанян Л.С. 2003. Конспект орнитологической фауны России и сопредельных территорий (в границах СССР как исторической области). М.: Академкнига. 806 с.

Штегман Б.К. 1938. Основы орнитогеографического деления Палеарктики // Фауна СССР: Птицы. Т. 1. Ч. 2. М.-Л.: Издательство АН СССР. 160 с.

Шаповалова И.Б. 2018. Методика оценки состояния прибрежных орнитокомплексов на примере искусственных водоемов сухостепной зоны юга России (республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. Т. 24. № 4 (77). С. 58-65. [*Shapovalova I.B.* 2018. A Technique for Assessment of the State of Shore Ornithocomplexes Based on the Example of Artificial Reservoirs of the Dry-Steppe Zone in Southern Russia (Republic of Kalmykia) // Arid Ecosystems. Vol. 8. No. 4. P. 279-285.]

Шаповалова И.Б. 2019. Орнитофауна долины реки Птань в условиях антропогенного воздействия (юго-восток Тульской области) // Экосистемы: экология и динамика. Т. 3. № 3. С. 125-142.

Шаповалова И.Б. 2020. Динамика гнездового населения птиц долины реки Птань в условиях антропогенного воздействия (юго-восток Тульской области) // Экосистемы: экология и динамика. Т. 4. № 4. (7 страниц, в печати).

Шаповалова И.Б. 2020. О гнездовании некоторых редких видов птиц на побережье в верховье р. Птань на территории Тульской области // Проблемы региональной экологии. № 5 (6 страниц, в печати).

Шереметьева И.С. 1988. Флора Тульской области: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М. 24 с.

Шереметьева И.С. 1999. Флора Тульской области. Дисс. ... канд. биол. наук. М.: МГУ. 528 с.

Шереметьева И.С., Хорун Л.В., Щербаков А.В. 2008. Конспект флоры сосудистых растений Тульской области. Тула: Гриф и К. 274 с.

Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. 2004. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена. 341 с.

Vergeles Yu.I. 1994. Quantitative counts of bird population: a methodological review. Berkut. No. 3 (1). P. 43-48.

UDC 574.4; 574.5

TRANSFORMATION OF ORNITOFAUNA IN THE PTAN RIVER VALLEY (SOUTHEAST OF TULA REGION) UNDER THE CONSTANT ANTHROPOGENIC IMPACT

© 2020. I.B. Shapovalova

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119333, Moscow, Gubkina Str., 3. E-mail: ibshapovalova@yandex.ru

Received November 20, 2020. Revised November 30, 2020. Accepted December 01, 2020.

The paper presents research materials on the study of the state of forest-steppe floodplain ecosystems (including ornithocomplexes) under conditions of increasing anthropogenic impact (pressure) and climatic changes. For this work the physical and geographical features of the research area (relief, climatic conditions) were clarified, and geobotanical and soil studies were carried out for a second time for the territory and coastal bird complexes of the floodplain of the middle part of the Ptan River (Kurkinsky District, Southeast of Tula Region). We clarified the composition and structure of the floodplain ecosystem components, analyzed the literature sources and used the data from reconnaissance spring-summer ornithological surveys of 2019. A quantitative assessment of changes in individual components of the land ecosystem of the river floodplain in the north of the forest-steppe zone (including ornitocomplexes) was given. The environmental consequences for the floodplain, river valley and watershed areas due to the impact of natural and anthropogenic factors of changes in the water regime of the territory are presented. We revealed the dynamics of abundance of certain bird species populations in floodplain ornithocomplexes under the influence of water and anthropogenic factors. They were identified as the most sensitive components of land ecosystems and were marked as a group of indicator species.

Keywords: evaluation, influencing factor, forest-steppe region, species composition, abundance, population abundance, richness, floodplain ecosystems, river floodplain, intrazonal landscape, hydrological regime, climate, ornithocomplex, population, wetland complex.
DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10076