

Посвящается 270-летию Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова

СОДЕРЖАНИЕ

Теория и методология

- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Поповичева О.Б., Чалов С.Р., Безбердая Л.А.,
Власов Д.В., Ерина О.Н., Лычагин М.Ю., Чичаева М.А., Шинкарева Г.Л.
Экогеохимия микрочастиц в окружающей среде..... 3
- Александрова А.Ю., Домбровская В.Е. Пространственно-временные изменения
мирового туристского рынка в крупнейшие кризисы начала XXI в. 24

География и экология

- Баранчуков В.С., Березкин В.Ю., Колмыкова Л.И., Данилова В.Н., Долгоносов А.А.
Распределение иода и селена в почвах и подземных водах сельской
местности Орловской области как фактор риска заболеваемости раком
щитовидной железы..... 41
- Егидарев Е.Г. Эколого-ландшафтное зонирование прибрежной зоны
Владивостокской агломерации..... 56
- Рыбаков Д.С. Изменчивость загрязненности токсичными элементами реки
Неглинки в Петрозаводске в летний период..... 73

Методы географических исследований

- Иглин С.М., Морейдо В.М., Головин К.И. Прогнозирование редких
гидрологических явлений методами машинного обучения на примере
ледовых заторов на реке Печоре..... 87
- Чалов Р.С., Голубцов Г.Б., Куракова А.А. Прямолинейные неразветвленные русла:
морфологическое разнообразие и типизация..... 98

Региональные исследования

- Никитин Л.В. Роль Канады в мировой банковской системе (1970-е – начало 2020-х гг.)..... 110
- Шатило Д.П. Доходы жителей европейских столиц и расселение иммигрантов..... 120
- Денисова И.С., Лошков О.Д., Самохин М.А., Чалов С.Р. Формирование водного
стока малой городской реки Сетуни (Москва)..... 134
- Ван П.С., Шарая Л.С., Ван Г.В. Закономерности распределения елово-пихтовых
и дубовых лесов заказника «Удьяль» (Нижнее Приамурье)..... 145
- Газизова Т.Ю., Русанов А.Г., Сапелко Т.В., Лапенков А.Е. Субрецентные спорово-
пыльцевые спектры донных отложений озер Кургальского полуострова
(Балтийское море)..... 158
- Чукаева М.А., Кошенкова А.А., Малыгин Н.А., Борисова Д.Д., Анамов Д.Ф.
Биогеохимическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почвенно-
растительного покрова Канонерского острова..... 170

CONTENTS

Theory and methodology

<i>Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Popovicheva O.B., Chalov S.R., Bezberdaya L.A., Vlasov D.V., Erina O.N., Lychagin M.Yu., Chichaeva M.A., Shinkareva G.L.</i> Ecogeochemistry of microparticles in the environment.....	3
<i>Aleksandrova A.Yu., Dombrovskaya V.E.</i> Spatial and temporal changes of the world tourist market during the major crises of the early 21st century.....	24

Geography and ecology

<i>Baranchukov V.S., Berezkin V.Yu., Kolmykova L.I., Danilova V.N., Dolgonosov A.A.</i> Distribution of iodine and selenium in soils and groundwater of rural areas in the Oryol region as a risk factor for thyroid cancer.....	41
<i>Egidarev E.G.</i> Ecological and landscape zoning of the coastal zone of the Vladivostok agglomeration.....	56
<i>Rybakov D.S.</i> Variability of toxic pollution of the Neglinka river in Petrozavodsk in summer.....	73

Methods of geographical studies

<i>Iglin S.M., Moreido V.M., Golovnin K.I.</i> Forecasting rare hydrological events by machine learning methods: case study of ice jams on the Pechora river	87
<i>Chalov R.S., Golubtsov G.B., Kurakova A.A.</i> Straight-line non-branching channels: morphological diversity and typification	98

Regional studies

<i>Nikitin L.V.</i> Canada's role in the global banking system (1970s – early 2020s).....	110
<i>Shatilo D.P.</i> Incomes of residents in west European capitals and the immigrants' settlement pattern.....	120
<i>Denisova I.S., Loshkov O.D., Samokhin M.A., Chalov S.R.</i> Runoff formation in the small urban Setun river (Moscow).....	134
<i>Van P.S., Sharaya L.S., Van G.V.</i> Regularities of spruce-fir and oak forests distribution over the Udyl' State Nature Reserve (the lower Amur River region).....	145
<i>Gazizova T.Yu., Rusanov A.G., Sapelko T.V., Lapenkov A.E.</i> Subrecent pollen spectra in lake sediments of the Kurgalsky peninsula (the Baltic sea).....	158
<i>Chukaeva M.A., Koshenkova A.A., Malygin N.A., Borisova D.D., Anamov D.F.</i> Biogeochemical assessment of heavy metal contamination of soil and vegetation cover of the Kanonersky island	170

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК: 504.3.054; 614.76; 551.577; 628.193

ЭКОГЕОХИМИЯ МИКРОЧАСТИЦ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Н.С. Касимов¹, Н.Е. Кошелева², О.Б. Поповичева³, С.Р. Чалов⁴, Л.А. Безбердая⁵,
Д.В. Власов⁶, О.Н. Ерина⁷, М.Ю. Лычагин⁸, М.А. Чичаева⁹, Г.Л. Шинкарева¹⁰

^{1, 2, 5, 8, 9} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, НИИ ядерной физики

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра гидрологии суши

⁶ Университет штата Иллинойс, кафедра географии, геологии и окружающей среды

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
Красновидовская станция

¹⁰ Государственный университет Среднего Теннесси, кафедра наук о Земле

¹ Академик, проф., д-р геогр. наук; e-mail: nskasimov@geogr.msu.ru

² Проф., д-р геогр. наук; e-mail: natalk@mail.ru

³ Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: olga.popovicheva@gmail.com

⁴ Проф., д-р геогр. наук; e-mail: hydroserg@mail.ru

⁵ Мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: lilia_8888@mail.ru

⁶ Ассистирующий проф.-инструктор, канд. геогр. наук; e-mail: vlasov.msu@gmail.com

⁷ Зав. станцией, канд. геогр. наук; e-mail: tamiblack@yandex.ru

⁸ Доц., канд. геогр. наук; e-mail: lychagin@geogr.msu.ru

⁹ Науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: shamora777@yandex.ru

¹⁰ Ассистирующий проф., канд. геогр. наук; e-mail: galina.shinkareva@gmail.com

Представлены результаты новейших исследований эмиссии и распределения микрочастиц в окружающей среде на основе мониторинга и оценки эколого-геохимического состояния урбанизированных территорий и речных бассейнов. Разработаны научные основы и технологии геохимического анализа микрочастиц в атмосфере (аэрозоли, снег, дожди), педосфере (городские почвы, дорожная пыль) и наземной гидросфере (растворенные и взвешенные формы химических элементов в водной массе, донные отложения). Показано, что анализ микрочастиц имеет ключевое значение для понимания механизмов загрязнения компонентов окружающей среды и формирования техногенных геохимических аномалий в Московской агломерации и других городах. Установлена ассоциация химических элементов (сурьма, кадмий, медь, вольфрам, цинк, свинец, висмут, олово, молибден), накапливающихся практически во всех компонентах городской среды.

При множественности источников загрязнения для количественной оценки вкладов источников в загрязнение исследуемых сред использована технология Source Apportionment. С помощью рецепторной модели PMF впервые определены вклады пылевых, транспортных и промышленных источников в загрязнение атмосферы Москвы, необходимые для оценки качества воздуха и геохимической нагрузки на наземные ландшафты. Влияние дальнего переноса оценивалось путем расчета вероятных направлений (обратных траекторий) адвекции воздуха по транспортно-дисперсионной модели NOAA HYSPLIT. Возможные источники металлов и металлоидов (ММ) в микрочастицах дорожной пыли Москвы выявлены с помощью модели PCA-MLR. Статистический анализ экспериментального материала позволил установить основные факторы и механизмы, определяющие пространственную структуру загрязнения дорожной пыли и городских почв ММ, а также их важнейшие фазы-носители, специфичные для разных источников загрязнения. На основе исследований крупнейших рек страны разработаны методология и технология гидрогеохимического анализа речных бассейнов, включающего высокочастотную (суточную, недельную), сезонную и многолетнюю изменчивость гидрологических параметров, растворенных и взвешенных форм химических элементов, их распределения в микрочастицах, а также потоков элементов в речных бассейнах.

Ключевые слова: микрочастицы, химический анализ, аэрозоли, наземные и аквальные ландшафты, загрязнение, идентификация источников, техногенное воздействие

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.1

ВВЕДЕНИЕ

Ответом на экологические вызовы «грязной» научно-технической революции 1960–1970-х гг. стало появление в науках о Земле геоэкологии, геохимии окружающей среды, экологической геологии и др., а на основе методологии геохимии ландшафтов – экогеохимии ландшафтов, основные задачи которой – изучение антропогенного воздействия на окружающую среду, ландшафты, речные бассейны источников загрязнения, сосредоточенных в городских агломерациях, агроландшафтах и др. [Касимов, 2013]. В Московском университете развитие экогеохимии ландшафтов связано с трудами М.А. Глазовской, А.И. Перельмана и их учеников [Геохимия..., 2012; 2017]. Основным объектом исследований стали урбанизированные территории, районы разработки рудных месторождений, добычи нефти и газа, падения ступеней космических ракет [Экогеохимия..., 1995; Нефть..., 2008; Касимов и др., 2016]. В последние 15 лет главным полем развития современных подходов и методов экогеохимии городов, оценки их экологического состояния стал Московский мегаполис [Касимов и др., 2023; Kasimov et al., 2024].

Эколого-геохимическая оценка городской среды традиционно базируется на концепции депонирующих сред, в которых накапливаются и трансформируются продукты техногенеза [Геохимия..., 1990]. Для геохимической индикации многолетнего загрязнения городских ландшафтов в качестве депонирующей среды используются почвы. В последнюю четверть века важное место в оценке загрязнения городов заняла дорожная пыль, состоящая из твердых частиц разного размера, выпадающих из атмосферы, выбросов автотранспорта и промышленности, фракций городских почв [Acosta et al., 2011; Amato et al., 2016; Ладонин, Михайлова, 2020; Kasimov et al., 2020; Harrison et al., 2021; Vlasov et al., 2021c; Ivaneev et al., 2023]. В зимний период таким индикатором является снежный покров, накапливающий атмосферные выпадения и твердофазное вещество противогололедных реагентов [Касимов и др., 2016; Vlasov et al., 2020; Московченко и др., 2021; Borris et al., 2021].

Интерес к мелкодисперсным взвешенным частицам (particulate matter, PM) возник в 1990-х гг. при изучении атмосферных аэрозолей [Dockery, Pope, 1994]. В дальнейшем микрочастицы диаметром до 10 мкм стали одним из основных индикаторов загрязнения воздушной среды, почв и дорожной пыли. Для их обозначения принята единая система размерности (PM) с цифровым индексом, показывающим максимальный диаметр анализируемых частиц. Частицы диаметром менее 10 микрон (PM₁₀) обогащаются металлами и металлоидами (MM) за счет большей удельной площади поверх-

ности, сорбционной емкости и емкости катионного обмена, увеличения количества органического вещества и содержания глинистых минералов с одновременным уменьшением доли кварца в минералогическом составе по сравнению с более крупными частицами [Gunawardana et al., 2014].

В урбанизированных районах высокие темпы выбросов загрязняющих веществ приводят к накоплению в окружающей среде микрочастиц разного размера и химического состава, образующихся в антропогенных (транспорт, промышленная деятельность, жилой сектор) и природных (почва, лесные пожары) источниках. Наибольшую опасность представляют фракции PM₁₀ и PM_{2,5}, содержание которых является критерием качества воздуха. Высокая концентрация вдыхаемой фракции частиц PM_{2,5} рассматривается как фактор влияния загрязненной атмосферы на здоровье населения. MM в составе аэрозолей оказывают токсическое воздействие на организм человека. Поэтому в целях экологического мониторинга и оценки состояния окружающей среды переход от использования общих (валовых) содержаний химических элементов и соединений к изучению фракционного состава вещества ее различных компонентов является одной из важнейших эколого-геохимических инноваций последнего времени.

Состояние городской среды находится под воздействием множества техногенных источников выбросов, что создает сложную пространственную и временную структуру геохимической нагрузки на городскую среду. Изучение источников и уровней концентраций токсичных элементов и соединений в ее компонентах является одной из важнейших задач мониторинга экологического состояния и загрязнения атмосферы и педосферы [Rai et al., 2020; Касимов и др., 2023]. Развитие технологии оценки экологического состояния городской среды московского мегаполиса на основе анализа химического состава микрочастиц в системе «атмосфера – снег – дорожная пыль – почвы – поверхностные воды» (рис. 1) показало высокую пространственно-временную изменчивость природных и антропогенных источников загрязнений в московском мегаполисе [Касимов и др., 2023], что обуславливает необходимость исследований, направленных на глубокое изучение геохимических закономерностей функционирования урбогеосистем.

Миграция химических элементов с твердым стоком зависит от их происхождения, геохимических условий и гидрологической обстановки. Важнейшим свойством многих MM является дифференциация по крупности частиц и максимальная токсичность для водных организмов наиболее биодоступных микрочастиц диаметром менее 10 мкм. Вопросы, связанные с транспортом MM в составе

микрочастиц, являются практически неизученными в российской и мировой практике. Для их исследования используют анализ соотношения растворенных (dissolved) и взвешенных (suspended, particulate) форм миграции элементов (*DS*-анализ) в зависимости от свойств компонентов ландшафтов на территории бассейнов, анализ соотношения концентраций ММ в гранулометрических фракциях частиц, оценку потоков ММ во взвешенной и растворенной формах [Касимов и др., 2016; 2023]. Исследования, проводимые авторами в последнее десятилетие, позволили развить основы современного гидрогеохимического анализа речных бассейнов

[Эколого-географический..., 2019]. Этот подход имеет особое значение при оценке экологического состояния территорий активного хозяйственного освоения, где формирование химического состава речного стока находится под сильным влиянием антропогенных источников – городов, горнодобывающих центров, интенсивного земледелия и др., которые представляют собой в экологическом плане так называемые «горячие точки», определяющие напряженность экологической ситуации в речных бассейнах. Особенностью влияния таких источников является резкое увеличение доли взвешенных форм в общем содержании элементов.

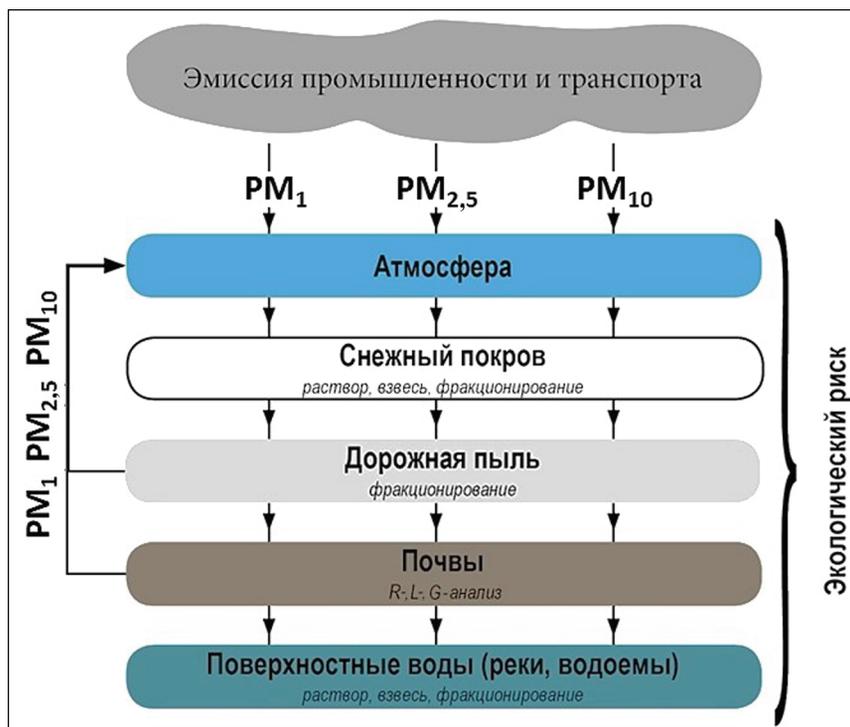


Рис. 1. Потоки микрочастиц в городских ландшафтах

Fig. 1. Microparticle flows in urban landscapes

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эколого-геохимические исследования проводились в московском мегаполисе, городах и реках Азовско-Черноморского региона (Ялта, Алушта, Севастополь, Керчь, Таганрог, реки Крыма, устья Дона и Кубани), в Байкальском регионе (гг. Улан-Батор, Дархан, Эрденет, Улан-Удэ, Закаменск, Гусиноозерск, Байкальск, Северобайкальск), реках бассейна Селенги и других притоках оз. Байкал, устьях сибирских рек (Обь, Енисей, Лена, Колыма, Пур, Таз), городах на севере Западной Сибири, находящихся под влиянием нефтегазового комплекса (Салехард, Надым, Новый Уренгой, Ноябрьск). На основе экспедиционных исследований 2011–2022 гг.

созданы крупнейшие информационные базы данных, включающие содержание более 50 химических элементов в компонентах ландшафтов московского мегаполиса и других городов (более 100 тыс. элементо-определений), воде и речной взвеси 14 крупных рек России (более 150 тыс. элементо-определений), выполненных в одной лаборатории масс-спектральным (ICP-MS) и атомно-эмиссионным (ICP-AES) методами с индуктивно-связанной плазмой. Методология, методика и результаты этих исследований опубликованы в серии статей, приведенных в двух дайджестах [Химический состав..., 2023; Воздушные и водные потоки..., 2024], а также в монографиях [Касимов и др., 2016; 2022].

Во время полевых работ велись наблюдения на базовых станциях мониторинга атмосферы и речных вод и геохимическая съемка почв, снежного покрова и дорожной пыли. Частота наблюдений обеспечила оценку суточной изменчивости состава аэрозолей и атмосферных осадков, сезонную – снежного покрова, дорожной пыли и поверхностных вод, многолетнюю – почвенного покрова. Мониторинг химического состава аэрозолей и атмосферных осадков проводился на специально созданном Аэрозольном комплексе, находящемся на территории Метеообсерватории МГУ, что позволило оценить качество воздуха и геохимическую нагрузку на городские территории по концентрациям химических элементов и соединений в микрочастицах [Семенова, Поповичева, 2023; Popovicheva et al., 2024a; Popovicheva et al., 2024b]. Инструментальный аэрозольный комплекс оборудован автоматизированными счетчиками для непрерывных измерений микрофизических свойств аэрозолей, числа частиц в широком диапазоне размеров от нано до микронного и массовой концентрации аэрозолей в размерных фракциях PM10 и PM2,5. Отбор проб аэрозолей проводился ежесуточно на основе автоматизированных сборников одновременно с наблюдениями за метеопараметрами. Для оценки пространственной неоднородности загрязнения снежный покров и почвы опробовались по регулярной сети в одних и тех же пунктах, а дорожная пыль – на автомагистралях с разной интенсивностью движения. Все пробы отбирались в 3–4 повторностях.

Водная миграция загрязняющих веществ в растворенной и взвешенной формах и их аккумуляция в донных отложениях рек и водоемов изучалась на станциях мониторинга на разных участках течения выше, в пределах и ниже городов. Станции оборудовались современными средствами измерения: автоматическими логерами уровня воды, мутности, доплеровскими профилографами, а также зонд-ловушками для отбора проб взвеси. Программа мониторинга включала сезонные водно-балансовые и гидролого-геохимические исследования с отбором микрочастиц речной взвеси и донных отложений, а также оценку вклада микрочастиц в транспорт загрязнителей городскими реками.

Аналитические методы. В твердофазном веществе снега, почв, дорожной пыли и донных отложений фракции PM₁₀, PM_{1–10} и PM₁ выделялись методами селективного осаждения-отмучивания или центрифугирования с дополнительным ультразвуковым воздействием. Речная взвесь выделялась путем фильтрования через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. Для характеристики химического состава микрочастиц, мигрирующих с воздушными и водными потоками и аккумулярую-

щихся в депонирующих средах, определялся широкий круг элементов – Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd и др. методами ICP-MS и ICP-AES во ВНИИ минерального сырья имени Н.М. Федоровского. Среди органических поллютантов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии анализировалось содержание полициклических ароматических углеводородов (ПАУ).

Методы интерпретации данных. При эколого-геохимических оценках российских территорий рассчитывались коэффициенты концентрации K_c элементов в компонентах ландшафтов относительно фоновых значений и суммарные показатели загрязнения $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$, где n – число элементов [Геохимия..., 1990]. Для твердофазных компонентов применялись кларки концентрации KK относительно верхней части континентальной коры, позволяющие сравнивать между собой локальные, региональные и глобальные геохимические параметры. Роль кларков как глобальных фоновых констант описана в [Касимов, Власов, 2015], они постоянно уточняются, в наших работах используются последние кларки литосферы [Rudnick, Gao, 2014]. Для почв средние мировые значения химических элементов [Kabata-Pendias, 2011] имеют слишком широкий диапазон изменчивости, поэтому в качестве почвенного фона целесообразно использовать региональные кларки почв, более адекватно отражающие педогеохимические особенности территорий [Reimann et al., 2014]. Для других твердофазных компонентов окружающей среды – донных отложений, снежной и дорожной пыли – такие обобщения отсутствуют, для них более целесообразны кларки земной коры. В качестве «гидрокларков», т. е. средних мировых или региональных содержаний химических элементов в речных водах принимались данные [Gaillardet et al., 2014] для растворенных форм элементов и [Савенко, 2006; Viers et al., 2009] для взвешенных форм.

Наряду с показателями K_c и Z_c уровни и опасность загрязнения в последнее время часто оцениваются с помощью коэффициента обогащенности (Enrichment factor) $EF = (C_i / C_{ref}) / (K_i / K_{ref})$, равного отношению содержания i -го элемента в любом твердофазном компоненте среды (C_i) к нормирующему элементу (C_{ref}), как правило, не участвующему в техногенезе (Al, Sc, La и др.), к соотношению их кларков. По аналогии с Z_c предложено рассчитывать суммарный (total) показатель обогащенности $TEF = \sum EF - (n - 1)$, который более контрастно отражает уровни загрязнения [Vlasov et al., 2021c]. Общепринятых градаций уровней загрязнения по коэффициентам EF и TEF не существует.

R. Sutherland [2000] считает, что значение $EF > 1$ указывает на антропогенные источники элементов. Учитывая природную изменчивость содержания элементов, мы предлагаем незагрязненными компонентами считать те, у которых $EF < 3-5$ и $TEF < 30$. Для микроаэрозолей PM_{10} и PM_1 подобные уровни загрязнения не определены, но, принимая во внимание их концентрационную функцию, по-видимому, самый низкий уровень загрязнения не должен быть меньше 50–60. В исследованиях атмосферы московского мегаполиса $EF > 5$ указал на элементы из городских источников [Kasimov et al., 2024].

Интенсивность накопления ММ во фракциях микроаэрозолей почв, пыли и взвеси разных размеров характеризует индекс $Dx = C_f/C_{bulk}$, где C_f – содержание элемента во фракции; C_{bulk} – среднее валовое содержание элемента. Гранулометрическое фракционирование ММ характеризуют доли элементов в i -й фракции от их общего содержания C_{dust} в дорожной пыли: $D_i = C_f \cdot P_i/C_{dust}$, где P_i – доля i -й фракции в пыли.

Для количественной оценки соотношения форм миграции элементов в атмосферных осадках и речной воде использовался коэффициент DS , равный отношению объемной концентрации взвешенных форм Cvs элемента к суммарной концентрации взвешенных ($PM_{>0,45}$) и растворенных Cvd ($PM_{0,45}$) форм: $DS = Cvs/(Cvs + Cvd)$ (%) [Kasimov et al., 2020], с последующим ранжированием по убыванию коэффициента DS (%), группировкой в квартили (<25%, 25–50%, 50–75%, >75%) и представлением в виде матрицы. Преобладание нерастворенных форм элемента характеризуется величиной $DS > 50\%$, растворенных форм – $DS < 50\%$.

Помимо расчета геохимических показателей при обработке геохимических данных использовались методы моделирования и многомерного статистического анализа, описанные в следующих разделах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Аэрозольное загрязнение атмосферы. Пыль является главным компонентом мельчайших взвешенных частиц в атмосфере – аэрозолей [Alastuey et al., 2016]. По спутниковым наблюдениям в глобальном масштабе доля пыли из антропогенных источников составляет от 20 до 25%, на региональном уровне ее вклад при сильном загрязнении может доминировать. В городах качество воздуха определяется поступлением в атмосферу дорожной и строительной пыли, эмиссий автотранспорта и промышленных предприятий. Анализ сезонных уровней аэрозольной нагрузки PM_{10} атмосферы в московском мегаполисе в 2017–2019 гг. показал ее увеличение весной, связанное с интенсивным пылением почвы

после схода снежного покрова и шлейфами сельскохозяйственных пожаров [Popovicheva et al., 2022]. Присутствие ионов Na^+ и Cl^- в аэрозольном загрязнении обусловлено противогололедными реагентами (ППР), используемыми для борьбы с гололедом в городах с устойчивым снежным покровом [Zappi et al., 2023]. Концентрация иона K^+ наибольшая осенью и весной и минимальна зимой, высокий вклад Mg^{2+} и Ca^{2+} весной значительно уменьшается к осени и зиме [Касимов и др., 2023]. Вклад минеральной пыли в концентрацию PM_{10} близок к ионным компонентам, характеризуется максимальными значениями весной и осенью и минимальным зимой из-за постоянного снежного покрова. Аналогичный сезонный тренд наблюдается для концентрации микроэлементов. Среди ММ в любой сезон доминируют Cu , Zn и Pb , а осенью и зимой – Va . Комплексный анализ массовой концентрации PM_{10} и химического состава аэрозолей весеннего и осенне-зимнего периодов свидетельствует о загрязнении атмосферы московского мегаполиса продуктами сжигания топлива (дизельного, бензинового, газа) транспортом, теплоэлектростанциями и промышленными предприятиями и выявляет периоды поступления в город шлейфов от сжигания биомасс из Московского региона [Popovicheva et al., 2024a].

Для состава аэрозолей весеннего и осенне-зимнего периодов исследована сезонная изменчивость концентраций водорастворимых ионов, элементов и углеродосодержащих соединений вместе с метеорологическими параметрами [Zappi et al., 2023; Popovicheva et al., 2024a]. Анализ концентраций совместно со скоростью и направлением ветра позволяет определять пространственное местоположение источника загрязнений [Carslaw, Beevers, 2013]. Так, распределение концентраций Cr и Pb в зависимости от направления и скорости ветра указывает на источник на северо-востоке и востоке города, где сосредоточены наиболее интенсивные транспортные магистрали и северный промышленный кластер (рис. 2). Источник выбросов Sn расположен вблизи места наблюдения при самых низких скоростях ветра, что характерно для транспортных эмиссий. Юго-западное направление источника K^+ в теплое время года указывает на Очаковскую промышленную зону и Новую Москву.

Коэффициент обогащенности EF частиц PM_{10} в московском мегаполисе изменяется от минимального уровня (1–10) для Ti , Co , Fe , Mn , V , Cr , As , связанных с источниками земной коры, до максимального (120–1000) для Sb , Cd , Bi , Sn , Cu , Pb , Zn , Mo , что указывает на доминирование транспортных и промышленных источников [Kasimov et al., 2024]. Суммарный показатель обогащенности TEF демонстрирует значительную сезонную изменчивость от

относительно низкого уровня порядка 400 осенью до экстремально опасного 21 000 зимой. Наибольший вклад в *TEF* вносят ММ с наиболее высокими значениями *EF*.

Атмосферные осадки и снежный покров. Атмосферные осадки в природных и техногенных ландшафтах играют важную роль в миграции химических элементов между атмосферой и другими компонентами ландшафта – почвами, поверхностными водами, растительным покровом, а также дорожной пылью [Kasimov et al., 2023]. Жидкие (дожди) и твердые (снег, град и т. д.) осадки и сухие осаждения являются основными путями очищения атмосферы от микрочастиц и содержащихся в них поллютантов.

Они создают потоки микрочастиц на земную поверхность, изучение их химического состава дает ценную информацию о взаимодействии между компонентами ландшафтов, отдельными ландшафтами, а также о дальнем атмосферном переносе [Seinfeld, Pandis, 2013]. Геохимические показатели свежевыпавшего снега и дождевой воды используются для оценки интенсивности вымывания химических элементов и соединений из атмосферы в отдельные эпизоды выпадения осадков, а исследования снежного покрова позволяют оценить средний уровень суммарного вымывания и осаждения химических элементов и соединений из атмосферы за весь период снегостава – от нескольких дней до нескольких месяцев.

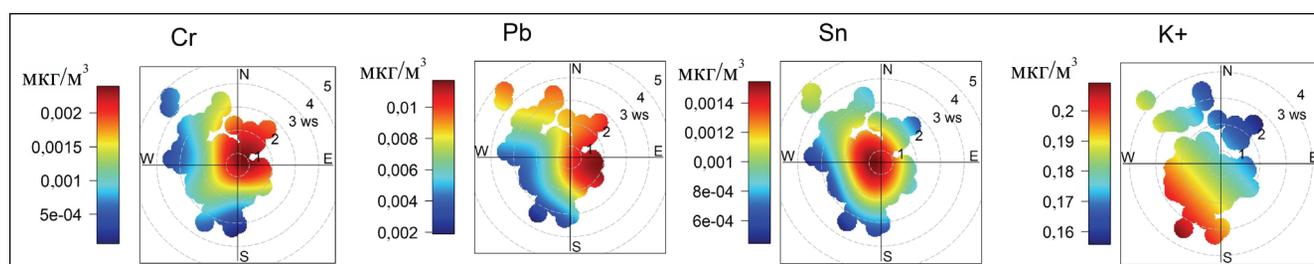


Рис. 2. Распределение концентраций Cr, Pb, Sn и K^+ в составе аэрозолей в зависимости от направления и скорости ветра на МО МГУ

Fig. 2. Polar plots of Cr, Pb, Sn and K^+ concentrations as a function of wind direction (\ominus) and speed (ms^{-1}) at the MSU weather station

Главными источниками микрочастиц в атмосфере и атмосферных осадках являются выдуваемые ветром частицы горных пород и почв, выбросы промышленных объектов и транспорта, строительная пыль, природные и сельскохозяйственные пожары, сжигание мусора, морской и океанический аэрозоль, вулканический пепел, биоаэрозоли, а также вторичные аэрозоли, образующиеся в атмосфере в результате химических реакций [Seinfeld, Pandis, 2013; Zeng, 2024]. В дождевых осадках Москвы Sb, Pb, Se, Cd, Zn, Cu, Bi, Ca, Mo, Sc, Ba, As, W, Sr, Mn, Sn, Co, Tl, Ni и Be находятся в основном в растворенной форме, а Se, Pb, Bi, Sb, W, Sn, Cu, Cd – в нерастворенной. К основным антропогенным источникам этих элементов относятся сжигание отходов и биомассы в пригородах, выдувание загрязненных частиц дорожной пыли и почв [Vlasov et al., 2023b]. Терригенные источники, такие как выдувание частиц почв и горных пород, дают наибольший вклад в концентрации Zr, Ti и Th в растворенной форме, а для большинства ММ – в нерастворенной [Vlasov et al., 2021a].

Масса химических элементов, выпадающих из атмосферы с осадками, сильно зависит от параметров дождей и метеорологических условий [Uchiyama et al., 2017; Tripathee et al., 2020]. В Мо-

скве на интенсивность выпадений ММ из атмосферы с дождями наиболее сильно влияют объем, частота и продолжительность осадков, а также длительность сухого периода перед выпадением дождя, во время которого происходит накопление микрочастиц в атмосфере [Vlasov et al., 2021a]. Соотношение растворенной и нерастворенной фаз химических элементов и соединений в атмосферных осадках определяется также геохимическими особенностями дождевой или талой снеговой воды [Kamani et al., 2014; Tripathee et al., 2020; Cheng et al., 2021]. Так, щелочно-кислотные условия могут изменять форму нахождения химического элемента в осадках: в кислой среде катионогенные элементы, к которым относится большинство ММ, относительно легко переходят из нерастворенной фазы в дождевую воду при постепенном растворении микрочастиц, вымываемых из атмосферы. Анионогенные элементы (As, Se, U и т. д.), наоборот, более активно переходят в растворенную фазу в щелочных условиях. В осадках Москвы при $pH < 4,5$ доля нерастворенной фазы уменьшается на 20–50% у Pb, Y, Be, Na, Ni, Th, Cu, Fe, Mg, Tl и Ba (рис. 3), менее интенсивно (на 5–20%) – у Co, Cs, Sr, Li, Zn, Sc, Al, V, Ca и Cd [Vlasov et al., 2021a].

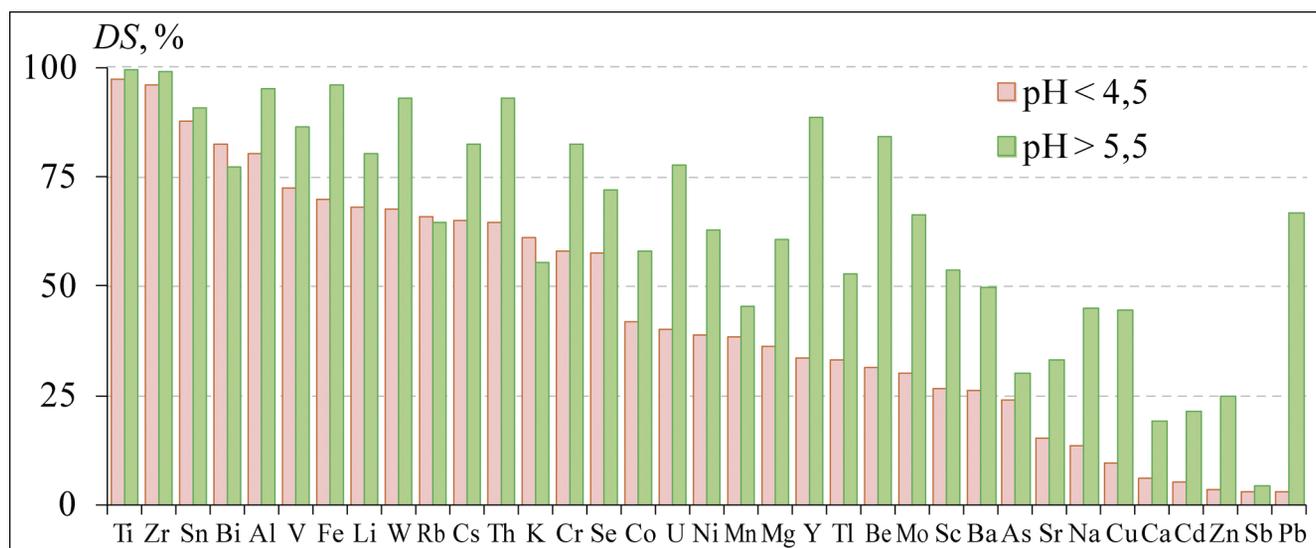


Рис. 3. Доля нерастворенной фазы металлов и металлоидов (DS , %) в кислых с $pH < 4,5$ и нейтральных с $pH > 5,5$ дождях на территории МО МГУ (по данным на апрель – май 2018 г.)

Fig. 3. Share of undissolved part of MMs (DS , %) in acid ($pH < 4,5$) and neutral ($pH > 5,5$) rains at the MSU meteorological observatory (during April–May 2018)

Подкисление атмосферных осадков обусловлено присутствием в атмосфере оксидов серы и азота, которые поступают с выбросами промышленности и транспорта, при сжигании биомассы и лесных пожарах, а также в результате вулканической деятельности. Подщелачивание осадков может вызывать поступление карбонатов, источниками которых служат строительная карбонатная пыль, выдувание частиц карбонатных пород, почв и дорожной пыли, а также аммиака от сельскохозяйственных предприятий и свалок бытовых отходов.

Талая вода снежного покрова часто имеет более высокие pH по сравнению со свежеснегавшим снегом и дождевой водой [Еремина, 2019], что является причиной более высокой доли нерастворенной фазы многих ММ в снежном покрове и свежеснегавшем снеге по сравнению с дождевой водой. Наши исследования снежного покрова в западной части Москвы показали, что из-за высокой пылевой нагрузки, использования ПГР и смены кислых фоновых условий на щелочные в городском снеге существенно возрастает доля нерастворенных форм ММ, особенно Ca, W, Co, V, Sr, Ti, Mg, Na, Mo, Zn, Fe, Sb и Cu, концентрации которых более чем в 25 раз выше, чем на фоне [Vlasov et al., 2020]. Наиболее контрастные геохимические аномалии этих ММ локализуются вблизи МКАД, крупных и средних дорог.

Атмосферные осадки играют важную роль в очищении атмосферного воздуха в Москве от микрочастиц и содержащихся в них токсичных ММ. В дни после выпадения осадков концентрации Be, Na, S, Ti, V, Ni, As, Sb, Cs, Tl в атмосферных микрочастицах PM_{10} снижаются на 30–60%, а Li, Mg, Al,

K, Ca, Sc, Co, Cu, Rb, Sr, Y, La, Ce, W, Pb, Th, U – на 10–30% [Касимов и др., 2023]. При этом твердая фаза и микрочастицы PM_{10} в атмосферных осадках обладают общей геохимической специализацией, как показано далее она характерна и для других компонентов городской среды и заключается в интенсивном накоплении Sb, Cd, Sn, Bi, S, Pb, Cu, Mo и Zn [Serdyukova et al., 2023].

Геохимия микрочастиц дорожной пыли и почв. Выпадения частиц PM_{10} и PM_1 из атмосферы вызывают опасное накопление в дорожной пыли и почвах химических элементов, особенно токсичных ММ, содержащихся в выбросах промышленных предприятий и транспорта [Haynes et al., 2020]. В формировании состава дорожной пыли участвуют также придорожные почвы и ПГР. Дорожная пыль, в свою очередь, легко выдувается в воздух, а затем поступает в городские почвы, способствуя их загрязнению. Химический состав дорожной пыли, городских почв и их отдельных фракций достаточно хорошо изучен во многих странах мира и России [Amato et al., 2009; Padoan et al., 2017; Zhang et al., 2019; Seleznev et al., 2020; Kasimov et al., 2020; Ладонин, Михайлова, 2020; Semerjian et al., 2021; Vlasov et al., 2021b, 2023b; Ivaneev et al., 2023].

Обогащенность ММ дорожной пыли и почв, а также их отдельных фракций относительно верхней части континентальной земной коры позволяет охарактеризовать источники элементов. Так, в дорожной пыли на автомагистралях Москвы по величине обогащенности ММ делятся на две группы. В первую группу с высокими $EF = 8–13$ из-за воздействия техногенных выбросов попадают Sb,

Pb, Zn и Cd, а также Cu, Sn, Mo, W, Bi с $EF = 4-7$. Ко второй группе с более низкими EF , обусловленными выдуванием частиц почвообразующих пород, почв, природных строительных материалов, относятся Fe, Ni, Co, V, Mn, Ti, Cr и As. Фракция PM_{10} накапливает те же элементы, но обогащена ими в 2–4 раза больше, чем дорожная пыль в целом [Vlasov et al., 2021b]. Суммарный показатель обогащенности TEF дорожной пыли ММ показывает уровни накопления и их экологической опасности. По этому показателю выявлены значимые разли-

чия между Восточным промышленным и Западным транспортным округами [Vlasov et al., 2023b]. В западной Москве наиболее интенсивно аккумулирует ММ фракция PM_1 (средний $TEF = 444$), в PM_{1-10} суммарное обогащение в 1,75 раза меньше, при этом в обеих фракциях показатель TEF увеличивается с ростом транспортного потока. В восточной Москве уровень накопления ММ во фракции PM_1 ниже по сравнению с западной частью, а во фракции PM_{1-10} – выше на всех дорогах из-за промышленного воздействия (рис. 4).

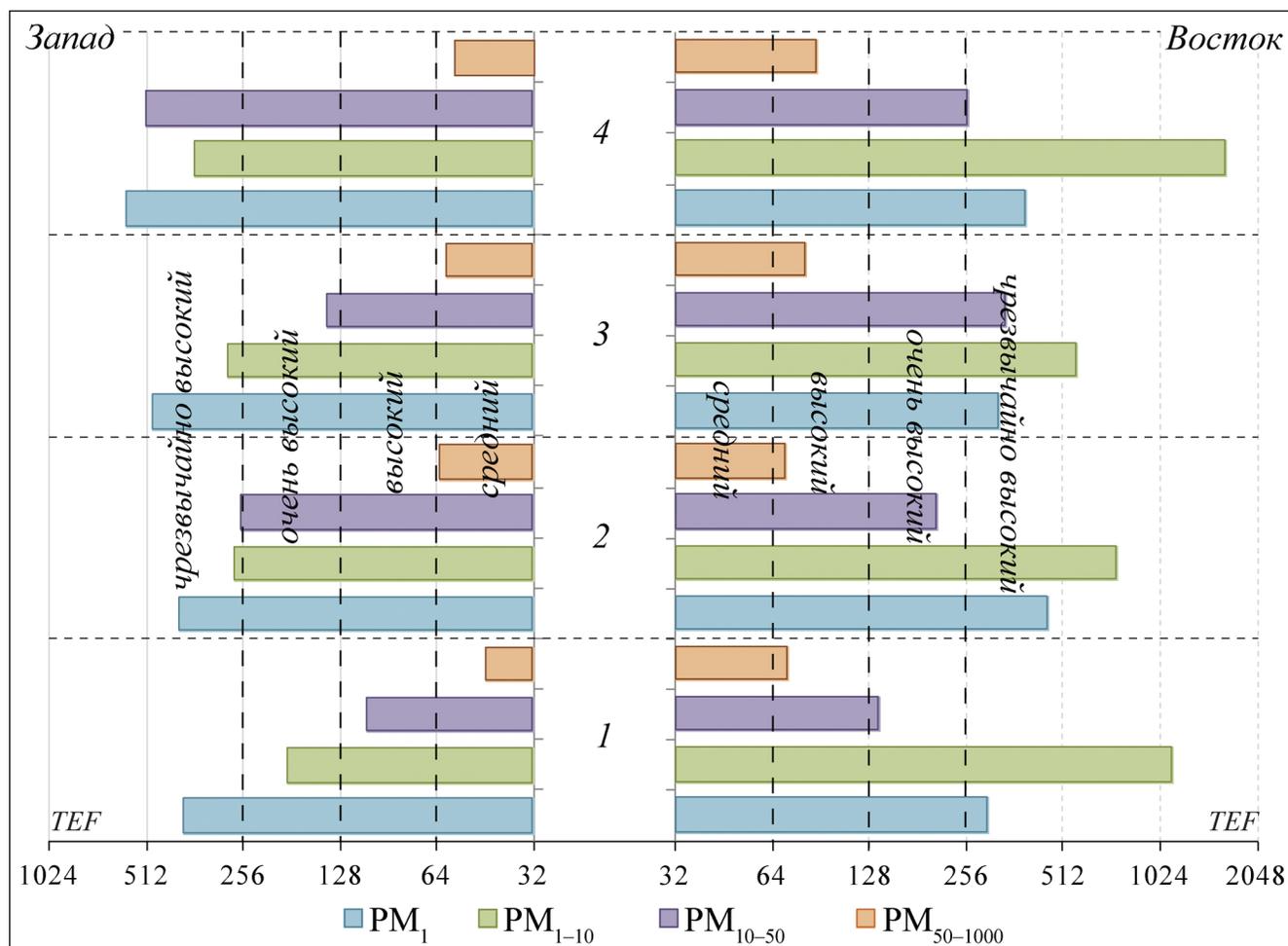


Рис. 4. Суммарное обогащение ММ и уровни загрязнения частиц дорожной пыли в западной транспортной и восточной промышленной частях Москвы на разных типах дорог: 1 – малые; 2 – средние; 3 – крупные; 4 – МКАД

Fig. 4. Total enrichment factor TEF of MMs values and the levels of road dust pollution in western (traffic) and eastern (industrial) parts of Moscow for different types of roads: 1 – small; 2 – medium; 3 – large; 4 – Moscow Ring Road

Вклад тонких фракций в общее загрязнение пыли характеризует коэффициент Dx , его значения дают представление о роли тонких частиц в формировании уровней загрязнения ММ депонирующих сред на техногенно нарушенных территориях. На территории Москвы оценка этого коэффициента для частиц PM_{10} дорожной пыли [Касимов и др., 2021] показала, что в них наиболее интенсивно концен-

трируются ММ, поступающие преимущественно от автотранспорта – W, Sb, Bi, Zn, Sn ($Dx = 6,4-4,6$). Слабо накапливаются в тонких фракциях Mn, Pb, Fe, La, V, Ti, Cr, As ($Dx = 1,8-1,1$), промежуточное положение занимают Cd, Cu, Co, Mo, Ni ($Dx = 3,3-2,0$). Характеристика гранулометрического фракционирования ММ по долям элементов D_i в тонких фракциях от их общего содержания C_{dust} в дорожной

пыли показала, что в разных округах Москвы они заметно различаются на дорогах разной крупности. На западе города относительно высокие вклады PM_1 и PM_{1-10} в валовое содержание на всех типах дорог, особенно на крупных типичны для W, Pb, Cd, Sn, Sb, Cu, Zn, As и Cr. На востоке этот перечень элементов расширяется за счет Mo, Ni, Co, поступающих из промышленных источников [Vlasov et al., 2023b].

В отличие от Москвы, города Западной Сибири – Надым и Ноябрьск, находящиеся под воздействием выбросов нефтегазового комплекса, характеризуются значительно более высокими коэффициентами D_x из-за легкого гранулометрического состава. В пыли Надыма аномально высокие D_x у W и Zn (17,6–17,3), высокие – у Cs и Sb (10,3–9,0), в Ноябрьске величины D_x несколько меньше, чем в Надыме, но лидируют те же W, Sb и Zn (13,6–8,9). В городах Забайкалья, где основным источником загрязнения являются выбросы топливно-энергетического комплекса, работающего на каменном и буром углях, высокие значения коэффициента D_x характерны для Cd (10,7), Cu, Ni, Zn, As, Sb (5,9–4,6).

Основной депонирующей средой для ММ являются почвы. С уменьшением размера частиц концентрации ММ в них увеличиваются, что связано с ростом сорбционной емкости из-за увеличения удельной площади поверхности и содержания глинистых минералов [Gunawardana et al., 2014]. Между почвами и дорожной пылью существует массообмен, который протекает особенно интенсивно вблизи автомагистралей и в который включается дополнительная поставка поллютантов из других техногенных источников [Zhang et al., 2019; Власов и др., 2022]. При этом тонкие частицы играют ведущую роль в переносе элементов между почвами и пылью. Концентрационную функцию этих фракций в компонентах ландшафтов наглядно иллюстрируют результаты наших исследований химического состава придорожных почв, дорожной пыли и их фракции PM_{10} в Западном округе Москвы [Власов и др., 2022] и приморских городах Крыма [Касимов и др., 2022]. При близком валовом содержании ММ в почвах и пыли их концентрации во фракции PM_{10} различаются – содержание W, Bi, Sb, Sn, Zn, Cu, Pb, Cd, Ni в мелкодисперсных частицах почв в 3,2–1,7 раза больше, чем в пыли. Если дорожная пыль отражает текущее загрязнение от автотранспорта, который год от года становится все более экологичным, то придорожные почвы аккумулируют выбросы автотранспорта за несколько предшествующих лет, когда стандарты топлива были более низкими.

Бассейновый гидрогеохимический анализ. Соотношение форм миграции элементов в водных потоках определяется коэффициентом DS , характеризующим распределение химических элементов

между взвешенной (S) и растворенной (D) формами. Еще относительно недавно в геохимии считалось, что в речном стоке резко преобладают взвешенные формы миграции элементов [Савенко, 2006; Гордеев, 2012]. Результаты наших исследований Селенги, Волги, Дона и других крупных рек показали, что для целого ряда элементов роль растворенных форм недооценивалась. На основании DS -анализа [Лычагин и др., 2011; Курьякова, 2011; Касимов и др., 2016; Kasimov et al., 2020] нами выделено три группы химических элементов: D -элементы с преобладанием растворенной формы миграции, S -элементы, основной формой миграции которых является взвешенная, и переходная группа DS -элементов, для которых соотношение взвешенных и растворенных форм изменяется в широких пределах. Положение химических элементов в составе той или иной группы обусловлено внутренними факторами миграции (свойствами самих элементов), а их поведение внутри групп (изменение величины DS) определяется внешними факторами, главным образом гидроклиматическими и антропогенными.

Общей закономерностью является усиление роли взвешенных форм в транспорте ММ в период прохождения паводков. Влияние водного режима на соотношение форм элементов в малых реках можно проиллюстрировать сильной изменчивостью мутности рек Крыма под влиянием паводков и резко дифференцированной антропогенной нагрузки [Касимов и др., 2022]. В реках Крыма к D -элементам ($DS < 25\%$) в первую очередь относятся Sr – типичный катионогенный элемент и активный водный мигрант, Mo, Sb, U и As – анионогенные элементы, подвижные в щелочной окислительной среде, преобладающей в реках Крыма. S -элементами ($DS > 75\%$) являются Fe, Al, Zr, Y, Cs и Pb – слабоподвижные литофилы, прочно связанные с твердой фазой (табл. 1). Группа DS -элементов представлена Zn, Mn, Ni, Co и Cu, у которых значения DS сильно варьируют в зависимости от факторов среды. В эту группу входят многие ММ, которые ранее считались связанными в потоках миграции почти исключительно с твердой фазой [Гордеев, 2012].

Смена гидрологических условий существенно меняет соотношения между формами миграции химических элементов. Так, в бассейне Селенги на пике паводков доля взвешенных форм Fe, Mn, Pb достигала 95–99%, Cu, Zn, Ni, Co – 80–90%, а в межень для всех ММ она снижалась до 30–60% и менее [Kasimov et al., 2020]. Увеличение значений DS при прохождении паводков ярче всего выражено в верховьях рек, в нижней части бассейна оно проявляется слабее, особенно в дельте Селенги [Эколого-географический..., 2019]. Усиленный рост доли взвешенных форм отмечается при антропо-

погенном воздействии. В период экстремальных летних паводков в р. Салгир, протекающей через г. Симферополь, шлейф мутности, образовавшийся из-за интенсивного смыва микрочастиц дорожной

пыли ливневым стоком с территории города, нашел отражение в резком росте DS целого ряда ММ на участке реки ниже по течению протяженностью несколько десятков километров [Касимов и др., 2022].

Таблица 1

Матрица форм миграции элементов в реках Крыма на основе DS -анализа

Сезон	Река	Fe	Al	Zr	Y	Pb	Zn	Mn	Ni	Co	Cu	Rb	Ba	U	As	Sb	Mo	Sr
Зимний паводок 2015	Бельбек	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	Кача	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Yellow	Yellow	Blue	Yellow	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	Альма	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue							
	Салгир	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Yellow	Yellow	Yellow	Blue	Yellow	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Летний паводок 2015	Бельбек	Orange	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue	Blue										
	Кача	Orange	Yellow	Yellow	Yellow	Blue	Blue	Blue										
	Альма	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Yellow	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Blue	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue
	Салгир	Orange	Blue	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue						
Летняя межень 2016	Бельбек	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Blue	Yellow	Blue	Blue	Blue	Blue						
	Кача	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue						
	Альма	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Blue	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue						
	Салгир	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Yellow	Orange	Blue	Blue	Blue	Blue						

Процентное содержание взвешенных форм ММ от суммарного содержания взвешенных и растворенных:



Совместное использование результатов анализа содержания химических элементов в речных водах и взвешенных микрочастицах, а также данных о водности рек и стоке наносов дает возможность количественной оценки потоков ММ в речных системах и их пространственно-временной изменчивости. Получаемые балансовые модели идентифицируют зоны формирования потоков ММ на водосборе и участки речных долин, где происходит их накопление, а при наличии измерений в разные фазы водного режима – внутригодовые различия в этих процессах. Так, в бассейне Селенги потоки растворенных и взвешенных форм ММ характеризуются общей тенденцией увеличения по направлению к дельте, обусловленной главным образом возрастанием жидкого и твердого стока. На участках рек, подверженных техногенному воздействию, потоки существенно возрастают, например, потоки Cd, Cu и Mo увеличиваются по длине р. Джиды и далее по р. Селенге из-за его поступления с территории Джидинского молибден-вольфрамового ГОКа [Эколого-географический..., 2019].

Данный подход был использован для оценки выноса взвешенных и растворенных ММ крупнейшими реками Арктики (Обь, Енисей, Лена, Колыма) в Северный Ледовитый океан. Самой многоводной среди них является Енисей, для него характерны

максимальные потоки растворенных форм большинства ММ (рис. 5А). Годовой поток растворенной меди в устье Енисея в 7 раз больше, чем в устье Лены, и в 4 раза больше, чем в устье Оби, хотя разница в водном стоке существенно меньше – 1,2 и 1,6 раза соответственно. Увеличение потока обусловлено более высоким содержанием меди в нижнем течении Енисея по сравнению с другими крупными реками. Поток взвешенных форм меди также максимален в устье Енисея, при этом река Лена по этому показателю опережает Обь (рис. 5Б), что объясняется минимальной зарегулированностью ее стока и развитием горнодобывающей деятельности в бассейне.

Гранулометрический состав взвешенных частиц характеризуется высокой изменчивостью в связи с разнообразием условий формирования потоков. Диапазон изменения доли частиц PM_1 во взвеси рек РФ, которые содержатся в базе данных МГУ, составляет от 0,4 до 12,3%, частиц PM_{1-10} – от 2,3 до 52,5%. С разнообразием гранулометрического состава взвеси связана высокая изменчивость ее химического состава. Наибольшим варьированием концентраций во всех фракциях отличаются Mo, Cd, W, Bi, Mn – приоритетные загрязнители микрочастиц твердофазных компонентов природной среды [Касимов и др., 2022].

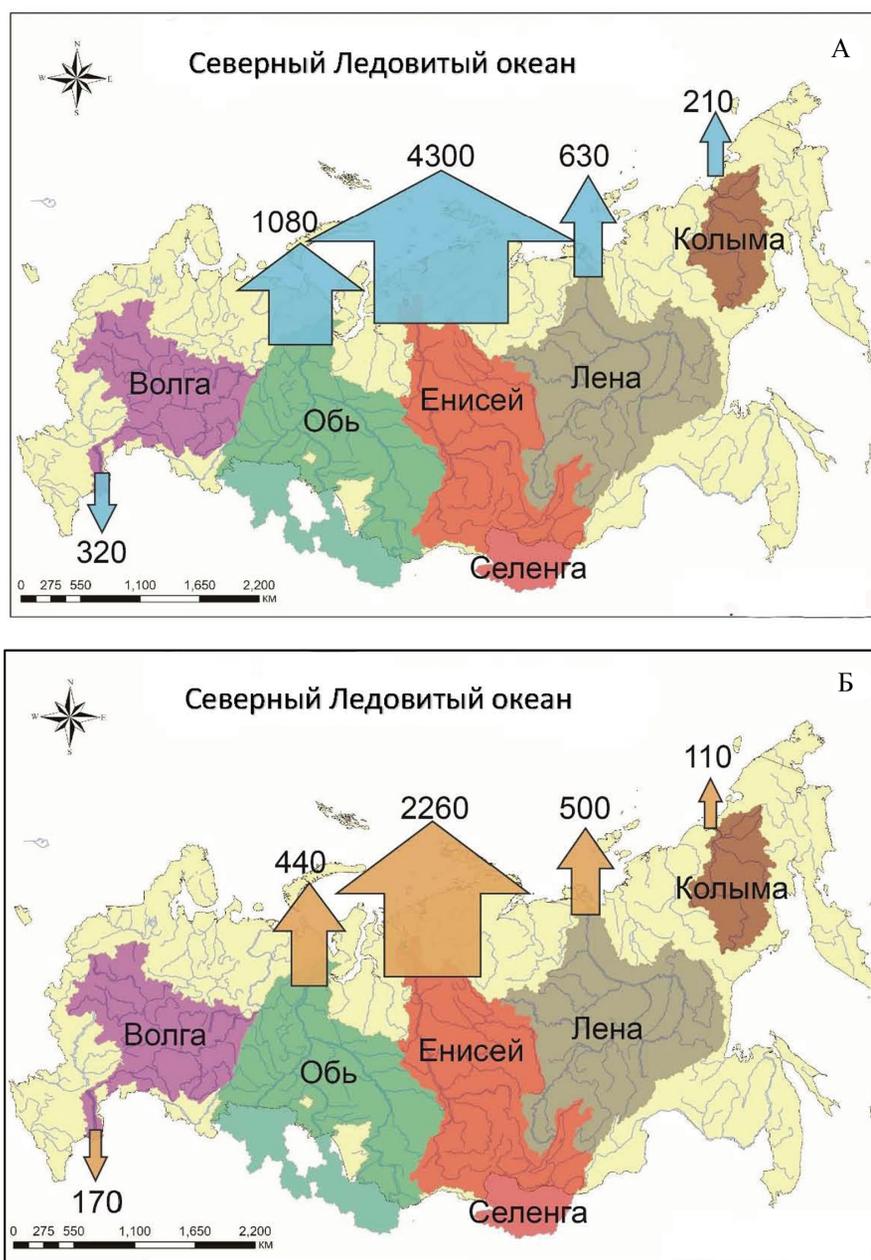


Рис. 5. Потоки растворенных (А) и взвешенных (Б) форм меди в устьях крупных рек Северной Евразии. Средний мировой сток растворенных форм меди равен 55 тыс. т/год [Gaillardet et al., 2014], взвешенных форм – 1140 тыс. т/год [Viers et al., 2009]

Fig. 5. Flows of dissolved (A) and suspended (B) forms of Cu in the mouths of large rivers of Northern Eurasia. World averaged flow of dissolved forms of Cu is 55 thousand tons/year [Gaillardet et al., 2014], that of suspended forms is 1140 thousand tons/year [Viers et al., 2009]

Для концентраций элементов в микрочастицах речной взвеси крупнейших речных систем России средние превышения над валовыми содержаниями составили от 1,5 до 2,2 для Fe, Co, Sc, V, Al, Y, и менее 1,5 для прочих элементов при несущественной разнице между соотношениями PM_1 и PM_{1-10} к валовому содержанию. Для максимальных концентраций наибольшие превышения над валовым содержанием были установлены для фракции PM_{1-10} и составили от 3 до 9 для Fe, Y, Sc, Al, K, Th, Ti,

Nb, Co, V, Mg, Ni, Li, Zr, Sr и от 1,5 до 3,0 для Cd, Cr, U, Sn, Ca, Na, Sb (рис. 6). Интенсивность накопления ММ в микрочастицах речной взвеси (Dx) выражена слабее, чем в почвах и дорожной пыли, что свидетельствует об их пониженной сорбционной способности. Это может быть связано с низким содержанием ММ в речных водах, а также с вымыванием непрочно сорбированных катионов из микрочастиц взвеси турбулентными потоками речных вод.

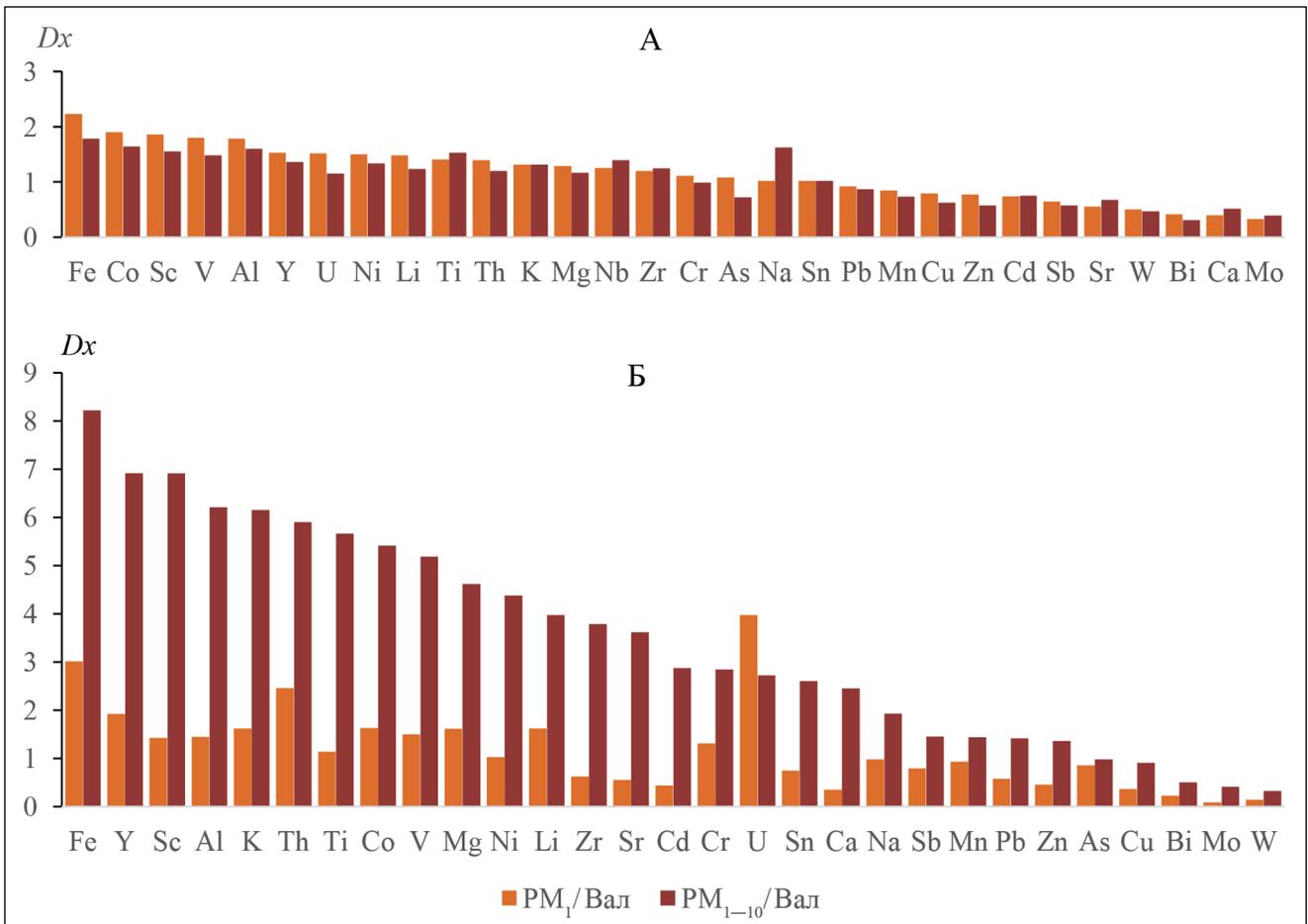


Рис. 6. Интенсивность накопления ММ в микрочастицах взвеси крупных рек России на основе индекса Dx : для средних (А) и максимальных (Б) содержаний элементов во фракциях PM_1 и PM_{1-10}

Fig. 6. The intensity of MMs accumulation in suspended microparticles of large Russian rivers based on Dx index: for average (A) and maximum (B) contents of elements in PM_1 and PM_{1-10} fractions

Таким образом, элементный состав наиболее тонкой фракции взвеси PM_1 оказывается достаточно стабильным в пределах одной речной системы и определяется в основном комплексом долгосрочно действующих факторов, таких как минералогический состав пород, дренируемых водотоками бассейна. Элементный состав фракции PM_{1-10} в большей степени отражает характер и степень антропогенного воздействия на речную систему.

Идентификация антропогенных источников.

На урбанизированных территориях практически всегда одновременно функционирует множество источников микрочастиц разного размера. Для оценки их влияния на состояние городских ландшафтов важно идентифицировать эти источники и оценить вклад каждого.

Source Apportionment (SA) – это технология получения информации об источниках загрязнения и их вкладе в загрязнение исследуемой среды. Эта задача может быть решена различными методами, в том числе с помощью рецепторных моделей, которые представляют собой математические проце-

дуры для идентификации и количественной оценки воздействия основных источников загрязнения на атмосферу и компоненты городских ландшафтов (рецепторы) на основе массива данных измерений содержания поллютантов в рецепторах.

Идентификация выделенных источников происходит на основе данных о составе их выбросов: в микрочастицах PM_{10} происходит накопление Cu, Sn, Sb, Cr, Ba, Fe, Al, Ca, Zn и Cd в результате износа тормозов, Zn и Ca – износа шин, а Ti, Ni, Cr, Mo, Pb и As в результате комбинированного автомобильного и абразивного износа дорожного покрытия [Harrison et al., 2021]. V и Ni являются маркерами сгорания мазута. Основные источники As, Pb и Cd связаны с сжиганием угля, обжигом и плавкой руд на заводах по выплавке цветных металлов и черной металлургии [Alastuey et al., 2016]. Mo, Ni, Cr и Fe содержатся в выбросах машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий, Ni и Cr накапливаются в крупных частицах при механическом истирании поверхностей из нержавеющей стали. Морская соль и противогололедные реагенты в се-

верных городах представлены ионами Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} . Са доминирует в строительной и известковой пыли и в выбросах цементных заводов.

Среди методов SA одним из эффективных признан метод главных компонент с многофакторной линейной регрессией (PCA-MLR), который позволяет определить вклады промышленных, транспортных и природных источников [Thurston et al., 2011]. Метод главных компонент (PCA) преобразует исходный набор данных о концентрациях химических элементов в отдельной гранулометрической фракции твердофазного вещества пыли или почв в разных точках территории исследования в несколько линейных комбинаций [Aminiyan et al., 2018], которые затем используются для идентификации источников этих элементов. Предварительно массив данных с концентрациями анализируемых поллютантов нормализуется. Для облегчения интерпретации факторов и уменьшения числа поллютантов, имеющих высокие факторные нагрузки по отдельным факторам, применяется метод вращения Varimax полученных в PCA результатов. Выделение главных компонент позволяет получить значения факторных нагрузок (factor loadings), вкладов факторов (factor scores) и их коэффициентов (factor score coefficients), на основе которых рассчитываются абсолютные значения главных компонент (APCS) для каждого фактора и каждой пробы [Liang et al., 2019].

Участие каждого источника в формировании загрязнения рассматриваемой среды оценивается с помощью многофакторной линейной регрессии (MLR) между исходными концентрациями поллютантов и абсолютными значениями каждой из главных компонент. Вклад фактора в концентрации элементов в каждой точке опробования определяется путем умножения значения APCS на сумму констант многофакторной регрессии для каждого поллютанта. Среднее значение этого произведения для всех точек показывает средний вклад фактора [Thurston et al., 2011].

Применение метода PCA-MLR для определения вероятных источников ММ в дорожной пыли в разных частях Москвы показало, что относительно высокий вклад терригенных источников, таких как выдувание частиц почв и минеральной пыли, проявляется в загрязнении фракций PM_1 и PM_{1-10} Al, Ba, Rb, Sr, Be, Mn, V, Ti и Fe, выхлопных и невыхлопных выбросов транспорта – W, Pb, Bi, Zn, Cu, Sb, Sn, Mo, а промышленных источников и сжигания отходов – Cr, Cd, Sn, As, Ni, Co, Be, Cu, Mo, Rb (рис. 7). В восточной промышленной части города относительный вклад промышленных источников в загрязнение фракций PM_1 и PM_{1-10} дорожной пыли ММ на 10–30% больше, чем в западной части. При этом в западной части Москвы поступление Pb, Sr,

Cu, W и Cr во фракцию PM_{1-10} дорожной пыли из терригенных источников выше, а Ni, Bi, Mo, Sb и As ниже, чем во фракцию PM_1 [Vlasov et al., 2023b]. В целом вклад выбросов автотранспорта в накопление Sn, Cd, Sn, Mo и Bi в частицах PM_{1-10} выше по сравнению с PM_1 .

Развитие методов SA привело к появлению более совершенной модели положительной матричной факторизации (PMF) [Amato et al., 2016], в которой результатом расчетов являются две матрицы – профили F-фактора и вклады G-фактора, полученные при ограничении неотрицательности для матрицы F и незначимой отрицательности для матрицы G. Модель основана на уравнении баланса масс: $c_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} \cdot f_{kj} + e_{ij}$, где c_{ij} – концентрация химического элемента j , измеренная в образце i , p – количество факторов (источников), которые вносят вклад в измеренные концентрации, g_{ik} – вклад источника k в образец i , f_{kj} – концентрация химического элемента j в источнике k , а e_{ij} – остаток (разница между измеренным значением и значением, подобранным моделью) для химического элемента j в образце i . Уравнение решается путем минимизации суммы квадратов остатков для всех образцов.

Необходимость в количественной оценке вклада антропогенных выбросов в массовую концентрацию аэрозолей наряду с природными источниками, важность оценки их воздействия на эколого-геохимическое состояние снежного и почвенного покрова Московского мегаполиса и химический сток р. Москвы и ее притоков продемонстрирована в [Касимов и др., 2023]. Задача количественного определения вклада источников транспортных и пылевых эмиссий, выбросов промышленности, отопительной системы и жилого сектора методом PMF в состав аэрозолей Московского мегаполиса впервые решена в [Porovicheva et al., 2024]. С помощью модели PMF определено шесть основных источников (городская пыль, промышленность, вторичный аэрозоль, транспорт, ПГР и сжигание биомассы) и вклад отдельных элементов из каждого источника (рис. 8). Максимальный вклад элементов дают факторы «городская пыль», «промышленность», «транспорт». Вклад Cr и Pb из промышленных источников и городской пыли является определяющим, Zn доминирует в транспортных эмиссиях. Концентрации ионов Na^+ и K^+ контролируются ПГР и горением биомасс.

Для многих территорий важно влияние дальнего переноса, т. е. поступление загрязняющих веществ из сопредельных регионов. Для выявления вероятных направлений адвекции воздуха для каждой даты отбора проб аэрозолей построены обратные траектории движения воздушных масс для высоты 500 м над уровнем моря и временного интервала 72 часа

с использованием транспортно-дисперсионной модели NOAA HYSPLIT [Stein et al., 2015; <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>]. Группировка полученных траекторий дальнего переноса воздушных масс с помощью кластерного анализа весной 2018 г., осенью 2019 г. и зимой 2019/20 г. выявила пространственное положение дальних источников загрязнений атмосферы Москвы в пяти кластерах, представляющих траектории с общими источниками. Весной 2018 г. фактор «городская пыль» вносил равный вклад в северном и северо-восточном кластерах. Вклад фактора «промышленность» в разных кластерах существенно не различался. Самый

высокий вклад фактора «горения биомасс», ассоциированный с сельскохозяйственными пожарами вокруг Москвы, определен в восточном кластере. Дополнительный вклад мог вносить жилой сектор Московской области, использующий биомассы для отопления и других нужд. Осенью 2019 г. максимальный вклад вносили факторы «городская пыль» и «промышленность» в юго-восточном кластере. Осенью 2019 г. и зимой 2019/20 г. самый высокий вклад факторов «промышленность» и «городская пыль» наблюдался в южном и юго-восточном кластерах, где сосредоточены крупнейшие предприятия Московской агломерации.

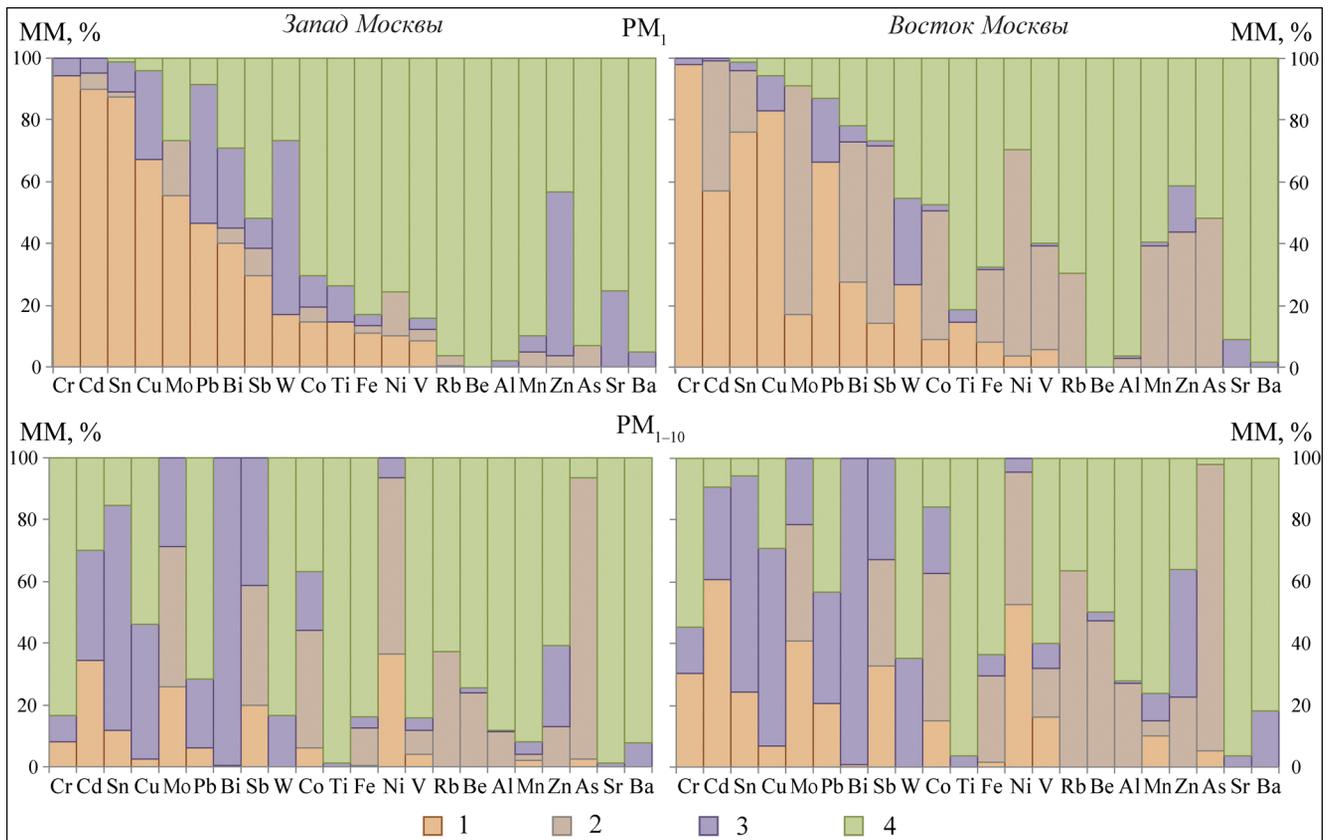


Рис. 7. Вклады источников (в %) в концентрации ММ во фракциях PM_1 и PM_{1-10} дорожной пыли западной и восточной частей Москвы, полученные по модели PCA-MLR: 1 – промышленность; 2 – промышленность и переработка мусора; 3 – транспорт; 4 – терригенные источники (загрязненные городские почвы и техногенные отложения)

Fig. 7. Source contributions (%) to MMs concentrations in PM_1 and PM_{1-10} fractions of road dust in eastern and western parts of Moscow, obtained using the PCA-MLR model: 1 – industry; 2 – industry and waste recycling; 3 – traffic; 4 – terrigenous sources (polluted urban soils and technogenic sediments)

Изменение активности населения в период ограничительных мер в апреле–июле 2020 г., связанных с пандемией COVID-19, привело к улучшению качества воздуха и уменьшению влияния опасных для здоровья населения выбросов транспорта и промышленности в московском мегаполисе [Serdyukova et al., 2023]. Применение метода

PCA-MLR к анализу элементного состава аэрозолей выявило основные источники загрязнения: городская пыль, горение и выхлопы транспорта, другие эмиссии транспорта. Показано, что в период восстановления возрос вклад фактора городской пыли на 26%, горения и выхлопов транспорта на 8%, эмиссий, отличных от выхлопов, на 15%.

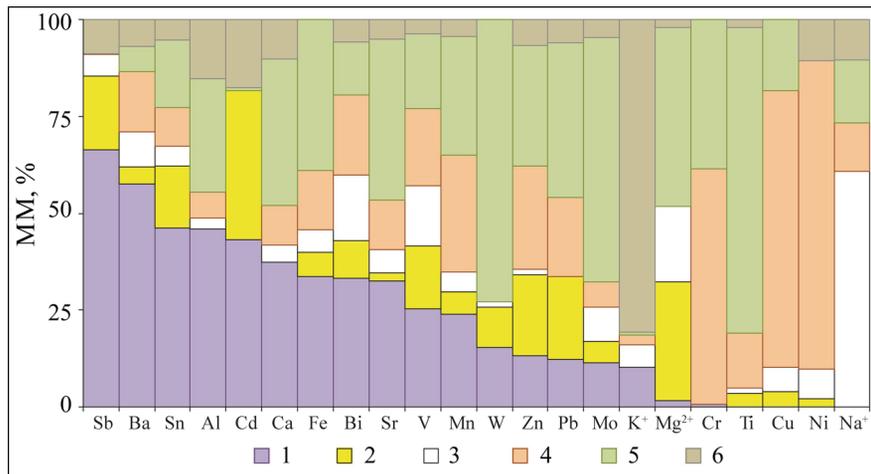


Рис. 8. Относительные концентрации ММ (%) в каждом источнике, рассчитанные по модели PMF [Popovicheva et al., 2024a]: 1 – транспорт; 2 – вторичный аэрозоль; 3 – антигололедная соль; 4 – промышленность; 5 – городская пыль; 6 – сжигание биомассы

Fig. 8. Relative concentrations of MMs (%) apportioned to each source, obtained using the PMF model [Popovicheva et al., 2024a]: 1 – traffic; 2 – secondary aerosol; 3 – de-icing salts; 4 – industry; 5 – urban dust; 6 – biomass burning

ВЫВОДЫ

Развитие технологий химического анализа микрочастиц в аэрозолях и компонентах наземных и аквальных ландшафтов продемонстрировало их перспективность для выявления загрязнения, идентификации источников и оценки экологического состояния окружающей среды на территориях, подверженных техногенному воздействию. Изучение закономерностей миграции и аккумуляции потенциально токсичных элементов и соединений в московском мегаполисе показало, что концентрирующие поллютанты микрочастицы играют ключевую роль в загрязнении городской среды. Апробация технологий химического анализа микрочастиц при изучении процессов водного и воздушного транспорта и накопления поллютантов в депонирующих средах при множественности источников загрязнения позволила получить ряд принципиально новых результатов, раскрывающих роль микрочастиц в формировании техногенных геохимических аномалий. Анализ образования и накопления экологически опасных элементов и соединений в аэрозолях проводился на основе высокоточного инструментального мониторинга воздушной среды в крупных городах, в Азовско-Черноморском и Байкальском регионах, на побережье северных морей и архипелаге Северная Земля и в нефтегазоносных районах Западной Сибири.

Получены уникальные данные о влиянии природных и антропогенных факторов, а также изменений в экономической деятельности на химический состав микрочастиц в компонентах городских ланд-

шафтов, которые позволяют выделить наиболее опасные воздействия и прогнозировать состояние окружающей среды. Впервые определены вклады пылевых, транспортных и промышленных источников в загрязнение атмосферы московского мегаполиса, необходимые для оценки качества воздуха и влияния на здоровье населения. Путем обобщения накопленного экспериментального материала установлены основные факторы и механизмы, определяющие пространственную структуру загрязнения дорожной пыли и городских почв ММ и ПАУ, а также их важнейшие фазы-носители, специфичные для разных источников загрязнения. В Московском регионе и в бассейне озера Байкал исследования урбанизированных и горнопромышленных территорий сочетались с гидрогеохимическими исследованиями речных вод Москвы и Селенги и ее притоков на основе специально разработанного метода расчета потоков химических элементов в растворенной форме и в форме тонких фракций взвеси в меняющихся гидроклиматических условиях.

Изучение концентрации элементов в микрочастицах, поступающих из антропогенных источников, в методологическом и теоретическом плане представляет собой переход от изучения геохимического «макромира» к познанию еще почти неизвестного в исследованиях окружающей среды геохимического «микромира». Теоретической базой для этого может служить разработанная авторами технология анализа химического состава микрочастиц в транзитных и депонирующих средах техногенно измененных ландшафтов.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФН в Московском регионе (проект № 19-77-30004-П). Обобщение результатов (идентификация антропогенных источников) проведено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-574) в рамках федерального проекта «Развитие передовой инфраструктуры для проведения исследований и разработок в Российской Федерации» национального проекта «Наука и университеты» и при содействии АО «Институт экологического проектирования и изысканий» (АО «ИЭПИ»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Власов Д.В., Кукушкина О.В., Кошелева Н.Е., Касимов Н.С. Уровни и факторы накопления металлов и металлоидов в придорожных почвах, дорожной пыли и их фракции PM_{10} в Западном округе Москвы // Почвоведение. 2022. № 5. С. 538–555. DOI: 10.31857/S0032180X22050112.
- Геохимия ландшафтов Восточной Москвы / под ред. Е.В. Достоваловой. М.: АПР, 2016. 276 с.
- Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М.А. Глазовской / под ред. Н.С. Касимова, М.И. Герасимовой. М.: АПР, 2012. 599 с.
- Геохимия ландшафтов. К 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана / под ред. Н.С. Касимова, А.Н. Геннадиева. М.: АПР, 2017. 544 с.
- Геохимия окружающей среды / под ред. А.И. Перельмана. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Гордеев В.В. Геохимия системы река – море. М.: ИП Матушкина И.И., 2012. 452 с.
- Еремина И.Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 3. С. 3–10.
- Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.
- Касимов Н.С., Безбердя Л.А., Лычагин М.Ю. и др. Экогеохимия городов и рек Крыма. Тр. Крымской комплексной экспедиции. Вып. 1. М.: Географический факультет МГУ, 2022. 384 с.
- Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 2. С. 7–17.
- Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е. Химический состав дорожной пыли и ее фракции PM_{10} как индикатор загрязнения городской среды // Экология и промышленность России. 2021. № 25. Вып. 10. С. 43–49. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-10-43-49.
- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Поповичева О.Б. и др. Загрязнение Московского мегаполиса: мониторинг химического состава микрочастиц в системе «атмосфера – снег – дорожная пыль – почвы – поверхностные воды» // Метеорология и гидрология. 2023. № 5. С. 5–19. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-5-5-19.
- Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р. и др. Бассейновый анализ потоков веществ в системе Селенга – Байкал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 3. С. 67–81.
- Курьякова А.Н. Баланс тяжелых металлов в дельте Волги // Доклады Академии наук. 2011. Т. 439. № 6. С. 818–821.
- Ладонин Д.В., Михайлова А.П. Тяжелые металлы и мышьяк в почвах и уличной пыли Юго-Восточного административного округа г. Москвы: результаты многолетних исследований // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1401–1411. DOI: 10.31857/S0032180X2011009X.
- Лычагин М.Ю., Касимов Н.С., Курьякова А.Н. и др. Геохимические особенности аквальных ландшафтов дельты Волги // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2011. № 1. С. 100–113.
- Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Курчатова А.Н. и др. Геохимическая характеристика снежного покрова Тюмени // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 3. С. 13–26.
- Нефть и окружающая среда Калининградской области / под ред. Ю.С. Каджояна и Н.С. Касимова. М.: Калининград: Янтарный сказ, 2008. 360 с.
- Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 175 с.
- Семенова А.В., Поповичева О.Б., Завгородняя Ю.А. и др. Аэрозольное загрязнение Московского мегаполиса полиароматическими углеводородами: сезонная изменчивость и токсикологические риски // Вестник РАН. 2023. Т. 93. № 7. С. 669–683. DOI: 10.31857/S0869587323070071.
- Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 336 с.
- Эколого-географический атлас-монография Селенга – Байкал / под ред. Н.С. Касимова. М.: Географический факультет МГУ, 2019. 288 с.
- Acosta J.A., Faz A., Kalbitz K. et al. Heavy metal concentrations in particle size fractions from street dust of Murcia (Spain) as the basis for risk assessment, *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, vol. 13, p. 3087–3096, DOI: 10.1039/c1em10364d.
- Alastuey A., Querol X., Aas W. et al. Geochemistry of PM_{10} over Europe during the EMEP intensive measurement periods in summer 2012 and winter 2013, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, vol. 16, p. 6107–6129, DOI: 10.5194/acp-16-6107-2016.
- Amato F., Alastuey A., Karanasiou A. et al. AIRUSE-LIFE+: A harmonized PM speciation and source apportionment in 5 Southern European cities, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, vol. 16, p. 3289–3309.
- Amato F., Pandolfi M., Viana M. et al. Spatial and chemical patterns of PM_{10} in road dust deposited in urban environment, *Atmospheric Environment*, 2009, vol. 43, p. 1650–1659, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.12.009.
- Aminiyan M.M., Baalousha M., Mousavi R. et al. The ecological risk, source identification, and pollution assessment of heavy metals in road dust: a case study in Rafsanjan, SE Iran, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2018, vol. 25:13382–13395, DOI: 10.1007/s11356-017-8539-y.
- Borris M., Österlund H., Marsalek J. et al. Snow pollution management in urban areas: an idea whose time has come? *Urban Water Journal*, 2021, vol. 18, no. 10, p. 840–849.
- Carslaw D.C., Beevers S.D. Characterizing and understanding emission sources using bivariate polar plots and k-means clustering, *Environmental Modelling & Soft-*

- ware, 2013, vol. 40, p. 325–329, DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.09.005.
- Cheng I., Al Mamun A., Zhang L. A synthesis review on atmospheric wet deposition of particulate elements: scavenging ratios, solubility, and flux measurements, *Environmental Reviews*, 2021, p. 1–14, DOI: 10.1139/er-2020-0118.
- Dockery D.W., Pope C.A. Acute respiratory effects of particulate air pollution, *Annual Review of Public Health*, 1994, vol. 15, p. 107–132, DOI: 10.1146/annurev.pu.15.050194.000543.
- Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in river waters, *Treatise on geochemistry*, Boca-Raton, Elsevier, 2014, p. 195–235, DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00507-6.
- Gunawardana C., Egodawatta P., Goonetilleke A. Role of particle size and composition in metal adsorption by solids deposited on urban road surfaces, *Environmental Pollution*, 2014, vol. 184, p. 44–53, DOI: 10.1016/j.envpol.2013.08.010.
- Harrison R.M., Allan J., Carruthers D. et al. Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: a review, *Atmospheric Environment*, 2021, vol. 262, Article ID: 118592, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118592.
- Haynes H.M., Taylor K.G., Rothwell J. et al. Characterisation of road-dust sediment in urban systems: a review of a global challenge, *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20, p. 4194–4217, DOI: 10.1007/s11368-020-02804-y.
- Ivaneev A.I., Brzhezinskiy A.S., Karandashev V.K. et al. Assessment of sources, environmental, ecological, and health risks of potentially toxic elements in urban dust of Moscow megacity, Russia, *Chemosphere*, 2023, vol. 321, 138142, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138142.
- Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*, 4th edition, Boca Raton, CRC Press, 2011, 505 p.
- Kamani H., Hoseini M., Safari G.H. et al. Study of trace elements in wet atmospheric precipitation in Tehran, Iran, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186, iss. 8, p. 5059–5067, DOI: 10.1007/s10661-014-3759-9.
- Kasimov N., Chalov S., Chubarova N. et al. Urban heat and pollution island in the Moscow megacity: Urban environmental compartments and their interactions, *Urban Climate*, 2024, vol. 55, Article ID: 101972, DOI: 10.1016/j.uclim.2024.101972.
- Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M. et al. River water quality of the Selenga-Baikal basin, part II, Metal partitioning under different hydroclimatic conditions, *Water*, 2020, vol. 12(9):2392, DOI: 10.3390/w12092392.
- Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E. Enrichment of road dust particles and adjacent environments with metals and metalloids in eastern Moscow, *Urban Climate*, 2020, vol. 32, Article ID: 100638, DOI: 10.1016/j.uclim.2020.100638.
- Liang S.-Y., Cui J.-L., Bi X.-Y. et al. Deciphering source contributions of trace metal contamination in urban soil, road dust, and foliar dust of Guangzhou, southern China, *Sci. Total Environ.*, 2019, vol. 695:133596, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133596.
- Padoan E., Romè C., Ajmone-Marsan F. Bioaccessibility and size distribution of metals in road dust and roadside soils along a peri-urban transect, *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 601–602, p. 89–98, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.180.
- Popovicheva O., Chichaeva M., Kovach R. et al. Seasonal, weekly, and diurnal black carbon in Moscow megacity background under impact of urban and regional sources, *Atmosphere*, 2022, vol. 13, Article ID: 563, DOI: 10.3390/atmos13040563.
- Popovicheva O., Diapouli E., Chichaeva M. et al. Aerosol characterization and peculiarities of source apportionment in Moscow, the largest and northernmost European megacity, *Science of The Total Environment*, 2024a, Article ID: 170315, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170315.
- Popovicheva O., Chichaeva M., Kovach R. et al. Impact of Wave COVID-19 Responses on Black Carbon Air Pollution in Moscow Megacity Background, *Aerosol and Air Quality Research*, 2024b, vol. 24, p. 230266–230266, DOI: 10.4209/aaqr.230266.
- Rai P., Furger M., El Haddad I. et al. Real-time measurement and source apportionment of elements in Delhi's atmosphere, *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 742, Article ID: 140332, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140332.
- Reimann C., Birke M., Demetriades A. et al. *Chemistry of Europe's agricultural soils*, part A, Methodology and interpretation of the GEMAS data set, Hannover, Schweizerbarth, 2014, 528 p.
- Rudnick R.L., Gao S. *Composition of the Continental Crust*, *Treatise on Geochemistry*, Boca-Raton, Elsevier, 2014, p. 1–51, DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6.
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*, Third Edition, Hoboken, John Wiley & Sons, 2013, 1149 p.
- Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P. Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities, *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, Article ID: 1668, DOI: 10.1038/s41598-020-58434-4.
- Semerjian L., Okaiyeto K., Ojemaye M.O. et al. Global systematic mapping of road dust research from 1906 to 2020: Research gaps and future direction, *Sustainability*, 2021, vol. 13, Article ID: 11516, DOI: 10.3390/su132011516.
- Serdyukova A.D., Vlasov D.V., Popovicheva O.B. et al. Elemental composition of atmospheric PM₁₀ during COVID-19 lockdown and recovery periods in Moscow (April–July 2020), *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, vol. 45, p. 7909–7931, DOI: 10.1007/s10653-023-01698-2.
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D. et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2015, vol. 96, p. 2059–2077.
- Sutherland R. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii, *Environmental Geology*, 2000, vol. 39, p. 611–627, DOI: 10.1007/s002540050473.
- Thurston G.D., Ito K., Lall R. A source apportionment of U.S. fine particulate matter air pollution, *Atmos. Environ.*, 2011, vol. 45:3924–3936, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.070.
- Tripathee L., Guo J., Kang S. et al. Measurement of mercury, other trace elements and major ions in wet deposition at Jomsom: The semi-arid mountain valley of the Central Himalaya, *Atmospheric Research*, 2020, vol. 234, Article ID: 104691, DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104691.
- Uchiyama R., Okochi H., Katsumi N. et al. The impact of air pollutants on rainwater chemistry during “urban-induced heavy rainfall” in downtown Tokyo, Japan: Heavy rain formation and air pollutants, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, vol. 122, no. 12, p. 6502–6519, DOI: 10.1002/2017JD026803.

- Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database, *Science of the Total Environment*, 2009, vol. 407(2), p. 853–868, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.09.053.
- Vlasov D., Kosheleva N., Kasimov N. Spatial distribution and sources of potentially toxic elements in road dust and its PM₁₀ fraction of Moscow megacity, *Science of the Total Environment*, 2021b, vol. 761, Article ID: 143267, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143267.
- Vlasov D.V., Kasimov N., Eremina I. et al. Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity, *Atmospheric Pollution Research*, 2021a, vol. 12(1), p. 255–271, DOI: 10.1016/j.apr.2020.09.012.
- Vlasov D.V., Kasimov N., Eremina I. et al. Major ions and potentially toxic elements in atmospheric precipitation during the COVID-19 lockdown in Moscow megacity, *Urban Climate*, 2023a, vol. 48, Article ID: 101422, DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101422.
- Vlasov D.V., Vasil'chuk J., Kosheleva N. et al. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: Partitioning and deposition rates in Western Moscow, *Atmosphere*, 2020, vol. 11, Article ID: 907, DOI: 10.3390/atmos11090907.
- Vlasov D.V., Vasil'chuk J.Yu., Kosheleva N.E., Kasimov N.S. Contamination levels and source apportionment of potentially toxic elements in size-fractionated road dust of Moscow, *Environmental Science and Pollution Research*, 2023b, vol. 30, p. 38099–38120, DOI: 10.1007/s11356-022-24934-1.
- Zappi A., Popovicheva O., Tositti L. et al. Factors influencing aerosol and precipitation ion chemistry in urban background of Moscow megacity, *Atmospheric Environment*, 2023, vol. 294, Article ID: 119458, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2022.119458.
- Zeng J., Han G., Zhang S. et al. Potentially toxic elements in rainwater during extreme rainfall period in the megacity Beijing: Variations, sources, and reuse potential, *Atmospheric Environment*, 2024, vol. 318, Article ID: 120242, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.120242.
- Zhang J., Li R., Zhang X. et al. Vehicular contribution of PAHs in size dependent road dust: A source apportionment by PCA-MLR, PMF, and UNMIX receptor models, *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 649, p. 1314–1322, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.410.

Электронные ресурсы

- Химический состав микрочастиц в окружающей среде Москвы. М.: Географический факультет МГУ, 2023. 300 с. URL: http://media.geogr.msu.ru/Digest_Moscow_electron.pdf (дата обращения 10.08.2024).
- Воздушные и водные потоки поллютантов в Российской Арктике. М.: Географический факультет МГУ, 2024. 197 с. URL: <https://www.geogr.msu.ru/news/izdan-elektronnyy-dayzhest-vozdushnye-i-vodnye-potoki-pollutantov-v-rossiyskoj-arktike/> (дата обращения 20.10.2024).

Поступила в редакцию 20.05.2024

После доработки 10.10.2024

Принята к публикации 26.11.2024

ECOGEOCHEMISTRY OF MICROPARTICLES IN THE ENVIRONMENT

N.S. Kasimov¹, N.E. Kosheleva², O.B. Popovicheva³, S.R. Chalov⁴, L.A. Bezberdaya⁵,
D.V. Vlasov⁶, O.N. Erina⁷, M.Yu. Lychagin⁸, M.A. Chichayeva⁹, G.L. Shinkareva¹⁰

^{1, 2, 5, 8, 9} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography

³ Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

⁶ Illinois State University, Department of Geography, Geology and Environment

⁷ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Krasnovidovo Station

¹⁰ Middle Tennessee State University, Department of Earth Science

¹ Academician, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: nskasimov@geogr.msu.ru

² Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: natalk@mail.ru

³ Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics;
e-mail: olga.popovicheva@gmail.com

⁴ Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: hydroserg@mail.ru

⁵ Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: lilia_8888@mail.ru

⁶ Assistant Professor-Instructor, Ph.D. in Geography; e-mail: vlasov.msu@gmail.com

⁷ Head of the Krasnovidovo Station, Ph.D. in Geography; e-mail: tamiblack@yandex.ru

⁸ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: lychagin@geogr.msu.ru

⁹ Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: shamora777@yandex.ru

¹⁰ Assistant Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: galina.shinkareva@gmail.com

The article presents the results of the latest studies of the emission and distribution of microparticles in the environment based on monitoring and assessment of the ecological and geochemical state of urbanized areas and river basins. Scientific bases and technologies for geochemical analysis of microparticles in the atmosphere (aerosols, snow and rain), pedosphere (urban soils and road dust) and terrestrial hydrosphere (dissolved and suspended forms of chemical elements in water mass and bottom sediments) have been developed. It is shown that the analysis of microparticles is of key importance for understanding the mechanisms of pollution

of the environmental components and the formation of technogenic geochemical anomalies in the Moscow metropolis and other cities. Our research made it possible to identify an association of chemical elements that enriches almost all components of the urban environment. It includes antimony, cadmium, copper, tungsten, zinc, lead, bismuth, tin, and molybdenum. With multiple emissions from various pollution sources in large cities, the Source Apportionment technology was used to quantify the contributions of sources to the pollution of the studied environments. The PMF receptor model was used for the first time to determine the contribution of dust, transport and industrial sources to the pollution of the Moscow atmosphere, which is necessary for assessing the air quality and geochemical load on terrestrial landscapes. The influence of long-range transport was estimated by calculating probable directions (reverse trajectories) of air advection using the NOAA HYSPLIT transport-dispersion model. Possible sources of metals and metalloids (MMs) in microparticles of Moscow road dust were identified using the PCA-MLR model. Statistical analysis of the experimental material allowed establishing the main factors and mechanisms that determine the spatial distribution of contamination of road dust and urban soils with MMs, as well as their most important carrier phases specific to different pollution sources. Based on the survey of the major rivers of Russia, a methodology and technology for hydrogeochemical analysis of river basins was elaborated. The analysis covers high-frequency (daily, weekly), seasonal and interannual variability of hydrological parameters, concentrations of chemical elements in dissolved and suspended forms, their particle size distribution, as well as chemical elements flows in river basins.

Keywords: microparticles, chemical analysis, aerosols, terrestrial and aquatic landscapes, pollution, source identification, technogenic impact

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 19-77-30004-P in the Moscow region). Summary of results (identification of anthropogenic sources) financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement 075-15-2021-574) under the federal project “Development of advanced infrastructure for research and development in the Russian Federation” of the national project “Science and Universities” and with the assistance of the Institute of Environmental Survey, Planning & Assessment (JSC “IESPA”).

REFERENCES

- Acosta J.A., Faz Á., Kalbitz K. et al. Heavy metal concentrations in particle size fractions from street dust of Murcia (Spain) as the basis for risk assessment, *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, vol. 13, p. 3087–3096, DOI: 10.1039/c1em10364d.
- Alastuey A., Querol X., Aas W. et al. Geochemistry of PM₁₀ over Europe during the EMEP intensive measurement periods in summer 2012 and winter 2013, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, vol. 16, p. 6107–6129, DOI: 10.5194/acp-16-6107-2016.
- Amato F., Alastuey A., Karanasiou A. et al. AIRUSE-LIFE+: A harmonized PM speciation and source apportionment in 5 Southern European cities, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, vol. 16, p. 3289–3309.
- Amato F., Pandolfi M., Viana M. et al. Spatial and chemical patterns of PM₁₀ in road dust deposited in urban environment, *Atmospheric Environment*, 2009, vol. 43, p. 1650–1659, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.12.009.
- Aminiyani M.M., Baalousha M., Mousavi R. et al. The ecological risk, source identification, and pollution assessment of heavy metals in road dust: a case study in Rafsanjan, SE Iran, *Environ Sci Pollut Res.*, 2018, vol. 25, p. 13382–13395, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8539-y>.
- Borris M., Österlund H., Marsalek J. et al. Snow pollution management in urban areas: an idea whose time has come? *Urban Water Journal*, 2021, vol. 18, no. 10, p. 840–849.
- Carslaw D.C., Beevers S.D. Characterizing and understanding emission sources using bivariate polar plots and k-means clustering, *Environmental Modelling & Software*, 2013, vol. 40, p. 325–329, DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.09.005.
- Cheng I., Al Mamun A., Zhang L. A synthesis review on atmospheric wet deposition of particulate elements: scavenging ratios, solubility, and flux measurements, *Environmental Reviews*, 2021, vol. 29, no. 3, p. 1–14, DOI: 10.1139/er-2020-0118.
- Dockery D.W., Pope C.A. Acute respiratory effects of particulate air pollution, *Annual Review of Public Health*, 1994, vol. 15, p. 107–132, DOI: 10.1146/annurev.pu.15.050194.000543.
- Ekogeokhimiya gorodov i rek Kryma (Trudy Krymskoi kompleksnoi ekspeditsii, vyp. 1)* [Ecogeochemistry of cities and rivers of Crimea (Proceedings of the Crimean complex expedition, no. 1)], N.S. Kasimov (ed.), Moscow, Moscow St. Un-ty Publ., 2022, 384 p. (In Russian)
- Ekogeokhimiya gorodskikh landshaftov* [Ecogeochemistry of urban landscapes], N.S. Kasimov (ed.), Moscow, Moscow St. Un-ty Publ., 1995, 336 p. (In Russian)
- Eremina I.D. Khimicheskii sostav atmosferykh osadkov v Moskve i tendentsii ego mnogoletnikh izmenenii [Chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and trends of its long-term changes], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 3, p. 3–10. (In Russian)
- Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in river waters, *Treatise on geochemistry*, Boca-Raton, Elsevier, 2014, p.195–235, DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00507-6.
- Geokhimiya landshaftov i geografiya pochv. 100 let so dnya rozhdeniya M.A. Glazovskoi* [Geochemistry of landscapes and soil geography. 100th birthday of M.A. Glazovskaya], N.S. Kasimov, M.I. Gerasimova (eds.), Moscow, Publ. House April, 2012, 599 p. (In Russian)
- Geokhimiya landshaftov Vostochnoi Moskvy* [Geochemistry of landscapes of Eastern Moscow], E.V. Dostovalova (ed.), Moscow, Publ. House April, 2016, p. 276. (In Russian)
- Geokhimiya landshaftov. K 100-letiyu so dnya rozhdeniya Aleksandra Il'icha Perel'mana* [Geochemistry of landscapes. 100th birthday of Aleksandr Il'ich Perel'man], N.S. Kasimov, A.N. Gennadiev (eds.), Moscow, Publ. House April, 2017, 544 p. (In Russian)
- Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Environmental geochemistry], A.I. Perelman (ed.), Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p. (In Russian)

- Gordeev V.V. *Geokhimiya sistemy reka-more* [Geochemistry of the river-sea system], Moscow, IP Matushkina I.I. Publ., 2012, 452 p. (In Russian)
- Gunawardana C., Egodawatta P., Goonetilleke A. Role of particle size and composition in metal adsorption by solids deposited on urban road surfaces, *Environmental Pollution*, 2014, vol. 184, p. 44–53, DOI: 10.1016/j.envpol.2013.08.010.
- Harrison R.M., Allan J., Carruthers D. et al. Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: a review, *Atmospheric Environment*, 2021, vol. 262, Article ID: 118592, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118592.
- Haynes H.M., Taylor K.G., Rothwell J., Byrne P. Characterisation of road-dust sediment in urban systems: a review of a global challenge, *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20, p. 4194–4217, DOI: 10.1007/s11368-020-02804-y.
- Ivaneev A.I., Brzhezinskiy A.S., Karandashev V.K. et al. Assessment of sources, environmental, ecological, and health risks of potentially toxic elements in urban dust of Moscow megacity, Russia, *Chemosphere*, 2023, vol. 321, 138142, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138142>.
- Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*, 4th edition, Boca Raton, CRC Press, 2011, 505 p.
- Kamani H., Hoseini M., Safari G.H. et al. Study of trace elements in wet atmospheric precipitation in Tehran, Iran, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186, p. 5059–5067, DOI: 10.1007/s10661-014-3759-9.
- Kasimov N., Chalov S., Chubarova N. et al. Urban heat and pollution island in the Moscow megacity, Urban environmental compartments and their interactions, *Urban Climate*, 2024, vol. 55, Article ID: 101972, DOI: 10.1016/j.uclim.2024.101972.
- Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M. et al. River water quality of the Selenga-Baikal basin, part II, Metal partitioning under different hydroclimatic conditions, *Water*, 2020, vol. 12(9), Article ID: 2392, DOI: 10.3390/w12092392.
- Kasimov N.S. *Ekogeokhimiya landshaftov* [Ecogeochemistry of landscapes], Moscow, IP Filimonov M.V. Publ., 2013, 208 p. (In Russian)
- Kasimov N.S., Bezberdaya L.A., Lychagin M.Yu. et al. *Ekogeokhimiya gorodov i rek Kryma* [Ecogeochemistry of towns and rivers of Crimea], Transactions of the Crimean Complex Expedition, iss. 1, Moscow, MSU Faculty of Geography Publ., 2022, 384 p.
- Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Popovicheva O.B. et al. Moscow megacity pollution: Monitoring of chemical composition of microparticles in the Atmosphere – Snow – Road Dust – Soil – Surface Water system, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2023, vol. 48, no. 5, p. 391–401, DOI: 10.3103/S1068373923050011.
- Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov S.R. et al. Bassejnovyj analiz potokov veshhestv v sisteme Selenga-Bajkal [Basin analysis of substance flows in the Selenga-Baikal system], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 3, p. 67–81. (In Russian)
- Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Lychagin M.Yu. *Ekologo-geograficheskii atlas-monografiya Selenga-Baikal* [Ecological and geographical atlas-monograph Selenga-Baikal], N.S. Kasimov (ed.), Moscow, Geograficheskii fakul'tet MGU Publ., 2019, 288 p. (In Russian)
- Kasimov N.S., Vlasov D.V. Klarki himicheskikh elementov kak etalony sravneniya v ekogeohimii [Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2015, no. 2, p. 7–17. (In Russian)
- Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E. Enrichment of road dust particles and adjacent environments with metals and metalloids in eastern Moscow, *Urban Climate*, 2020, vol. 32, Article ID: 100638, DOI: 10.1016/j.uclim.2020.100638.
- Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E. Khimicheskii sostav dorozhnoi pyli i ee fraktsii PM₁₀ kak indikator zagryazneniya gorodskoi sredy [Chemical composition of road dust and its fraction PM₁₀ as an indicator of urban pollution], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2021, vol. 10, no. 25, p. 43–49, DOI: 10.18412/1816-0395-2021-10-43-49. (In Russian)
- Kur'yakova A.N. Balans tyazhelykh metallov v del'te Volgi [The balance of heavy metals in the Volga river delta], *Doklady Akademii nauk*, 2011, vol. 439, no. 6, p. 818–821. (In Russian)
- Ladonin D.V., Mikhaylova A.P. Heavy metals and arsenic in soils and street dust of the Southeastern Administrative District of Moscow: Long-term data, *Eurasian Soil Science*, 2020, vol. 53, iss. 11, p. 1635–1644, DOI: 10.1134/S1064229320110095.
- Liang S.-Y., Cui J.-L., Bi X.-Y. et al. Deciphering source contributions of trace metal contamination in urban soil, road dust, and foliar dust of Guangzhou, southern China, *Sci Total Environ*, 2019, vol. 695, Article ID: 133596, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133596>.
- Lychagin M.Yu., Kasimov N.S., Kur'yakova A.N., Kroonenberg S.B. Geokhimicheskie osobennosti akval'nykh landshaftov del'ty Volgi [Geochemical features of aquatic landscapes of the Volga River Delta], *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk, Seriya geograficheskaya*, 2011, no. 1, p. 100–113. (In Russian)
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Kurchatova A.N., Timshanov R.I. Geokhimicheskaya kharakteristika snezhnogo pokrova Tyumeni [Geochemical characteristics of the snow cover of Tyumen], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 3, p. 13–26. (In Russian)
- Neft' i okruzhayushchaya sreda Kaliningradskoi oblasti* [Oil and environment of the Kaliningrad region], N.S. Kasimov et al. (eds.), Kaliningrad, Yantarnyi skaz Publ., 2008, 360 p. (In Russian)
- Padoan E., Romè C., Ajmone-Marsan F. Bioaccessibility and size distribution of metals in road dust and roadside soils along a peri-urban transect, *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 601–602, p. 89–98, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.180.
- Popovicheva O., Chichaeva M., Kovach R. et al. Seasonal, weekly, and diurnal black carbon in Moscow megacity background under impact of urban and regional sources, *Atmosphere*, 2022, vol. 13, Article ID: 563, DOI: 10.3390/atmos13040563.
- Popovicheva O., Diapouli E., Chichaeva M. et al. Aerosol characterization and peculiarities of source apportionment in Moscow, the largest and northernmost European megacity, *Science of the Total Environment*, 2024a, Article ID: 170315, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170315.
- Popovicheva O., Chichaeva M., Kovach R. et al. Impact of Wave COVID-19 Responses on Black Carbon Air Pollution in Moscow Megacity Background, *Aerosol and Air Quality Research*, 2024b, vol. 24, p. 230266–230266, DOI: 10.4209/aaqr.230266.
- Rai P., Furger M., El Haddad I. et al. Real-time measurement and source apportionment of elements in Delhi's atmos-

- phere, *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 742, Article ID: 140332, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140332.
- Reimann C., Birke M., Demetriades A. et al. *Chemistry of Europe's agricultural soils*, part A, Methodology and interpretation of the GEMAS data set, Hannover, Schweizerbarth, 2014, 528 p.
- Rudnick R.L., Gao S. *Composition of the Continental Crust, Treatise on Geochemistry*, Boca-Raton, Elsevier, 2014, p. 1–51, DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6.
- Savenko V.S. *Khimicheskii sostav vzveshennykh nanosov rek mira* [Chemical composition of suspended sediments of the world's rivers], Moscow, GEOS Publ., 2006, 175 p. (In Russian)
- Semenova A., Popovicheva O., Zavgorodnyaya Yu. et al. Aerosol Pollution of the Moscow Megacity by Polyaromatic Hydrocarbons: Seasonal Variability and Toxicological Risks, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2023, vol. 93, p. 316–329, DOI: 10.1134/s1019331623040056.
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*, Third Edition, Hoboken, John Wiley & Sons, 2013, 1149 p.
- Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P. Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities, *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, Article ID: 1668, DOI: 10.1038/s41598-020-58434-4.
- Semerjian L., Okaiyeto K., Ojemaye M.O. et al. Global systematic mapping of road dust research from 1906 to 2020, Research gaps and future direction, *Sustainability*, 2021, vol. 13, Article ID: 11516, DOI: 10.3390/su132011516.
- Serdjukova A.D., Vlasov D.V., Popovicheva O.B. et al. Elemental composition of atmospheric PM₁₀ during COVID-19 lockdown and recovery periods in Moscow (April–July 2020), *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, vol. 45, p. 7909–7931, DOI: 10.1007/s10653-023-01698-2.
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D. et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2015, vol. 96, p. 2059–2077.
- Sutherland R. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii, *Environmental Geology*, 2000, vol. 39, p. 611–627, DOI: 10.1007/s002540050473.
- Thurston G.D., Ito K., Lall R. A source apportionment of U.S. fine particulate matter air pollution, *Atmos Environ*, 2011, vol. 45, p. 3924–3936, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.070.
- Tripathee L., Guo J., Kang S. et al. Measurement of mercury, other trace elements and major ions in wet deposition at Jomsom: The semi-arid mountain valley of the Central Himalaya, *Atmospheric Research*, 2020, vol. 234, Article ID: 104691, DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104691.
- Uchiyama R., Okochi H., Katsumi N., Ogata H. The impact of air pollutants on rainwater chemistry during “urban-induced heavy rainfall” in downtown Tokyo, Japan: Heavy rain formation and air pollutants, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, vol. 122, no. 12, p. 6502–6519, DOI: 10.1002/2017JD026803.
- Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database, *Science of the Total Environment*, 2009, vol. 407, no. 2, p. 853–868, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.09.053.
- Vlasov D., Kosheleva N., Kasimov N. Spatial distribution and sources of potentially toxic elements in road dust and its PM₁₀ fraction of Moscow megacity, *Science of the Total Environment*, 2021b, vol. 761, Article ID: 143267, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143267.
- Vlasov D.V., Kasimov N., Eremina I. et al. Major ions and potentially toxic elements in atmospheric precipitation during the COVID-19 lockdown in Moscow megacity, *Urban Climate*, 2023a, vol. 48, Article ID: 101422, DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101422.
- Vlasov D.V., Kasimov N., Eremina I. et al. Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity, *Atmospheric Pollution Research*, 2021a, vol. 12, no. 1, p. 255–271, DOI: 10.1016/j.apr.2020.09.012.
- Vlasov D.V., Kukushkina O.V., Kosheleva N.E., Kasimov N.S. Levels and factors of the accumulation of metals and metalloids in roadside soils, road dust, and their PM₁₀ fraction in the Western Okrug of Moscow, *Eurasian Soil Science*, 2022, vol. 55, no. 5, p. 556–572, DOI: 10.1134/S1064229322050118.
- Vlasov D.V., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: Partitioning and deposition rates in Western Moscow, *Atmosphere*, 2020, vol. 11, Article ID: 907, DOI: 10.3390/atmos11090907.
- Vlasov D.V., Vasil'chuk J.Yu., Kosheleva N.E., Kasimov N.S. Contamination levels and source apportionment of potentially toxic elements in size-fractionated road dust of Moscow, *Environmental Science and Pollution Research*, 2023b, vol. 30, p. 38099–38120, DOI: 10.1007/s11356-022-24934-1.
- Zappi A., Popovicheva O., Tositti L. et al. Factors influencing aerosol and precipitation ion chemistry in urban background of Moscow megacity, *Atmospheric Environment*, 2023, vol. 294, Article ID: 119458, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2022.119458.
- Zeng J., Han G., Zhang S. et al. Potentially toxic elements in rainwater during extreme rainfall period in the megacity Beijing: Variations, sources, and reuse potential, *Atmospheric Environment*, 2024, vol. 318, Article ID: 120242, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.120242.
- Zhang J., Li R., Zhang X. et al. Vehicular contribution of PAHs in size dependent road dust: A source apportionment by PCA-MLR, PMF, and UNMIX receptor models, *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 649, p. 1314–1322, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.410.

Web sources

- Himicheskij sostav mikrochastits v okružhayuschej srede Moskvy [Chemical composition of microparticles in the environment of Moscow], Moscow, Faculty of Geography, 2023, 300 p., URL: http://media.geogr.msu.ru/Digest_Moscow_electron.pdf (accessed on 10.08.2024).
- Vozdushnye i vodnye potoki pollutantov v Rossijskoj Arktike [Aerial and water flows of pollutants in the Russian Arctic], Moscow, Faculty of Geography, 2024, 197 p., URL: <https://www.geogr.msu.ru/news/izdan-elektronnyy-daydzhest-vozdushnye-i-vodnye-potoki-pollyutan-tov-v-rossijskoj-arktike/> (accessed on 20.10.2024).

Received 20.05.2024
Revised 10.10.2024
Accepted 26.11.2024

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МИРОВОГО ТУРИСТСКОГО РЫНКА В КРУПНЕЙШИЕ КРИЗИСЫ НАЧАЛА XXI в.

А.Ю. Александрова¹, В.Е. Домбровская²

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра рекреационной географии и туризма*

² *Тверской государственный университет, географический факультет, кафедра туризма и природопользования*

¹ *Проф., д-р геогр. наук; e-mail: analexan@mail.ru*

² *Доц., канд. физ.-мат. наук; e-mail: Dombrovskaya.VE@tversu.ru*

Современное мировое пространство характеризуется сложной неоднородной структурой, высокой степенью изменчивости, регулярно повторяющимися кризисами. Туризм одним из первых реагирует на любые политические, экономические, природно-климатические и прочие изменения. При этом очевидно, что в силу многообразия туристских регионов и факторов, влияющих на их формирование и развитие, эта реакция не может быть синхронной и идентичной. Варианты моделей поведения стран на мировом туристском рынке в рамках центр-периферийного подхода находятся в фокусе внимания данной работы. Объектом исследования выступают пространственно-временные изменения в международном туризме за 1995–2022 гг. В указанный период времени мировая экономика претерпела три серьезных коллапса: кризис, связанный с терактом 11 сентября 2001 г., глобальный экономический кризис 2009 г. и пандемия COVID-19. Цель работы заключается в осуществлении группировки национальных туристских дестинаций по признаку реакции на указанные кризисные периоды. Для достижения цели применяются математико-статистические методы: кластерный анализ и метод, основанный на расчетах показателей темпа роста международных туристских прибытий. Дан сравнительный анализ сценариев поведения национальных туристских дестинаций как отдельно по каждому кризису, так и по всем трем кризисам в совокупности. В результате выявлены следующие модели поведения: 1) стабильно растущая; 2) запаздывающие: а) пролонгированной реакции; б) затяжного выхода; 3) модель стабильного спада; 4) оздоравливающего влияния; 5) быстрого выхода. В статье предлагается анализ совокупности факторов, влияющих на то или иное развитие событий в ряде отдельных стран. Исследование носит пилотный характер и может быть продолжено в направлениях изучения факторов, определяющих столь разную социально-экономическую динамику в туристских дестинациях, а также расширения используемого методического аппарата.

Ключевые слова: туризм, туристский поток, туристская дестинация, мировой экономический кризис, центр-периферический подход, кластерный анализ, методы математической статистики, модели поведения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.2

ВВЕДЕНИЕ

Развитие туризма характеризуется пространственно-временной неравномерностью. Туристские потоки концентрируются в районах с более благоприятными условиями для занятий туристской деятельностью. Ряд туристских дестинаций, приобретая чрезмерную популярность благодаря эффективным маркетинговым кампаниям, не справляются с массовым наплывом посетителей и сталкиваются с проблемами сверхтуризма. Наряду с ними есть еще немало территорий, которые пока недостаточно включены в сферу туристских обменов.

Пространственная неравномерность в распределении туристских потоков прослеживается на всех иерархических территориальных уровнях – от отдельных локаций до туристских макрорегионов

мира. Существующие перекосы в территориальной структуре международных туристских прибытий в мире отражены на рис. 1. Картограмма наглядно демонстрирует доминирование Европейского, Азиатско-Тихоокеанского и Американского макрорегионов и отставание остальных в глобальном туристском пространстве. Картограмма составлена на последние благоприятные годы перед глубоким кризисом, вызванным COVID-19.

Ограничения на мобильность, введенные в условиях пандемии COVID-19, привели к резкому повсеместному сворачиванию туристской деятельности. Туризм был признан одной из самых пострадавших сфер мирового хозяйства. Международные туристские потоки сократились на 73% в 2020 г. по сравнению с 2019 г. Доходы от экспорта туристских

услуг упали на 1,1 трлн долл. К концу 2023 г. мировой рынок международного туризма восстановился на 88% [UN..., 2023].

Во всех без исключения туристских макрорегионах мира в 2020 г. отмечалось свертывание туристской активности по сравнению с 2019 г., но глубина спада была разной. Наиболее сильно пострадал Азиатско-Тихоокеанский регион (–84%

международных туристских прибытий), который первым принял удары пандемии и где были введены самые жесткие запреты на туристские поездки. Минимальный спад отмечался в Европейском макрорегионе (–70%), но в абсолютном выражении он недосчитался наибольшего количества туристских прибытий (свыше 500 млн) [The UNWTO..., 2024].

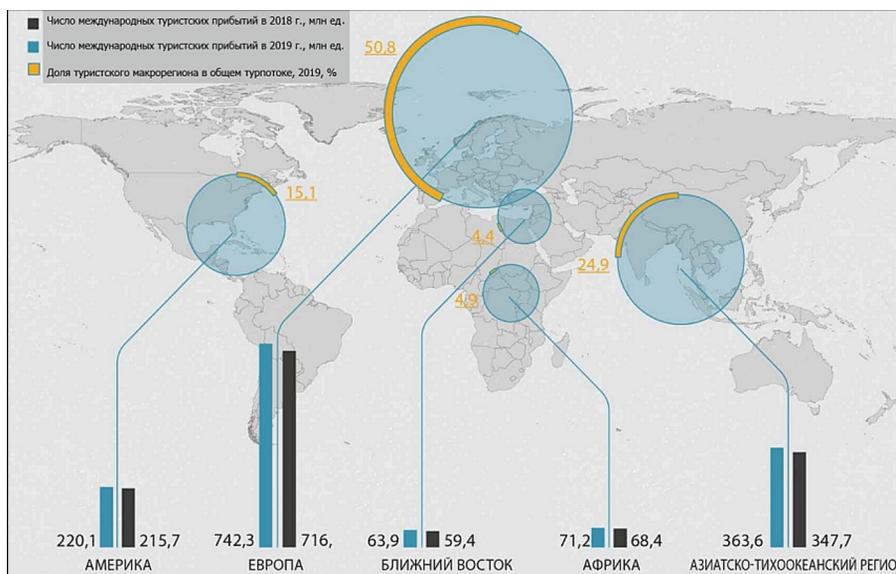


Рис. 1. География международного туризма в мире в допандемийные 2018 и 2019 гг.
Источник: составлено по [The UNWTO..., 2024]

Fig. 1. Geography of international tourism in the world in pre-pandemic 2018 and 2019.
Compiled by: [The UNWTO Tourism Data Dashboard, 2024]

По-разному протекал кризис и в разных странах. Некоторые из них, как, например, Монголия или Республика Маврикий, практически полностью лишились въездных туристских потоков (–94 и –89% соответственно в 2021 г. к уровню 2019 г.). Другим, как Мексика или Черногория, удалось избежать столь сильных падений (–22 и –31% соответственно) [The UNWTO..., 2024].

COVID-19 – первая пандемия в послевоенной истории, которая привела к мировому кризису, в частности в туризме. Однако этот кризис не единственный. Кризисы регулярно повторяются, выводя из равновесия туристские рынки. Наиболее разрушительное воздействие на туристскую индустрию в XXI в., кроме пандемии, оказали эпидемия атипичной пневмонии SARS, теракты 11 сентября 2001 г. и глобальный экономический кризис 2009 г. Для полного восстановления мирового туристского рынка тогда потребовалось 11, 14 и 18,5 месяцев соответственно [International..., 2020].

В статье авторы, используя современный математический аппарат, пытаются дать ответ на вопрос, как страны «центра», «полупериферии» и «перифе-

рии» глобального туристского пространства пережили кризисы в XXI в.

Одним из вариантов библиографических исследований служит обращение к академическим поисковым системам и базам данных (ASEBD). Ограничение доступа для российских пользователей к коммерческим международным системам Web of Science и Scopus ставит задачу поиска новых информационных ресурсов. Для осуществления выбора в пользу той или иной наукометрической базы необходимо ориентироваться не столько на общее количество публикаций в базе, сколько на объем работ, соответствующих интересующей тематике. Также немаловажными критериями служат доступность информации (свободный или коммерческий режим использования) и удобство обращения, а именно формирование запроса. В данной работе в качестве источника информации была выбрана наукометрическая база The Lens. Данное предпочтение объясняется рядом причин: 1) масштабом ресурса (на настоящий момент на платформе проиндексировано 278,5 млн научных работ); 2) гибкостью запросов без использования элементов программирования

Здесь выделяются три мощных кластера. Один из них (условно № 1), появившийся в результате распространения пандемии COVID-19, группирует работы, оценивающие влияние кризиса на экономику туризма. Также в этой совокупности встречаются научные исследования, связанные с моделированием и получением прогнозов развития ситуации. Следующий кластер (кластер № 2) объединяет работы, посвященные вопросам глобализации, развитию туризма в условиях кризиса, перераспределению туристских

потоков, роли человеческого капитала в решении вопроса восстановления отрасли и т. д. Третья группа работ (кластер № 3) рассматривает воздействие на туризм демографического, социально-экономического, социально-политического факторов, а также культурных традиций регионов и их связи с потребительским поведением потенциальных гостей.

На рис. 3 можно видеть временную тенденцию заинтересованности в вышеобозначенных направлениях научных исследований.

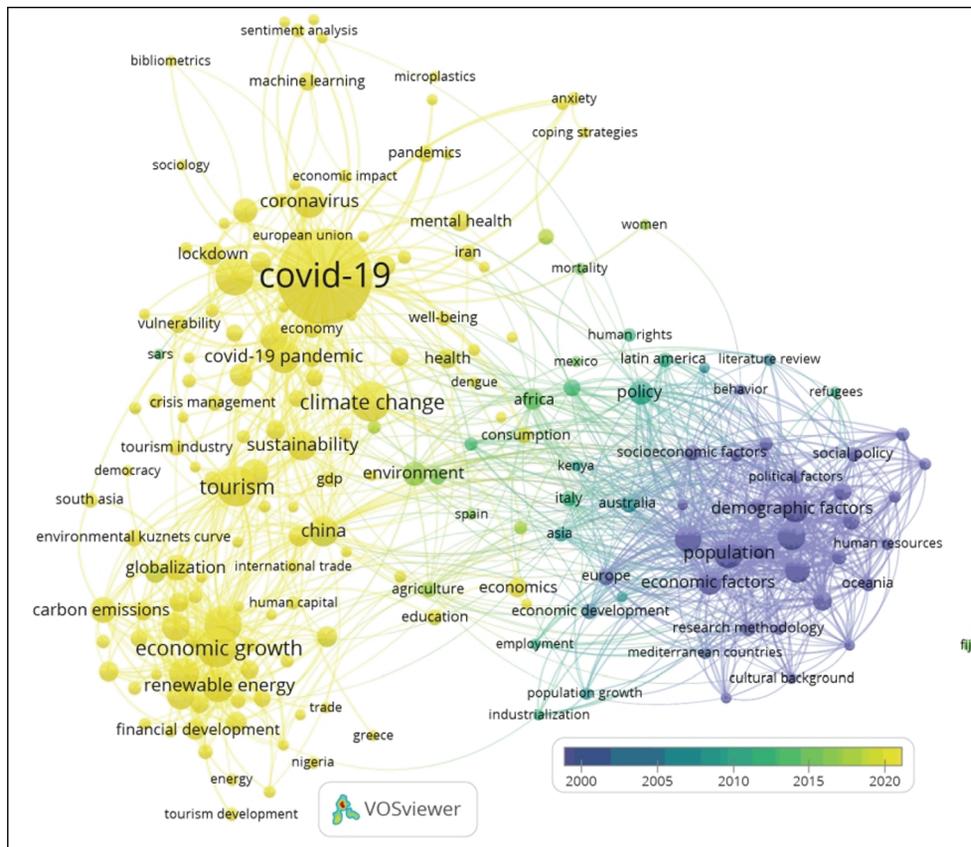


Рис. 3. Картирование временной градации в работах, посвященных влиянию экономических кризисов на сферу туризма. Источник: визуализация средствами VOSviewer

Fig. 3. Picture of temporary gradation in works devoted to the influence of economic crises on the sphere of tourism. Source: visualization by VOSVIEWER

Так, публикации кластера № 3 появились много раньше остальных, группы № 1 и 2 обобщают более молодые по дате выпуска исследования.

Как показал анализ отечественных научных статей, тематика влияния экономических кризисов на сферу туризма вызывает устойчивый интерес и затрагивает ряд аспектов. Наибольшее число авторов сосредоточили внимание на COVID-19, изучая в том числе пространственные закономерности распространения и управленческие меры по борьбе с заболеваемостью в различных странах и регионах [Панин и др., 2021]. Значителен вклад работ, рас-

крывающих проблему последствий пандемии и оценку перспектив полноценного восстановления туристской отрасли [Цехла, 2021; Гуревич и др., 2020; Леонидова, 2021; Степанов, 2021]. Ряд работ посвящен изучению вопроса под углом зрения воздействия на региональные социально-экономические системы. В этом случае помимо общемировых экономических кризисов выделяется период 2014–2015 гг., характеризующийся введением санкций, существенно повлиявших на выездные туристские потоки. При этом исследователи предлагают рассматривать кризис как положительный фактор,

открывающий новые возможности развития внутреннего туризма, перехода от импорта туристских услуг к инвестированию в собственные региональные туристские продукты и программы, повышающие их качественный уровень [Голубчиков и др., 2015; Рубцова, 2018; Воронцова, 2015; Абалаков, Панкеева, 2011].

Наиболее масштабный взгляд на роль экономических кризисов в развитии мирового туризма встречается не так часто. Авторы отмечают относительную устойчивость туризма, реакцию на экономические катаклизмы, скорее, со стороны предложения нежели с позиций спроса, что может способствовать появлению новых туристских дестинаций в тех странах, которые по той или иной причине не использовали в полной мере рекреационный потенциал [Келлер, 2013]. Оценивая ситуацию российского туристского рынка, в работах обосновывается ряд государственных антикризисных мер, а также решений, ожидаемых от бизнес-сообщества [Джанджугазова, Первунин, 2015]. Поиск возможностей расширения въездного туризма приводит к ориентированию вектора внимания на восток, в частности развития сотрудничества с Китаем [Корчагин, 2015].

Расширить библиографический обзор по обозначенной тематике позволит обращение к кандидатским и докторским диссертациям отечественных ученых. Источником информации послужили материалы «Электронной библиотеки диссертаций» [Научная..., 2024]. Общий перечень научных исследований, в которых упоминается связь экономического (финансового) кризиса и туризма, насчитывает 1393 позиции. Однако в большинстве случаев обращение к этим понятиям ограничивается разделом «Введение» и в дальнейшей работе рассмотрению не подлежит. В четырнадцати диссертациях, из которых четыре проходили на соискание ученой степени доктора экономических наук, 10 – кандидата экономических наук, вышеобозначенной проблематике были посвящены главы. Превалирующее количество работ относится к периоду 2009–2013 гг. и исследуют последствия финансового кризиса 2008–2009 гг. В частности, это оценка влияния мирового экономического кризиса на состояние туристской отрасли РФ в целом и развитие туристско-рекреационного комплекса региона, поиск инновационных подходов к регулированию рынка туристских услуг в условиях кризиса, вопросы управления организациями индустрии гостеприимства, обращение к въездному туризму как направлению послекризисного развития экономики.

Работы, датированные 2021 и 2022 гг., ожидаемо концентрируют внимание на общемировых изменениях в международной туристской деятельности,

спровоцированных COVID-19, и касаются частных вопросов: развития цифровизации в туризме и гостиничном бизнесе; особенностей формирования стратегии управления гостиничными предприятиями в условиях политической нестабильности и экономического кризиса; показателей функционирования сегмента средств коллективного размещения в России в настоящее время.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются ряды динамики туристских прибытий (иностранцы) по странам мира за 1995–2022 гг. [145 key..., 2024]. В течение указанного периода времени в мировой экономике можно выделить три экономических кризиса: кризис, связанный с терактом 11 сентября 2001 г., глобальный экономический кризис 2009 г. и пандемия COVID-19. Постановка задачи заключается в осуществлении группировки стран по признаку реакции на указанные кризисные периоды. Для достижения этой цели предлагается использовать два подхода: 1) метод кластеризации и 2) метод, основанный на расчетах показателей темпа роста. Оба эти приема нуждаются в некоторых пояснениях.

Кластерный анализ (часто упрощаемый в названии до «кластеризации») представляет собой совокупность математических методов, предназначенных для формирования относительно «отдаленных» друг от друга групп «близких» между собой объектов по информации о расстояниях или связях (мер близости) между ними [Статистический..., 1989, с. 197]. Явным достоинством кластерного анализа является возможность его применения как к совокупности массивов, включающих целый комплекс разнообразных параметров, так и к временным рядам, рассматривающим динамику одного показателя, как в данной работе. Группировка осуществляется по принципу иерархической кластеризации. Однако важно учитывать, что по итогу применения методики будут формировать группы, даже если анализируемый набор данных представляет собой полностью случайную структуру. Поэтому необходимым этапом решения задачи выступает валидация кластеров, т. е. проверка обоснованности их выделения. Гипотеза, проверяемая в работе, заключается в том, что «сценарий проживания» кризиса, совокупное влияние факторов, формирующих въездной туристский поток, в ряде стран может иметь сходный характер, что и будет являться основанием для обобщения их в единый кластер.

Применение второго метода нуждается в предварительной подготовке данных. Очевидно, что сам кризис нельзя рассматривать в отрыве от остальных фаз цикла. Характер кризиса определяется всем предшествующим развитием, сам кризис, в свою

очередь, определяет дальнейшее развитие. Поэтому в исследовании рассматриваются докризисный и посткризисный периоды. По данным ЮНВТО, на восстановление глобального рынка международного туризма к докризисному уровню ушло 14 месяцев в случае кризиса 2001 г. и 18,5 месяцев после финансового кризиса 2009 г. По мнению ряда экспертов, на март 2024 г. мировой рынок туризма не только вос-

становился после пандемии COVID-19, но и превзошел допандемийный 2019 г. [И немедленно..., 2024]. Таким образом, на настоящий момент времени представляется возможным в каждом интервале времени, условно называемом «период экономического кризиса», выделить подынтервалы предкризиса (ПК), собственно кризиса (К) и посткризиса (выход из кризиса, ВК), как это представлено в табл. 1.

Таблица 1

Архитектура рассмотрения периодов мировых экономических кризисов 1995–2022 гг.

1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Кризис терактов 11.09.2001									Экономический кризис 2009						Кризис COVID-19												
ПК						К	ВК	ПК			К	ВК	ПК						К	ВК							

Источник: составлено авторами.

На каждом выделенном подынтервале для всех стран, попавших в выборку, рассчитывается показатель темпа роста (или усредненного темпа роста, если интервал захватывает несколько лет), и в зависимости от того, больше он или меньше 100%, присваивается значение либо «1» (положительная динамика), либо «2» (отрицательная динамика). Таким образом, страна получает некий индекс из трех цифр, дающий представление о ситуации на туристском рынке в течение всего периода, обозначенного как «экономический кризис». Так, государства, туристский поток в которые показывал темп роста выше 100% на протяжении всего временного отрезка, составляют группу «111». Если при положительной тенденции в предкризис наблюдается падение показателей в период собственно кризиса с последующим быстрым восстановлением, страна попадает в группу «121». Интерпретация возможных комбинаций получаемых индексов представлена в табл. 2.

Нужно уточнить, что для попадания страны в выборку, необходим полноценный набор данных по всем обозначенным моментам времени, что, к сожалению, не всегда можно наблюдать. Сборник статистики туризма ЮНВТО [Compendium..., 2012], использующий в качестве источника информации национальные туристические администрации, национальные статистические управления и проч., признает, что в настоящее время значительное число стран не смогут предоставить полную информацию по всем показателям, и поэтому пользователи могут обнаружить лишь частичный охват при сравнении определенных тематических областей [Methodological..., 2019]. Это объясняет различный

объем выборок стран в анализе по каждому из трех мировых кризисов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Задача типологии территорий находилась в фокусе внимания научного мира достаточно давно. Для выделения относительно устойчивых объективно сложившихся комплексов стран используются различные подходы, в том числе с учетом отраслевой специфики [Бабурин и др., 2023]. Что же касается туристских территорий, то на Западе одной из наиболее известных и распространенных является классификация стран по уровню экономического развития, разработанная аналитической группой Всемирного банка. Именно ее используют в своей работе Всемирная туристская организация и другие международные организации в области туризма [Compendium..., 2012]. В современной российской географии пользуется заслуженной популярностью классификация туристских территорий на основе центр-периферийного подхода, в основу которого легло неравенство в международном туристском разделении труда [Александрова, 2002]. Более глубокий анализ, построенный на показателях размера территории и численности населения, общего уровня социально-экономического развития, уровня и характера развития международного туризма, особенностях туристского спроса и предложения, ориентированности туристских потоков, степени влияния международного туризма на национальную экономику, государственной политики в сфере туризма и туристской специализации позволил выделить пять типов стран.

**Вербальная интерпретация комбинаций индексов по темпам роста туристского потока
в подынтервалах кризиса**

Комбинированный индекс	Вербальная интерпретация
111	Отсутствие влияния кризиса на туристский поток
121	Быстрый выход из кризиса
122	Затяжной выход из кризиса
112	Пролонгированная реакция на кризис
222	Стабильно отрицательная динамика туристского потока на всех выделяемых временных отрезках
221	Положительное влияние антикризисных мер в период выхода из кризиса

Первый тип (центр мирового туристского пространства) – экономически высокоразвитые страны со зрелыми национальными системами международного туризма, комплексной туристской специализацией, к числу которых можно отнести *главные туристские страны* – США, Францию, Германию, Великобританию, Италию, Испанию, а также *небольшие по территории и численности населения высокоразвитые туристские страны Западной Европы* (Австрия, Швейцария, Бельгия, Нидерланды).

Второй тип – новые туристские страны, относящиеся к «полупериферии» мирового туристского пространства, с интенсивно формирующейся при поддержке государства полифункциональной системой международного туризма, преимущественно внутрорегиональной ориентированностью туристских потоков и растущим межрегиональным туристским обменом. Страны этой группы – Малайзия, Сингапур, Таиланд, Республика Корея, Турция, Объединенные Арабские Эмираты, Китай и др.

Третий тип – среднеразвитые страны «полупериферии» мирового туристского пространства с полифункциональной системой международного туризма в стадии трансформации и формирования цивилизованного рынка путешествий и внутрорегиональной ориентированностью туристских потоков. К этому типу относятся *страны Центрально-Восточной Европы* – Венгрия, Польша, Чешская Республика, Словакия, Словения.

Четвертый тип – *малые островные государства* (территории) *Карибского бассейна*, которые относятся к «полупериферии» и частично к «продвинутой» «периферии» мирового туристского пространства и представляют собой американский курорт приморского типа: Аруба, Антигуа и Барбуды, Багамы, Ямайка и проч.

Пятый тип – развивающиеся страны, относящиеся к «периферии» мирового туристского пространства, со слабо развитым рынком международного туризма, анклавным характером развития и природно-ориентированным типом международ-

ного туризма. Группу составляют главным образом *страны Восточной и Южной Африки* – Кения, Танзания, Намибия, Ботсвана, Зимбабве, Уганда и др. [Александрова, 2016].

Исследование международного туризма требует количественных показателей, а именно статистических данных, сбором и обобщением которых занимается ЮНВТО, публикуя результаты работы в специальных сборниках The Compendium of Tourism Statistics. С утверждением ООН новой международной методики измерения туризма – Международных рекомендаций по статистике туризма 2008 г. (IRTS 2008) – вышеуказанный статистический сборник претерпел пересмотр структуры и содержания его основных индикаторов, необходимых для международной сопоставимости данных о туризме. В частности, сейчас в нем содержится 145 показателей, посвященных въездному, выездному и внутреннему туризму; секторам туристской индустрии: размещению, питанию, перевозкам посетителей; деятельности туристских фирм; занятости в сфере туризма и проч. Яркими параметрами успешности национального туризма выступают объем потока туристов и доходы от туризма. Представляет интерес анализ корреляционной зависимости между двумя этими показателями по странам мира (рис. 4).

Как видно из результатов исследования, хотя все коэффициенты корреляции предсказуемо имеют прямо пропорциональную зависимость, тем не менее сила связи не всегда близка к 1. Наиболее плотную связь можно наблюдать в США (0,99), Турции (0,96), Японии (0,95), Германии (0,95), Египте (0,96) и др. При этом в ряде государств прослеживается средняя по силе связь. К их числу относятся Россия (0,75), Люксембург (0,73), Кипр (0,62) и Финляндия (0,61). Есть и представители стран с очень низким показателем этих коэффициентов: Польша (0,22), Греция (0,19) и Португалия (0,17). Таким образом, можно предположить, что объем турпотока не является единственным фактором, обеспечивающим доходы от туристской сферы. Большую роль игра-

Таблица 3

Модели поведения стран «центра» в период кризиса после 11 сентября 2001 г.

Код страны, полученный по методу расчетов темпов роста в подынтервалах «предкризис – кризис – выход из кризиса»			
111	121	112	122
Австрия Испания	Германия Великобритания	Бельгия	Франция Италия Нидерланды Швейцария США

Таблица 4

Модели поведения новых туристских стран (стран «полупериферии») в период кризиса после 11 сентября 2001 г.

Код страны, полученный по методу расчетов темпов роста в подынтервалах «предкризис – кризис – выход из кризиса»				
111	121	112	122	222
Турция Объединенные Арабские Эмираты	–	Малайзия Таиланд Республика Корея	–	Сингапур

Страны третьего типа либо относятся к группе с запоздалой реакцией на кризис (например, Россия, Венгрия), либо и до кризиса не отличались активностью в сфере туризма (например, Польша). Только Чешской Республике удалось достаточно быстро восстановить туристский поток.

Среди стран (территорий) Карибского бассейна (четвертый тип) можно выделить группу проявивших устойчивость к кризису (код 111) – Белиз, Коста-Рика, Гренада. Есть и такие страны, которые довольно быстро смогли вернуть количественные показатели туристского потока к прежним величинам, – Ямайка, Доминика, Доминиканская Республика, Барбадос. Данное положение нуждается в дополнительном пояснении, ведь страны Карибского бассейна тесно связаны в туристском отношении с такими странами Центра, как США и Канада, и являются фактически моноотраслевыми. Если указанные страны первого типа отреагировали на кризис 2001 г. столь серьезным снижением туристского потока, то как же некоторым территориям Кариб удалось этого избежать? Объяснение кроется в нескольких факторах. Во-первых, данный регион не зря получил название «Райских уголков». Он обладает всеми преимуществами тропической зоны, обеспечивающими круглогодичный туризм. Знакомые по ярким буклетам пляжи с белым песком, бирюзовая в солнечную погоду морская вода, удивительные по красоте природные ландшафты – вот то, чем привлекают эти территории, и что плотно укоренилось в сознании мирового туристического сообщества, тяготеющего к гедонистическому отдыху.

Также востребованным в этом регионе является круизный туризм. Нужно отметить благоприятную роль географической близости к США и стратегически выгодного положения на главных торговых путях в Западном полушарии, между Европой и Америкой. Все это способствует росту турпотоков. Второй фактор заключается в том, что, начиная с 1950-х гг., многие жители региона по разным, но чаще экономическим причинам мигрировали в Великобританию, Канаду, США. Следствием этого стало создание многочисленных карибских культурных диаспор по всему миру. Эти сообщества в настоящее время служат важными источниками туристов, поскольку многие карибские экспатрианты, проживающие за границей, часто ездят «домой», чтобы навестить семью и друзей. Третья причина, актуальная именно для изучаемого временного отрезка, заключается в событиях начала 2000-х гг., когда национальные валюты во многих странах Карибского бассейна обесценились по отношению к курсу американского доллара. В результате отдых в них существенно подешевел для жителей североамериканских мегаполисов, на долю которых приходится более 70% рынка въездного туризма в Карибском бассейне [Dehoorne et al., 2010].

Нельзя не отметить, что такая сильная зависимость от одного рынка въездного туризма, пусть и самого емкого в Западном полушарии, сопряжена с очень высокими рисками. Развивающаяся страна не может контролировать внешних поставщиков туристов (туроператоров, авиакомпаний) и часто становится «заложником» ситуации. Ярким при-

мером может служить решение компании American Airlines о сокращении числа рейсов на 10%, причиной которому послужил существенный рост цены на нефть (2004 г.). Этому примеру последовали United Airlines и Continental. Все они обеспечивали авиаперевозки, в том числе и по Карибскому региону. Свертывание воздушного сообщения негативно повлияло на международный туристский обмен. Аналогичным образом сказались и события 11 сентября 2001 г. Таким образом, вполне логичным представляется выявление группы стран, не сумевших преодолеть последствия негативного экономического удара 2001 г. (в частности, Багамы, где произошло не только снижение туристского потока, но и затяжной выход из кризиса).

Страны пятого типа в меньшей степени испытали на себе влияние кризиса. Безусловно, в этих странах объемы въездных туристских потоков в сравнении с государствами «центра» и «полупериферии» существенно ниже, но объяснять этим проявление «стойкости» туристской сферы в кризисный период было бы ошибочным.

В экономике стран «периферии» международный туризм часто играет очень важную роль. С начала XXI в. Африка является одним из самых быстроразвивающихся туристических регионов, делающих акцент на стимулировании так называемого VIP-туризма (elite tourism, luxury tourism, luxury travel). Африканский континент с начала XX в. привлекал путешественников гармоничным сочетанием уникальных природных ландшафтов, эндемичной флоры и фауны, самобытной культуры местного населения. В настоящее время традиционные направления, такие как пляжный туризм, сафари, посещение национальных парков, расширяются новыми маршрутами, и при этом неукоснительно соблюдается условие сохранения привычного уровня комфорта туриста. Основные черты этого сегмента – максимально высокое качество туристического продукта с упором на индивидуальный подход к клиенту, что не может не сказываться на цене, во много превышающей стоимость услуги для обычного среднестатистического туриста. Это способствует привлечению местных и иностранных инвестиций в развитие отрасли, что в свою очередь создает новые рабочие места и оказывает поддержку развитию экономики не только в традиционных местах привлечения туристов (Маврикий, Сейшелы, Тунис), но и в странах, входящих в список беднейших. При этом элитный туризм чаще всего практически не чувствителен к кризисам [Прокпенко, 2022].

Кризис 2009 г. Международный финансовый кризис 2008–2009 гг., затронувший экономики большинства стран мира, ударил и по туристской активности. Единственная страна «центра», кото-

рую в данном отношении он не затронул, т. е. на всем обозначенном временном отрезке территория сохранила позиции роста (код 111) – Австрия. Все остальные страны этого типа вошли в группу 121 – испытали заметное снижение туристского потока в период кризиса, но достаточно быстро восстановили докризисные показатели. Государства, относимые ко второму типу, частично вошли в группу 111 – Республика Корея, Малайзия, Турция. Особо внимания здесь заслуживает кейс Республики Корея, активно развивающей специальную программу медицинского туризма, в рамках которой все больше иностранцев приезжают для прохождения комплексных обследований, лечения сложных заболеваний и проведения пластических процедур. Спрос на эти туристские услуги слабо реагирует на циклические колебания в экономике и находится на подъеме. По информации министерства здравоохранения, в 2009 г. доходы от медицинского туризма принесли в казну Южной Кореи 54,7 млрд вон (48,88 млн долл. США), а число зарубежных прибытий составило приблизительно 219% в сравнении с аналогичным показателем 2008 г. [Южная..., 2010]. Государства Таиланд, Сингапур, Китай, получив код 121, показали успешность антикризисных мер и достаточно быстро вышли на положительный темп роста туристских потоков.

Страны третьего типа при существенном кризисном падении количества туристов также продемонстрировали способность к восстановлению отрасли. В группе с кодом 121 оказались Россия, Чешская Республика, Польша, Словакия. Особо следует выделить Словению, которая, как и в предыдущем кризисном периоде 2001 г., проявила завидную стойкость сферы туризма к негативному влиянию мировых экономических потрясений, являясь единственным представителем стран своего типа в группе 111. Это можно объяснить выгодным географическим положением в центре Европы, большим потенциалом транзитных пассажирских перевозок и уникальными природными условиями, которые обусловлены расположением сразу в четырех зонах: Альпах, Средиземноморье, Среднедунайской низменности, а также Центральном регионе. За счет этих особенностей туризм в Словении характеризуется внесезонностью.

Четвертый тип стран либо вовсе не проявил кризисных явлений в туристской отрасли (Ямайка), либо при незначительном снижении количества туристов (около 5 и 7% относительно предкризисного периода) довольно быстро восстановил позиции (Антигуа и Барбуды, Багамы). Можно предположить, что в этом случае позитивную роль сыграло влияние США.

Аналогичная картина наблюдается и в странах пятого типа. В Намибии, Танзании, Уганде вовсе не

отмечено снижения объема туристского потока. Но стоит заметить, что рынки въездного туризма в этих странах относительно невелики. Страны же с более значительным объемом въездных туристских потоков попали в группу 121. В первых рядах здесь стоит выделить Королевство Саудовская Аравия (КСА), где с 2002 г. действует Генеральная стратегия развития туризма, направленная на получение социальных, культурных, экологических и экономических выгод с обязательным сохранением исламских ценностей, богатого наследия и традиционного гостеприимства. В этом регионе уникальным образом смешивается классический туризм, который только

начинает развиваться, и традиционное паломничество. Будучи колыбелью ислама, КСА ежегодно принимает большое количество паломников, их доля составляет более 50% в структуре потока туристов [Александрова, 2022]. Это и позволило данному региону в короткие сроки компенсировать кризисное снижение количества туристов. Этот пример доказывает, что часто именно туристская специализация страны определяет ее большую или меньшую чувствительность к кризисам.

Выводы, полученные на основании расчета темпов роста, совпадают с результатами кластерного анализа (рис. 5).



Рис. 5. Пример сопоставления результатов расчетов темпов роста туристских потоков и кластеризации стран по рядам динамики количества международных туристских прибытий в 2004–2011 гг.

Fig. 5. An example of comparing the results of calculating the growth rate of tourist flows and clustering countries by the rows of dynamics of the number of international tourist arrivals from 2004 to 2011

Кризис 2019 г. (COVID-19). Пандемия COVID-19 оказала беспрецедентное влияние на мировую экономику в целом и сферу туризма в частности. Так, в первые шесть месяцев пандемии мировой объем турпотока упал на 65%, а в России по итогам 2020 г. въездной туризм, по сравнению с предыдущим годом, упал на 74% [UNWTO, 2020]. Ни одна из стран не смогла устоять против этого мощного вызова, что нанесло колоссальный экономический ущерб. Однако выход из этого кризиса в региональном разрезе происходил и продолжает происходить по различным сценариям. Анализ данных процессов в рамках структурного центр-периферийного подхода позволяет получить следующие результаты (табл. 5).

Обобщая информацию по трем рассмотренным кризисам, можно утверждать, что особенно губительным для туризма проявил себя кризис 2020 г., вызванный пандемией COVID-19. Это относится и к тем странам, которые стойко выдерживали предыдущие экономические катаклизмы (Австрия, Турция, Словения и проч.). В целом же при всем разнообра-

зии реакций сферы туризма на кризисы можно выявить определенные общие черты у стран различных типов. Так, страны «центра», некоторые из которых образовали группу 122 в период 1995–2003 гг., имея затяжной путь выхода (США, Италия, Франция, Швейцария, Нидерланды), в дальнейшем перешли на единый для этого типа стран сценарий 121. Кризисы оказывают заметное влияние на туристскую экономику, но с их последствиями удается справиться все быстрее. Исключением выступает Япония, отстающая по скорости решения проблем.

Второй, третий и частично четвертый типы стран, объединяемых под названием «полупериферия», отличаются большим разнообразием моделей поведения в кризисные периоды 1995–2003 и 2004–2011 гг. Но снижение турпотока, вызванное COVID-19, за исключением Китая, они смогли преодолеть в течение 2021, 2022 гг. и вышли на положительную динамику показателя. Однако к концу 2022 г. достичь доковидных объемов въездных туристских потоков удалось только Объединенным Арабским Эмиратам.

Таблица 5

Группировки стран по расчетным величинам темпов роста в подынтервалах в 2012–2022 гг. (кризис COVID-19)

Типы стран	Варианты развития событий выхода из кризиса COVID-19
«Центр» (первый тип)	Во всех странах произошел выход из кризиса в течение 2021–2022 гг. (группа 121). Но при этом только Франции в 2022 г. удалось получить показатель, на 2,5% превышающий аналогичный в 2019 г. Остальные страны при наличии положительной динамики предкризисных значений пока не достигли (рис. 6). Исключение – Япония (группа 122), сохранившая к 2022 г. тенденцию к падению объема туристского потока
Страны «полупериферии» (второй тип)	Аналогично с первым типом большинство стран вошли в группу 121. ОАЭ на 5,5% смогли превысить количественный показатель иностранных туристов по сравнению с 2019 г. Турция практически вышли на прежние значения. Иная картина наблюдается в Китае. Опираясь на данные, можно утверждать, что имеет место затяжной выход из кризиса. Это объясняется очень поздним по сравнению с другими странами снятием ограничений на мобильность, которые действовали на протяжении трех лет. Границы были открыты только 08.01.2023 г.
Среднеразвитые страны «полупериферии» (третий тип)	Большинство стран составили группу 121, но ни одна не смогла достичь уровня 2019 г.
Страны «полупериферии» и «продвинутой» «периферии» (четвертый тип)	Вышли на положительную динамику (121) и достаточно близко находятся к значениям предкризисного периода
Страны «периферии» (пятый тип)	Государства разделяются на группы: 121 (Королевство Саудовская Аравия, Танзания, Камбоджа, Боливия и др.), 122 (Индонезия, ЦАР, Мьянма), 222 (например, Ботсвана). Также здесь представлены страны группы 221, которым антикризисные меры помогли выйти на положительную динамику туристского потока (Ангола, Буркина-Фасо, Чад, Эсватини и др.)

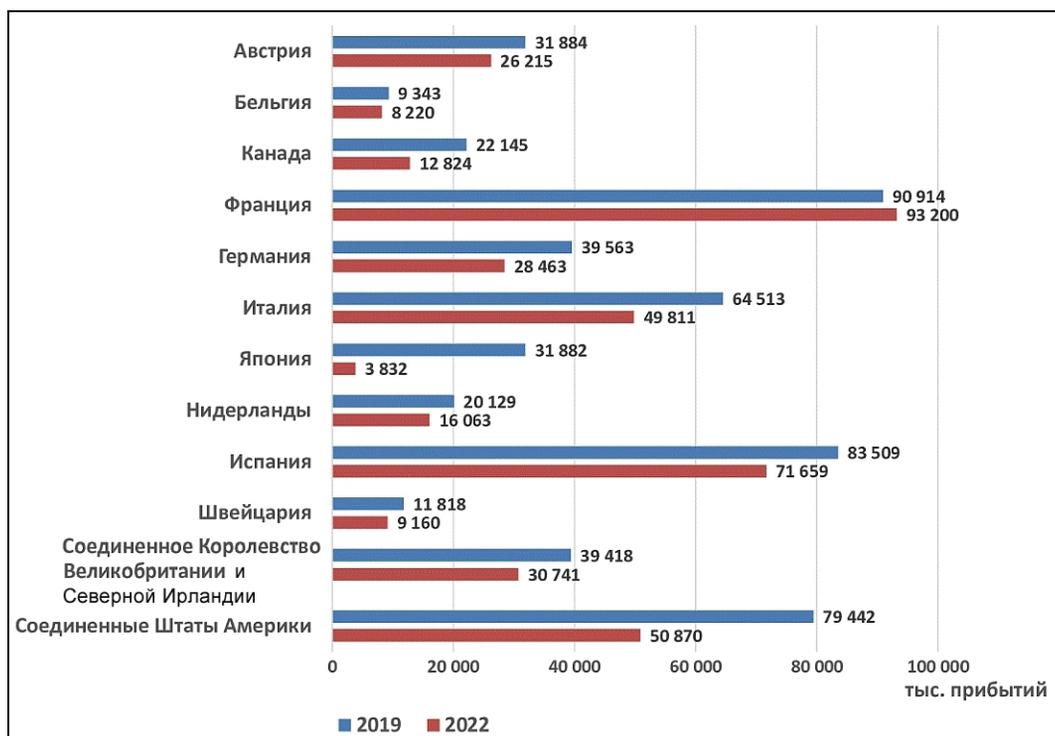


Рис. 6. Сравнительные характеристики въездных туристских потоков в страны «центра» за 2019 и 2022 гг.

Fig. 6. Comparative characteristics of entry tourist flows to the countries of the Center for 2019 and 2022

Часть стран четвертого типа и все, относящиеся к пятому типу, носят обобщающее название «периферия». Ситуация здесь также поливариативна. Поздняя реакция на кризис 2001 г., может смениться быстрым выходом из двух последующих и даже по информации 2022 г. практически вернуть поток иностранных туристов (95%), потерянный в результате пандемии (Королевство Саудовская Аравия). При этом на туризм в государстве Мьянма первые два кризиса не сказались, но третий ударил настолько сильно, что по прошествии двух лет, по имею-

щейся информации, удалось восстановить въездной турпоток только на 5% от доковидного уровня.

Оценивая эффективность используемого математического инструментария, можно утверждать, что кластерный анализ хорошо справляется с задачей группировки регионов по сценариям поведения. На рис. 7 сопоставлены ряды динамики турпотоков на примере четырех стран с фрагментом результатов кластеризации. Явное сходство моделей поведения отражается в объединении их в единый кластер, что доказывает состоятельность предлагаемого метода.

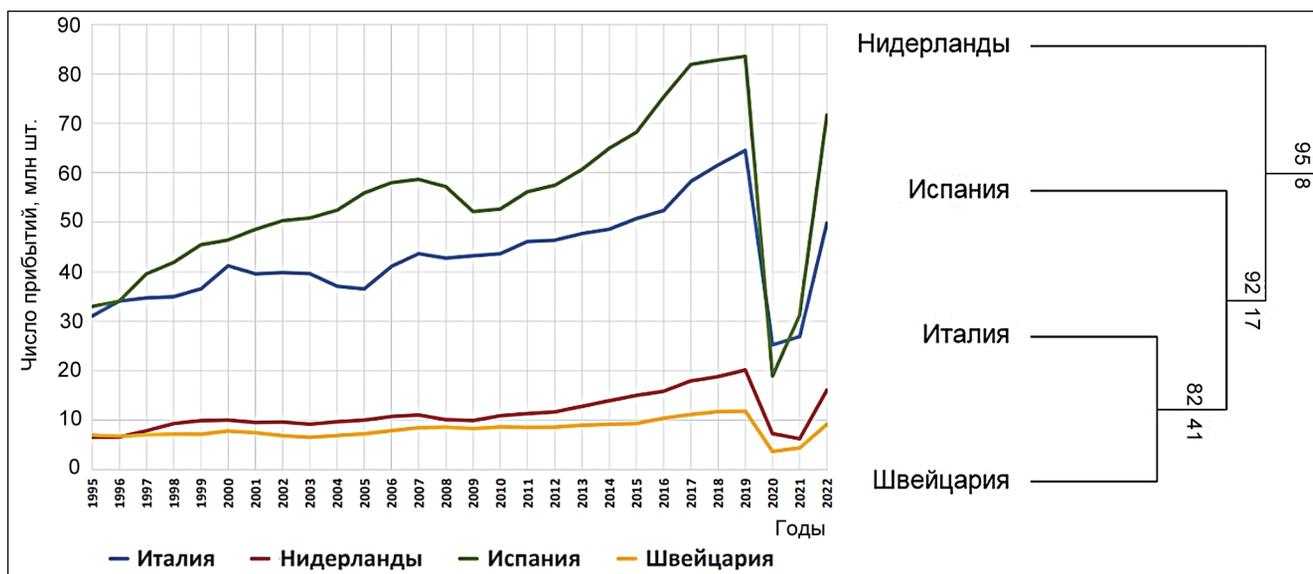


Рис. 7. Сравнение рядов динамики международных туристских прибытий с фрагментом дендрограммы, полученной в результате кластерного анализа

Fig. 7. Comparison of the rows of dynamics of international tourist arrivals with a fragment of a dendrogram obtained as a result of cluster analysis

ВЫВОДЫ

Подводя итог данной работы, представляется возможным сформулировать ряд выводов.

1. Результаты проведенного исследования опровергают распространенное среди специалистов мнение о том, что туризм, будучи чрезвычайно чувствительным к воздействию большого числа факторов разной природы, одним из первых среди отраслей экономики входит в кризис и столько же быстро выходит из него в силу накопления отложенного спроса. Исследование показало, что реакция на кризис туристских дестинаций отличается большим разнообразием, что позволяет выделить модели поведения: 1) стабильно растущую; 2) запаздывающие: а) пролонгированной реакции; б) затяжного выхода; 3) модель стабильного спада; 4) оздоравливающего влияния; 5) быстрого выхода. Причем это относится как к странам «центра» мирового туристского пространства, так и к странам «полупериферии» и

«периферии». Таким образом, экономическая динамика в них оказывается значительно сложнее, чем представлялось ранее.

2. Прежде считалось, что кризис охватывает сначала страны «центра», а затем каскадным образом эти импульсы передаются менее развитым и зависимым от них туристским территориям «полупериферии» и «периферии». Проведенное исследование опровергает и эту точку зрения, господствовавшую в географии туризма с 1970-х гг. Оно показало, что даже в таких туристских регионах, как Карибский бассейн, страны которого моноспециализированы на купально-пляжном и круизном туризме из США и Канады, часто наблюдается экономическая динамика, отличная от туристского центра-«метрополии». Особенности их экономического поведения обуславливаются действием дополнительных мощных факторов на туристский спрос, например девальвацией национальных де-

нежных единиц в условиях кризиса. Кроме того, большое значение имеет туристская специализация стран: спрос на одни виды туризма, как, например, купально-пляжный отдых, очень чувствителен к изменению рыночной конъюнктуры, а на другие – например, элитарные туры – отличается повышенной устойчивостью к кризисным явлениям.

3. При всех различиях в реакции туристских дестинаций на социально-экономические потрясения происходит их сближение. Этому способствуют процессы глобализации, активно протекающие на рынке международных туристских обменов. Наиболее ярким доказательством тому служит практически одинаковая в большинстве стран мира государственная поддержка туризма в условиях пандемии COVID-19 и связанных с ней ограничений мобильности. Наиболее эффективными и распространенными мерами государственного регулирования туристского спроса и предложения в странах «центра», «полупериферии» и «периферии» были фискальные и монетарные меры, а также политика сохранения рабочих мест. Большую роль в распространении положительного опыта сыграла ЮНВТО, эксперты которой вели постоянный мониторинг туристского рынка, собирали и оперативно

публиковали статистические данные, размещали в открытом доступе аналитические материалы.

4. Проведенное исследование с широким использованием современных методов математической статистики наглядно подтверждает острую необходимость в обновлении и развитии методического аппарата в отечественных туристско-географических исследованиях. В настоящее время его ограниченность является главным препятствием на пути к научным прорывам.

5. Данное исследование носит пилотный характер; теория и практика требуют его продолжения. В качестве направлений развития работы предлагается:

- изучение факторов, определяющих столь разную экономическую динамику в туристских дестинациях «центра», «полупериферии» и «периферии»;

- расширение перечня методического аппарата за счет других подходов к кластерному анализу, в частности сравнение результатов группировки временных рядов и кластеризации по набору влияющих факторов;

- совершенствование традиционных источников статистических данных и поиска новых оперативных и надежных источников информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абалаков А.Д., Панкеева Н.С. Особенности развития туризма в период глобального экономического кризиса // География и природные ресурсы. 2011. № 3. С. 111–117.
- Александрова А.Ю. Структура туристского рынка. М.: Пресс-Соло, 2002. 384 с.
- Александрова А.Ю. Типология стран мира по уровню развития международного туризма // География и природные ресурсы. 2016. № 1. С. 14–22.
- Александрова А.Ю., Аугина Е.В. Стратегии развития туризма в странах и регионах мира. М.: Кнорус, 2022. 302 с.
- Бабурин В.Л., Горячко М.Д., Демидова К.В. и др. Ядропериферийная модель размещения промышленности: мир и Россия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. № 4. С. 3–17. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.1.
- Воронцова Е.А. Индустрия туризма в условиях экономического кризиса: тенденции и перспективы развития // Studia Humanitatis Borealis. 2015. № 1(4). С. 59–67.
- Голубчиков С.Н., Хетагурова В.Ш., Брюханова Г.А. Экономический кризис как стимул развития рекреационно-туристского комплекса северного Подмосковья // Современные проблемы сервиса и туризма. 2015. Т. 9. № 2. С. 41–47.
- Гуревич О.Ю., Кононов А.Ю., Ромеронова А.А. Туризм в эпоху COVID-19: меры поддержки и траектории восстановления // Вестник Владивостокского гос. ун-та экономики и сервиса. 2020. Т. 12. № 2. С. 61–72. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2020-2/061-072.
- Джанджугазова Е.А., Первунин С.Н. Российский туризм: анатомия кризиса // Российские регионы: взгляд в будущее. 2015. № 1(2). С. 116–129.
- Дудко В.В., Патаракин Е.Д. Исследование научных школ университета средствами библиометрического картирования // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского гос. ун-та. 2023. Т. 15. № 1. С. 150–167. DOI: 10.24866/VVSU/2949-1258/2023-1/150-167.
- Келлер П. Влияние мировых кризисов на туризм // Вестник РМАТ. 2013. № 3(9). С. 17–20.
- Корчагин Е.П. Российский рынок туризма в условиях экономического кризиса // Вестник Тамбовского ун-та. Серия: Гуманитарные науки. 2015. № 6(146). С. 94–100.
- Леонидова Е.Г. Туризм в России в условиях COVID-19: оценка экономического эффекта от стимулирования спроса для страны и регионов // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2021. Т. 14. № 2. С. 59–74.
- Панин А.Н., Рьельский И.А., Тикунов В.С. Пространственные закономерности распространения пандемии COVID-19 в России и мире: картографический анализ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 1. С. 62–77.
- Прокопенко Л.Я. VIP-туризм в Африке: история, развитие, проблемы и перспективы после пандемии COVID-19 // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2022. № 15(4). С. 137–158. DOI: 10.31249/kgf/2022.04.08.
- Рубцова Н.В. Влияние современных экономических кризисов на эффективность функционирования сферы

- туристско-рекреационных услуг регионов Прибайкалья // Региональная экономика: теория и практика. 2018. Т. 16. № 7(454). С. 1376–1390.
- Статистический словарь / гл. ред. М.А. Королев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1989. 623 с.
- Степанов М.А. Последствия пандемии COVID-19 для международного туризма в 2020 г.: коллапс или метаморфоза? // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 6. С. 27–39.
- Цехла С.Ю. Развитие международного туризма: тенденции и социально-экономические процессы // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Т. 7. № 1. С. 38–47. DOI: 10.37279/2309-7663-2021-7-1-38-47.
- Compendium of Tourism Statistics, 2006–2010, Madrid, World Tourism Organization (UNWTO), 2012, 664 p.
- International tourism faces deepest crisis in history, *UNWTO World Tourism Barometer*, 2020, vol. 18, iss. 2, May, p. 19.
- Электронные ресурсы*
- Научная электронная библиотека диссертаций и авторефератов. URL: <https://www.dissercat.com/> (дата обращения 25.08.2024).
- И немедленно выехал // Коммерсант. 31.03.2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6592094> (дата обращения 25.08.2024).
- Южная Корея набирает популярность в медицинском туризме // РИА новости. 29.04.2010. URL: <https://ria.ru/20100429/228167889.html> (дата обращения 25.08.2024).
- The UNWTO Tourism Data Dashboard, URL: <https://www.unwto.org/tourism-data/unwto-tourism-dashboard> (дата обращения 25.08.2024).
- UN Tourism Barometer, 2023, URL: <https://www.unwto.org/un-tourism-world-tourism-barometer-data> (дата обращения 25.08.2024).
- 145 key tourism statistics. Inbound Tourism, 2024, URL: <https://www.unwto.org/tourism-statistics/key-tourism-statistics> (дата обращения 25.08.2024).
- Methodological Notes to the Tourism Statistics Database, Madrid, Spain, 2019, DOI: 10.18111/9789284420476, URL: https://webunwto.s3-eu-west-1.amazonaws.com/imported_images/51701/methodological_notes_2019.pdf (дата обращения 25.08.2024).
- Dehoorne O., Murat C., Petit-Charles N. International tourism in the Caribbean Area: Current Status and Future Prospects, *Études caribéennes*, 8.16.2010, URL: <http://journals.openedition.org/etudescaribeennes/4713>, DOI: 10.4000/etudescaribeennes.4713 (дата обращения 25.08.2024).
- UNWTO World Tourism Barometer May 2020, Special focus on the Impact of COVID-19, URL: https://webunwto.s3.eu-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2020-05/Barometer_May2020_full.pdf (дата обращения 25.08.2024).

Поступила в редакцию 01.10.2024

После доработки 12.11.2024

Принята к публикации 26.11.2024

SPATIAL AND TEMPORAL CHANGES OF THE WORLD TOURIST MARKET DURING THE MAJOR CRISES OF THE EARLY 21st CENTURY

A.Yu. Aleksandrova¹, V.E. Dombrovskaya²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Recreation Geography and Tourism*

² *Tver State University, Faculty of Geography, Department of Tourism and Nature Management*

¹ *Professor; D.Sc. in Geography; e-mail: analexan@mail.ru*

² *Associate Professor; Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: Dombrovskaya.VE@tversu.ru*

Modern global space is characterized by a complex heterogeneous structure, a high degree of variability, and regularly repeating crises. Tourism is a first to react to any political, economic, natural-climatic and other changes. At the same time, it is obvious that the variety of tourist regions and factors affecting their formation and development made the reaction asynchronous and non-identical. Options for the models of countries behavior at the world tourist market as a part of the center-peripheral approach are the focus of attention in our work. The object of the study is spatio-temporal changes in international tourism during 1995–2022. During this period of time, the world economy underwent three serious collapses, i.e. a crisis associated with the September 11, 2001 terrorist attack, the 2009 global economic crisis and the Covid-19 pandemic. The purpose of the work is to group the national tourist destinations on the basis of reaction to these crisis periods. To achieve the goal, mathematical and statistical methods are used, such as the cluster analysis and the method based on the calculation of indicators of the growth rate of international tourist arrivals. The scenarios of the behavior of national tourist destinations are compared both separately for each crisis and for all three crises in total. As a result, the following models of behavior were revealed: 1) steady growing; 2) delaying: a) a prolonged reaction; b) a protracted output; 3) stable decline; 4) reviving influence; 5) quick exit. The article proposes an analysis of the totality of factors responsible for this or that development of events in particular countries. The pilot study could go on by studying the factors that determine very different socio-economic dynamics in tourist destinations, as well as by expanding the methodological apparatus.

Keywords: tourism, tourist flow, tourist destination, global economic crisis, center-peripheral approach, cluster analysis, methods of mathematical statistics, models of behavior

REFERENCES

- Abalakov A.D., Pankeeva N.S. Osobennosti razvitiya turizma v period global'nogo ekonomicheskogo krizisa [Features of the development of tourism during the global economic crisis], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2011, no. 3, p. 111–117. (In Russian)
- Aleksandrova A.Yu. *Struktura turistskogo rynka* [The structure of the tourist market], Moscow, Press-Solo Publ., 2002, 384 p. (In Russian)
- Aleksandrova A.Yu., Aigina E.V. *Strategii razvitiya turizma v stranakh i regionakh mira* [Tourism development strategies in countries and regions of the world], Moscow, Knorus Publ., 2022, 302 p. (In Russian)
- Aleksandrova A.Yu. Typology of countries of the world according to the development level of international tourism, *Geography and Natural Resources*, 2016, no. 1, p. 18–25.
- Baburin V.L., Goryachko M.D., Demidova K.V. et al. Yadro-periferiinaya model' razmeshcheniya promyshlennosti: mir i Rossiya [Core-peripheral model of industrial localization: world and Russia], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, no. 4, p. 3–17, DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.1. (In Russian)
- Compendium of Tourism Statistics, 2006–2010*, Madrid, World Tourism Organization (UNWTO), 2012, 664 p.
- Dudko V.V., Patarakin E.D. Issledovanie nauchnykh shkol universiteta sredstvami bibliometricheskogo kartirovaniya. Territoriya novykh vozmozhnostei [Research by university scientific schools by means of bibliometric mapping. The territory of new opportunities], *Vestn. Vladivostokskogo gos. un-ta*, 2023, vol. 15, no. 1, p. 150–167, DOI: 10.24866/VVSU/2949-1258/2023-1/150-167. (In Russian)
- Dzhandzhugazova E.A., Pervunin S.N. Rossiiskii turizm: anatomiya krizisa [Russian tourism: anatomy of crisis], *Rossiiskie regiony: vzglyad v budushchee*, 2015, no. 1(2), p. 116–129. (In Russian)
- Golubchikov S.N., Khetagurova V.Sh., Bryukhanova G.A. Ekonomicheskii krizis kak stimul razvitiya rekreatsionno-turistskogo kompleksa severnogo Podmoskov'ya [Economic crisis as an incentive for the development of the recreational-tourist complex of the Northern Moscow Region], *Sovremennye problemy servisa i turizma*, 2015, vol. 9, no. 2, p. 41–47. (In Russian)
- Gurevich O.Yu., Kononov A.Yu., Romeronova A.A. Turizm v epokhu COVID-19: mery podderzhki i traektorii vosstanovleniya [Tourism in the COVID-19 era: support measures and restoration trajectories], *Vestn. Vladivostokskogo gos. un-ta ekonomiki i servisa*, 2020, vol. 12, no. 2, p. 61–72. (In Russian)
- International tourism faces deepest crisis in history, *UNWTO World Tourism Barometer*, 2020, vol. 18, iss. 2, May, p. 19.
- Keller P. Vliyanie mirovykh krizisov na turizm [The influence of global crises on tourism], *Vestnik RMAT*, 2013, no. 3(9), p. 17–20.
- Korchagin E.P. Rossiiskii rynek turizma v usloviyakh ekonomicheskogo krizisa [Russian tourism market in the conditions of economic crisis], *Vestnik Tambovskogo universiteta, Seriya: Gumanitarnye nauki*, 2015, no. 6(146), p. 94–100. (In Russian)
- Leonidova E.G. Turizm v Rossii v usloviyakh COVID-19: otsenka ekonomicheskogo effekta ot stimulirovaniya sprosa dlya strany i regionov [Tourism in Russia in the conditions of Covid-19: Assessment of the economic effect of demand stimulation for the country and regions], *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz*, 2021, vol. 14, no. 2, p. 59–74. (In Russian)
- Panin A.N., Rilskiy I.A., Tikunov V.S. Prostranstvennyye zakonomenosti rasprostraneniya pandemii COVID-19 v Rossii i mire: kartograficheskii analiz [Spatial patterns of COVID-19 distribution in Russia and the world: cartographic analysis], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 1, p. 62–77. (In Russian)
- Prokopenko L.Ya. VIP-turizm v Afrike: istoriya, razvitiye, problemy i perspektivy posle pandemii COVID-19 [VIP tourism in Africa: history, development, problems and prospects after Pandemia Covid-19], *Kontury global'nykh transformatsii: politika, ekonomika, pravo*, 2022, no. 15(4), p. 137–158, DOI: 10.31249/kgt/2022.04.08. (In Russian)
- Rubtsova N.V. Vliyanie sovremennykh ekonomicheskikh krizisov na effektivnost' funktsionirovaniya sfery turistsko-rekreatsionnykh uslug regionov Pribaikal'ya [The impact of modern economic crises on the effectiveness of the sphere of tourist and recreational services of the regions of the Baikal], *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika*, 2018, vol. 16, no. 7(454), p. 1376–1390. (In Russian)
- Statisticheskii slovar'* [Statistical dictionary], izd. 2, Moscow, Finansy i statistika Publ., 1989, 623 p. (In Russian)
- Stepanov M.A. Posledstviya pandemii COVID-19 dlya mezhdunarodnogo turizma v 2020 g.: kollaps ili metamorfoza? [Effects of COVID-19 pandemic on the international tourism in 2020: collapse or metamorphoses?], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 6, p. 27–39. (In Russian)
- Tsekhla S.Yu. Razvitiye mezhdunarodnogo turizma: tendentsii i sotsial'no-ekonomicheskie protsessy [Development of international tourism: trends and socio-economic processes], *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2021, vol. 7, no. 1, p. 38–47, DOI: 10.37279/2309-7663-2021-7-1-38-47. (In Russian)
- Vorontsova E.A. Industriya turizma v usloviyakh ekonomicheskogo krizisa: tendentsii i perspektivy razvitiya [Tourism industry in the context of an economic crisis: trends and development prospects], *Studia Humanitatis Borealis*, 2015, no. 1(4), p. 59–67. (In Russian)
- Web sources*
- Nauchnaya elektronnyaya biblioteka dissertatsii i avtoreferatov [Scientific electronic library of dissertations and abstracts], URL: <https://www.dissertcat.com/> (access date 25.08.2024). (In Russian)
- I nemedlenno vyekhal [And immediately left], *Kommersant*, 31.03.2024, URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6592094> (access date 25.08.2024). (In Russian)
- Yuzhnaya Koreya nabiraet populyarnost' v meditsinskom turizme [South Korea is gaining popularity in medical tourism]

- cal tourism], *RIA Novosti*, 29.04.2010, URL: <https://ria.ru/20100429/228167889.html> (access date 25.08.2024). (In Russian)
- The UNWTO Tourism Data Dashboard, URL: <https://www.unwto.org/tourism-data/unwto-tourism-dashboard> (access date 25.08.2024).
- UN Tourism Barometer, 2023, URL: <https://www.unwto.org/un-tourism-world-tourism-barometer-data> (access date 25.08.2024).
- 145 key tourism statistics. Inbound Tourism, 2024, URL: <https://www.unwto.org/tourism-statistics/key-tourism-statistics> (access date 25.08.2024).
- Methodological Notes to the Tourism Statistics Database, Madrid, Spain, 2019, DOI: 10.18111/9789284420476, URL: https://webunwto.s3-eu-west-1.amazonaws.com/imported_images/51701/methodological_notes_2019.pdf (access date 25.08.2024).
- Dehoorne O., Murat C., Petit-Charles N. International tourism in the Caribbean Area: Current Status and Future Prospects, *Études caribéennes*, 8.16.2010 (access date 25.08.2024).
- UNWTO World Tourism Barometer May 2020, Special focus on the Impact of COVID-19, URL: https://webunwto.s3.eu-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2020-05/Barometer_May2020_full.pdf (access date 25.08.2024).

Received 01.10.2024

Revised 12.11.2024

Accepted 26.11.2024

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 550.47+550.42:616.441-006.6

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОДА И СЕЛЕНА В ПОЧВАХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ КАК ФАКТОР РИСКА ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ РАКОМ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

В.С. Баранчуков¹, В.Ю. Березкин², Л.И. Колмыкова³, В.Н. Данилова⁴, А.А. Долгоносов⁵

¹⁻⁵ *Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН*

¹⁻⁴ *Лаборатория биогеохимии окружающей среды*

⁵ *Лаборатория геохимии углерода имени Э.М. Галимова*

¹ *Научн. сотр.; e-mail: baranchukov@geokhi.ru*

² *Ст. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: victor76@list.ru*

³ *Науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: kmila9999@gmail.com*

⁴ *Науч. сотр.; e-mail: val1910@mail.ru*

⁵ *Мл. науч. сотр.; e-mail: dolgonosov@geokhi.ru*

Для территории России, в том числе Орловской области, характерен дефицит иода и селена в окружающей среде, что обуславливает повышенный риск развития рака щитовидной железы (РЩЖ) среди местного населения. Цель исследования – выявление особенностей пространственной неоднородности содержания иода и селена в компонентах окружающей среды (почвы, природные воды) Орловской области в их связи с заболеваемостью местного населения РЩЖ. В 52 сельских населенных пунктах были отобраны пробы пастбищных почв (20 см керн ($n = 54$)) и подземных вод питьевого назначения ($n = 104$). Показана высокая гетерогенность содержания элементов как в почвах, так и в природных водах. Концентрация I и Se оказалась ниже в серых почвах (*Greyic Phaeozems Albic*; медианная концентрация I – 1,68 мг/кг; Se – 0,155 мг/кг), чем в черноземах выщелоченных (*Voronic Chernozems Pachic*; I – 2,53 мг/кг; Se – 0,158 мг/кг). Во всех образцах почв концентрация иода была ниже порога оптимального уровня (5 мг/кг), а в 55% образцов и содержание селена было ниже оптимума (0,2–0,7 мг/кг). Распределение элементов в подземных водах в основном находится во взаимосвязи с водоносными горизонтами. Более высокие концентрации иода характерны для франского карбонатно-терригенного комплекса (I – 9,89 мкг/л; Se – 0,09 мкг/л), в то время как более низкие концентрации связаны с фаменским карбонатным комплексом (I – 3,83 мкг/л; Se – 0,2 мкг/л). Концентрация иода оказалась ниже оптимальной (10 мкг/л) в 67% проб подземных вод, а селена (2,5 мкг/л) – в 99%. В районах с низким и высоким риском заболеваемости РЩЖ наблюдались значимые различия концентраций иода и селена. Полученные данные позволяют оценить влияние элементного статуса компонентов окружающей среды на распределение заболеваемости РЩЖ среди местного населения.

Ключевые слова: биогеохимия, геохимическая экология, микроэлементы, эндемические заболевания, питьевые воды, почвы пастбищ

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.3

ВВЕДЕНИЕ

Рак щитовидной железы (РЩЖ) занимает 7-е место в мировой структуре онкологической заболеваемости. Годовая заболеваемость оценивается в 821 тыс. случаев [Sung et al., 2021]. Самые высокие показатели отмечаются в Восточной Азии, Полинезии и Северной Америке, а среди государств – на Кипре [Global Cancer Observatory..., 2022].

Стоит отметить, что в разных странах мира отмечена ярко выраженная пространственная неоднородность заболеваемости РЩЖ. Стандартизован-

ный по возрасту показатель (ASR) в мире варьирует в широких пределах: от 0,94 на 100 тыс. человек в Западной Африке до 23,1 в Восточной Азии [Global Cancer Observatory..., 2022]. Значительные различия выявлены также в масштабе регионов и административных единиц. Например, в Республике Корея в 2009–2013 гг. ASR составлял 17,9 в районах с низким уровнем заболеваемости РЩЖ, в то время как в кластерах с высоким уровнем заболеваемости РЩЖ ASR в 3,6 раза выше (65,9 на 100 тыс. чел.) [Jang et al., 2021]. Аналогичным образом, в Россий-

ской Федерации в 2021 г. в Ульяновской области был зафиксирован самый низкий ASR – 2,58, в то время как в Брянской области уровень заболеваемости был в 5,5 раза выше, а ASR составлял 14,3 [Злокачественные новообразования..., 2022]. В штате Вермонт (США) были выявлены районы с высокой заболеваемостью РЩЖ, причем в некоторых «горячих точках» она достигала 56 случаев на 100 тыс. населения, при среднем значении по штату 8,0, что свидетельствует о ярко выраженной пространственной неоднородности заболеваемости населения. Следует отметить, что корреляция с уровнем урбанизации или доступностью медицинских центров не была отмечена [Hanley, 2015].

Поскольку этиология рака щитовидной железы до сих пор остается неизвестной [Bogović Crnčić et al., 2020], определяют ряд факторов, вносящих вклад в рост риска развития РЩЖ, включая пол, генетическую предрасположенность, радиационное воздействие (включая облучение щитовидной железы ^{131}I), уровень потребления йода с пищей, индекс массы тела, уровень тиреостимулирующего гормона, аутоиммунные факторы [Bonfond, Davies, 2014], образ жизни и диету [Bogović Crnčić et al., 2020]. Сочетанный эффект дефицита йода в окружающей среде и воздействия радиоактивного йода был изучен после аварии на Чернобыльской АЭС [Shakhtarin et al., 2003]. Таким образом, для выявления зон повышенного риска и осуществления целенаправленных мер по профилактике заболеваний необходимо учитывать пространственные факторы.

Йод – важнейший микроэлемент, необходимый для выработки гормонов щитовидной железы (ЩЖ), он входит в состав гормонов ЩЖ: тироксина (T_4 , $\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{I}_4\text{NO}_4$) и трийодтиронина (T_3 , $\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{I}_3\text{NO}_4$). Этот элемент играет фундаментальную биологическую роль в контроле роста и развития организмов [Ковальский, 1972]. Щитовидная железа нуждается в ежедневном поступлении йода для нормального функционирования и обеспечения нормального развития плода у млекопитающих. Помимо йода, в метаболизм тиреоидных гормонов вовлечен селен [Arthur, Beckett, 1994; Lossow et al., 2021]. Согласно опубликованным данным, природное несоответствие концентраций йода и селена в окружающей среде пороговым концентрациям является существенным фактором развития эндемических заболеваний ЩЖ у местного населения (иоддефицитные заболевания ЩЖ, такие как эндемический зоб, гипотиреоз) [Kolmykova, Korobova, 2019]. На отдельных территориях, подвергшихся загрязнению радиоактивным иодом вследствие уникальных техногенных катастроф (аварий на ядерных объектах), риск заболеваний ЩЖ может быть выше из-за со-

четанного воздействия природного дефицита йода и техногенного загрязнения [Cardis et al., 2005].

Многочисленными исследователями отмечается, что на территории Российской Федерации, включая ее европейскую часть, существует природный дефицит йода [Gerasimov et al., 1993, Ковальский, 1974]. Коробова и соавторы [Korobova et al., 2024] разделили области, расположенные на Восточно-Европейской равнине, на три группы в зависимости от концентрации йода в почвах. Согласно полученным данным, 53% регионов относятся к иоддефицитным, так как содержание йода в почве составляет менее 4,0 мг/кг. Еще 18%, включая исследуемую Орловскую область, имеют содержание йода от дефицитного (3,0 мг/кг) до нормального (> 5 мг/кг), а остальные 29% – от среднедефицитного (4,1 мг/кг) до нормального. Согласно данным о средней концентрации йода в моче (UIC), Россия, наряду с другими европейскими странами, такими как Эстония, Финляндия, Германия, Литва и Норвегия, классифицируется как страна с «недостаточным» потреблением йода [Global Scorecard of Iodine..., 2021]. Стоит отметить, что актуальность проблемы дефицита йода в окружающей среде возросла после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Выпадение радионуклидов было наиболее интенсивным в Беларуси, России и Украине, но происходило и во многих других европейских странах [Atlas..., 1998].

Цель исследования – выявление особенностей пространственной неоднородности содержания йода и селена в компонентах окружающей среды (почвы, природные воды) Орловской области в их связи с заболеваемостью местного населения РЩЖ.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Орловская область с населением около 700 тыс. человек в 2021 г. находилась на 7-м месте среди субъектов Российской Федерации по заболеваемости населения РЩЖ (код МКБ-10 С73, 8,88 случаев на 100 тыс.) [Злокачественные новообразования..., 2022], в период 2013–2017 гг. – на 12-м месте по заболеваемости другими патологиями ЩЖ (коды МКБ-10 Е00-Е07, 575,55 случаев на 100 тыс.) [Заболеваемость..., 2018]. Вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. значительная часть Орловской области была подвержена радиоактивному загрязнению [Данные..., 2022]. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs (на 01.01.2020) в области достигает 137 кБк/м², что позволяет оценить [Zvonova et al., 2010] максимальное значение активности ^{131}I в почве на 10.05.1986 до 1975 кБк/м² (рис. 1Б).

Почвенный покров Орловской области характеризуется последовательной сменой зональных типов почв от дерново-подзолистых почв (*Umbric Albeluvisols Abruptic*) (типы почв по [Шишов и др.,

2004] и [International soil classification..., 2022]) в северо-западной части региона через серые (*Greyic Phaeozems Albic*) в центральной к черноземам (*Voronich Chernozems Pachic*) в юго-восточных районах области. Речные долины области заняты преимущественно аллювиально-луговыми кислыми почвами (*Umbric Fluvisols Oxyaquic*) (рис. 1В).

Основными источниками питьевых вод в регионе являются фаменский задонско-оптуховский карбонатный комплекс (D_3zd-op) и франкий воро-

нежско-ливенский карбонатно-терригенный комплекс (D_3vr-lv). На локальных участках также эксплуатируются слабодоносный бат-келловейский терригенный комплекс (J_2bt-k) и водоносный альбсеноманский терригенный горизонт ($Kal-s$). В населенных пунктах, не имеющих других источников питьевой воды, для нецентрализованного водоснабжения используются частные скважины, пробуренные в аллювиальных четвертичных водоносных горизонтах [Отчет по теме..., 2001] (рис. 1Г).

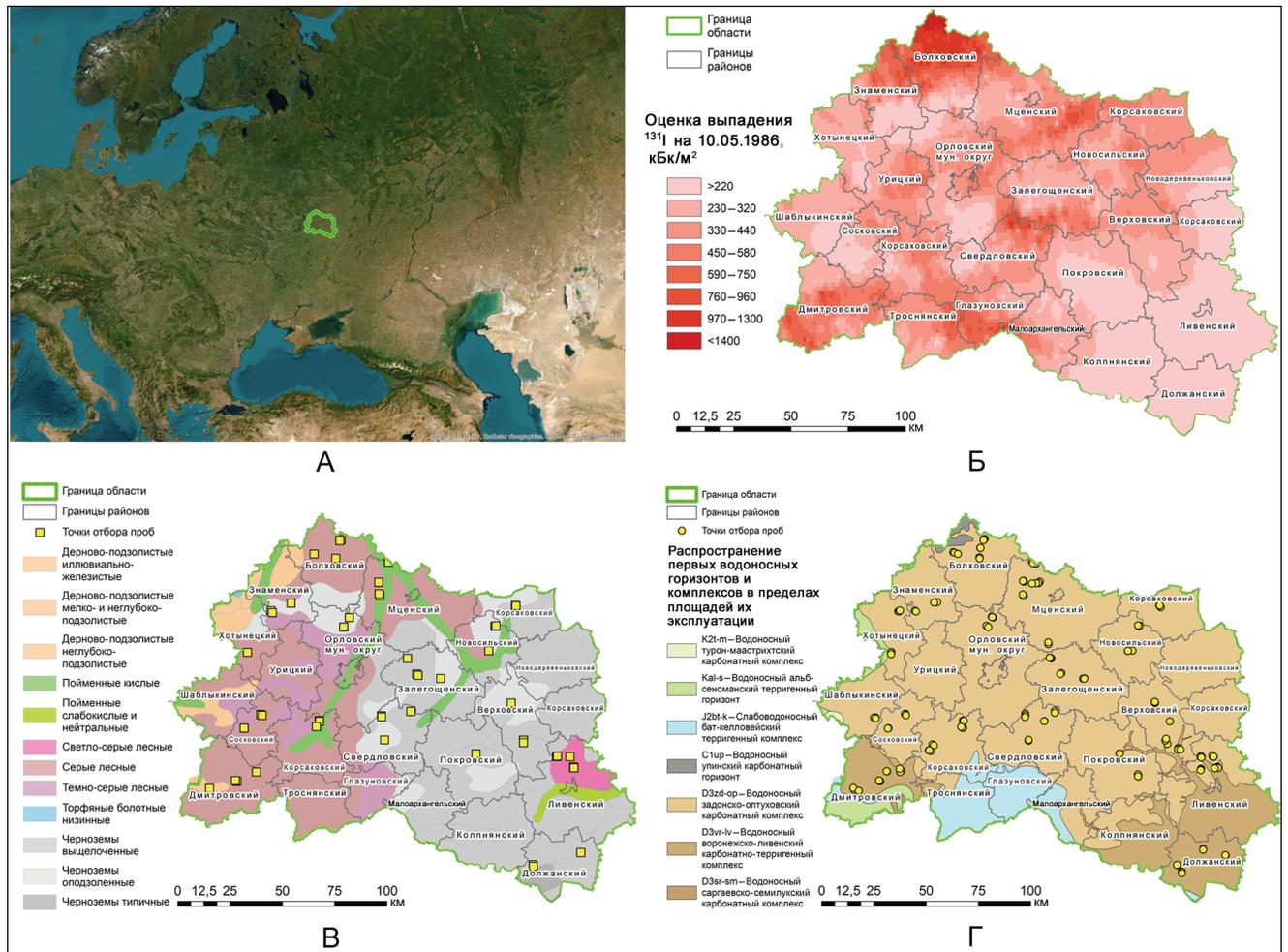


Рис. 1. Картограммы Орловской области с расположением точек отбора фактического материала:

- А – географическое расположение; Б – рассчитанная активность ^{131}I [Данные..., 2022] по формуле [Zvonova et al., 2010];
- В – типы почв [Иванов, Шоба, 2014]; Г – основные эксплуатируемые водоносные горизонты [Отчет по теме..., 2007]

Fig. 1. Maps of the Oryol region with soil and groundwater sampling points:

- A – geographical location; Б – estimated radioiodine contamination [Dannye..., 2022], recalculated according to [Zvonova et al., 2010];
- В – soil types [Ivanov et al., 2014]; Г – main aquifers [Otchet po teme..., 2007]

Водоносные породы задонско-оптуховского (D_3zd-op) комплекса состоят из цементированных, трещиноватых известняков и доломитов с редкими прослоями мергелей и глин. В центральной и северной частях региона встречаются прослой сильно трещиноватых и кавернозных песков и песчаников. Воронежско-ливенский (D_3vr-lv) комплекс состо-

ит из кавернозных и трещиноватых известняков с подчиненными прослоями глин. В южной части комплекса среди известняков прослоями залегают пески, песчаники и алевролиты [Отчет о результатах работ..., 2007]. В верхней части комплекса отсутствуют водоупорные слои и имеется гидравлическая связь с водами задонско-оптуховского

водоносного горизонта. В нижней части комплекса залегают глинистые отложения петинских водоупоров (мощность слоя не более 7 м).

Выбор сельских населенных пунктов для исследования геохимических параметров производился с учетом характеристики почвенного покрова, водоносных горизонтов, используемых для питьевого водоснабжения, и уровня загрязнения радионуклидами во время аварии на ЧАЭС (по картографическим данным). Отбор образцов почв и проб подземных вод проводился в летний период 2022–2023 гг. в 52 сельских населенных пунктах, расположенных в 17 из 24 районов области. Всего было отобрано 54 образца почв и 104 пробы подземных вод. Координаты точек пробоотбора фиксировались в полевых условиях с помощью навигатора GPSmap 62stc (Garmin, США).

Образцы почв отбирали из верхнего 20-сантиметрового слоя тростьевым буром в интервалах глубин 0–5, 5–10 и 10–20 см. Отбор проб вод проводился согласно ГОСТ Р 59024-2020 в тех же населенных пунктах из различных источников, включая 53 пробы водопроводной воды, 30 проб из уличных водоразборных колонок, 12 проб из колодезев, 7 проб из родников и 2 пробы из частных скважин.

Содержание иода определяли ускоренным вариантом кинетического роданидно-нитритного метода [Проскуракова, Никитина, 1976] на фотокolorиметре КФК-3-01-«ЗОМЗ» (ЗОМЗ, Россия), содержание селена – флуориметрическим методом МУК 4.1.033-95 на спектрофлуориметре MPFS-2A (Hitachi, Япония). Содержание органического углерода в почве определяли бихроматным методом

Тюрина по ГОСТ 26213-2021. Подготовка образцов почв проводилась по стандартным методикам в лаборатории биогеохимии окружающей среды ГЕОХИРАН. Анализ данных проводился с использованием Microsoft Excel и TIBCO STATISTICA 13.3, пространственный анализ – с помощью ESRI ArcGIS Desktop 10.8.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственная неоднородность содержания иода и селена в пастбищных почвах. Результаты проведенных исследований позволили подтвердить значительное варьирование концентраций изучаемых элементов в пастбищных почвах. Содержание иода в серых почвах (*Greyic Phaeozems Albic*) в слое 0–20 см имело межквартильный интервал (IQR) 0,92–2,37 мг/кг, медиану (Me) 1,68 мг/кг, селена – IQR 0,2–0,3 мг/кг, Me 0,155 мг/кг. В черноземах (*Voronic Chernozems Pachic*) содержание иода характеризовалось IQR 1,89–3,05 мг/кг, Me 2,53 мг/кг, селена – IQR 0,08–0,24 мг/кг, Me 0,158 мг/кг). Содержание иода в почвах увеличивалось с глубиной в черноземах (*Voronic Chernozems Pachic*), что может быть связано с потерей иода в верхних слоях этого типа почв, вследствие более интенсивного выпаса скота на более плодородных почвах (рис. 2А). Содержание селена в этих почвах также увеличивалось от слоя 0–5 см (Me 0,170 мг/кг) до слоя 10–20 см (Me 0,201 мг/кг) (рис. 2Б). Кроме того, была обнаружена низкая значимая положительная корреляция между содержанием иода и уровнем органического вещества ($R = 0,342, p = 0,00001$; рис. 3).

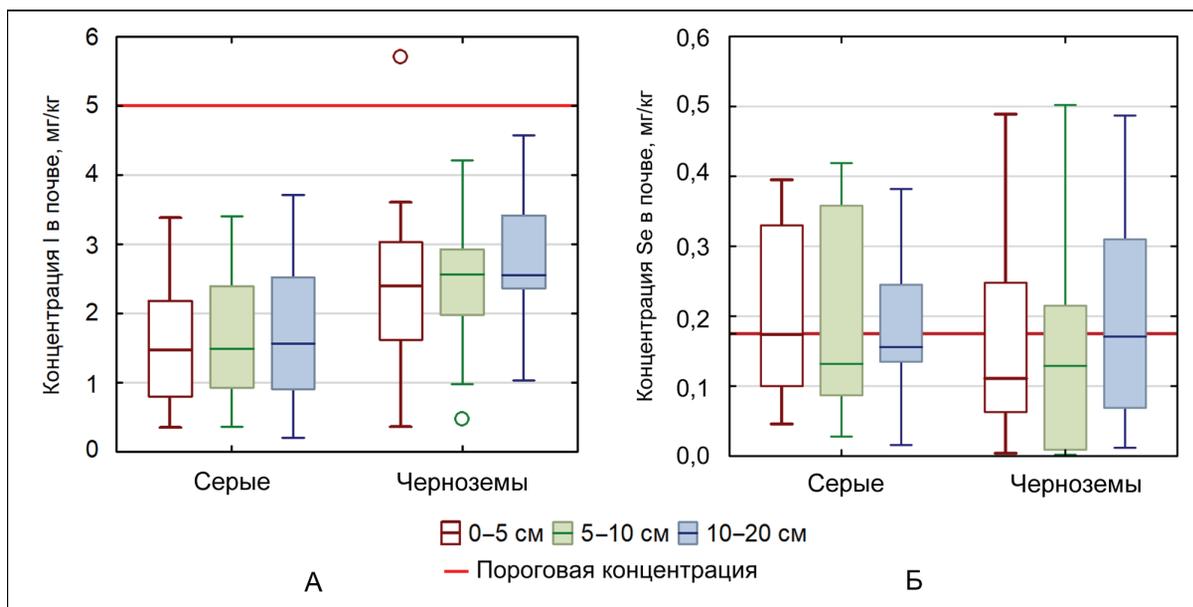


Рис. 2. Содержание иода (А) и селена (Б) в пастбищных почвах послойно

Fig. 2. Iodine (A) and Selenium (Б) distribution in pasture soil layers

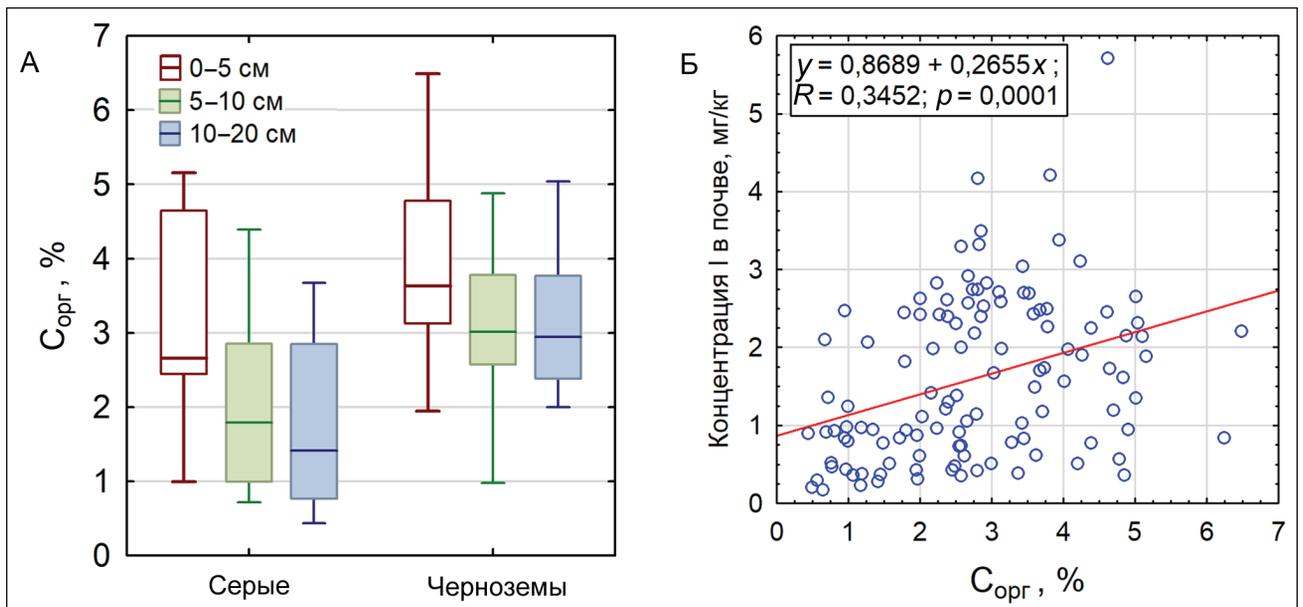


Рис. 3. Распределение органического углерода в зональных типах почв Орловской области послойно (А) и зависимость содержания иода от органического углерода (Б)

Fig. 3. SOC distribution in zonal soil layers (A) and relation between the iodine content and SOC (B)

Содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) значительно варьировало как в черноземах выщелоченных (*Voronich Chernozems Pachic*) (0,98–6,49%), так и в серых почвах (*Greyic Phaeozems Albic*) (0,44–5,15%), с максимальным значением в нижних слоях 10–20 см (рис. 3). Возможно, широкие пределы варьирования содержания органического вещества могли быть обусловлены здесь не природными факторами, а использованием почв под пастбище. Неспецифичные для данного генетического горизонта уровни органического вещества могут быть связаны с удобрением пастбищ в результате выпаса скота. Стоит отметить, что выпас может привести и к снижению уровня органического углерода в верхних горизонтах за счет эрозии.

Пространственная неоднородность концентраций иода и селена в подземных водах. Содержание иода и селена в пробах отобранных вод варьировало (IQR) от 2,7 до 13,6 мкг/л (Me 4,34 мкг/л) и от 0,07 до 0,38 мкг/л (Me 0,21 мкг/л) соответственно. Подземные воды фаменского задонско-оптуховского карбонатного комплекса характеризовались более низкими значениями концентраций иода (IQR 2,41–9,12; Me 3,83 мкг/л; рис. 4А), в отличие от вод франского воронежско-ливенского карбонатно-терригенного комплекса (IQR 3,93–22,7; Me 9,89 мкг/л). Сходные данные были получены в более ранних исследованиях химического состава подземных вод на территории Брянской области [Колмыкова, 2017]. Как и в случае с почвами, распределение селена в водах показало противоположную тенденцию (фаменский комплекс: IQR

0,07–0,38; Me 0,2 мкг/л; франский комплекс: IQR 0,05–0,29; Me 0,09 мкг/л; рис. 4Б). Анализ отношений между содержанием иода и селена в подземных водах и другими гидрохимическими параметрами вод не выявил статистически значимых корреляционных связей.

Пространственная оценка вклада природных геохимических факторов в распространение рака щитовидной железы. Для исследования геохимических факторов, определяющих пространственную неоднородность заболеваемости РЩЖ на исследуемой территории, использовались два геохимических индикатора: природный иододефицит и загрязнение территории радиоизотопом иода.

Статистическая значимость вклада данных индикаторов в пространственную неоднородность заболеваемости РЩЖ оценивалась путем разделения исследуемой территории на районы с различным уровнем кумулятивного риска, рассчитываемого на основе стандартизованного показателя заболеваемости. По данным Иванова и др. [2005], районы с ASR менее 20 на 1 млн (накопленный риск менее 0,15%) для мужского населения были отнесены к районам низкого риска (9 районов), а остальные 15 – к районам высокого риска. Для женского населения семь районов с ASR менее 80 на 1 млн (накопленный риск менее 0,6%) были отнесены к районам низкого риска, а остальные 17 – к районам высокого риска.

Поскольку по данным статистического наблюдения Росстата [Выборочное наблюдение..., 2013] в сельских населенных пунктах Орловской области 89,5% домохозяйств используют централизованное

водоснабжение для питьевых целей, из них 65,4% пользуются водопроводной водой в домах и 24,1% – водоразборными колонками, в качестве индикатора природного дефицита иода и селена в питьевых водах использовалась их концентрация в водах централизованного водоснабжения. Основными продуктами питания, производимыми сельским населением региона в домашних условиях, является картофель – его выращивают 88,8% сельских домохозяйств, 59,1% домохозяйств производят яйца, а 55,9 и 42,6% выращивают скот и птицу на мясо соответственно. В результате почти 78% рациона

сельского населения состоит из продуктов, выращенных на местной почве, поэтому вторым индикатором дефицита микроэлементов служит их концентрация в почвах.

Учитывая, что большинство изучаемых геохимических показателей имеют распределение, отличное от нормального (по тесту Шапиро–Уилко) [Shapiro, Wilk, 1965], использовался ранговый *U*-критерий Манна–Уитни [Mann, Whitney, 1947] для определения статистически значимых различий параметров в районах с разным накопленным риском заболеваемости РЦЖ (табл. 1).

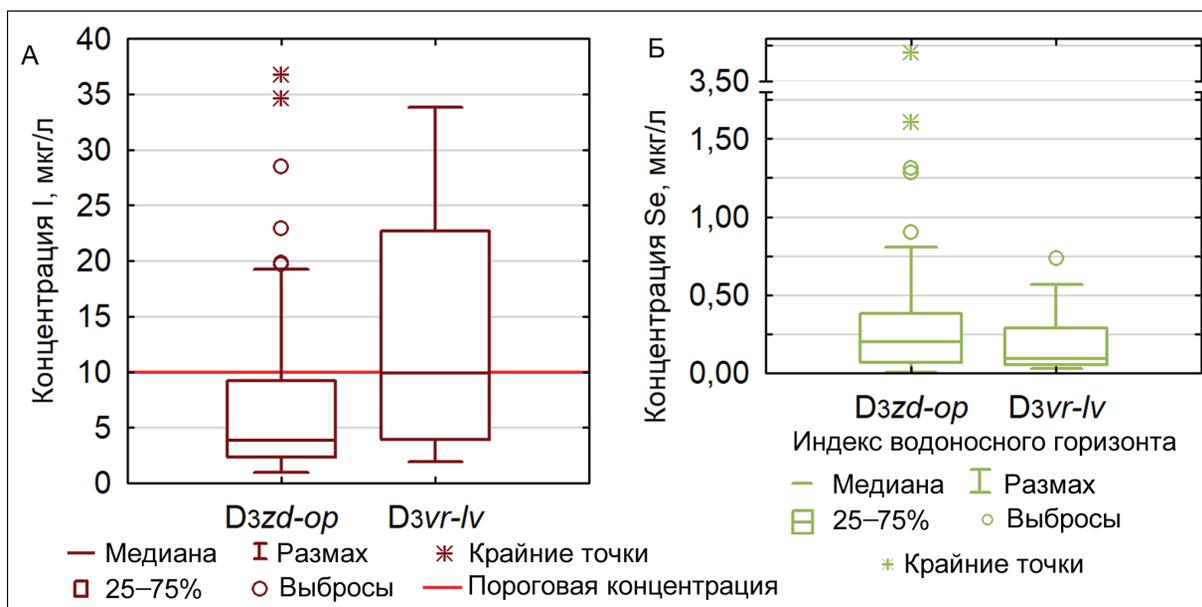


Рис. 4. Распределение иода (А) и селена (Б) в подземных водах

Fig. 4. Iodine (A) and Selenium (Б) distribution in groundwater

Таблица 1

Результаты теста Шапиро–Уилко для изученных геохимических параметров

Геохимический параметр		Статистика Шапиро–Уилка	Уровень значимости	
Загрязнение почвы ^{131}I (на 10.05.1986)		0,8850	<0,0001	
Концентрация в подземных водах	I	0,7688	<0,0001	
	Se	0,4975	<0,0001	
Концентрация в почвах	I	0–5 см	0,9187	0,043
		5–10 см	0,9685	0,280
		10–20 см	0,9725	0,399
	Se	0–5 см	0,9411	0,117
		5–10 см	0,9030	0,013
		10–20 см	0,9339	0,076

Значение *U*-критерия Манна–Уитни (табл. 2) показывает, что в районах с более высоким уровнем заболеваемости отмечался и более высокий уровень загрязнения почв ^{131}I (рис. 5А, 5Б), о чем

свидетельствуют положительные значения *Z*. По данным, представленным на рис. 5В и 5Г, можно сделать вывод, что для районов с высоким уровнем заболеваемости, как мужского, так и женского на-

селения, характерна низкая концентрация иода в водах систем централизованного водоснабжения и 10–20 см слое почвы. Это позволяет предположить, что на заболеваемость РЩЖ в регионе после аварии на Чернобыльской АЭС также влияет дефицит иода в окружающей среде. Распределение селена в окружающей среде на территориях с высоким и низким риском РЩЖ, по-видимому, обратно распределению иода (рис. 6).

Полученные данные свидетельствуют о значимой разнице в дефиците Se между районами с низким и высоким риском РЩЖ. Следует отметить, что заболеваемость женщин, по-видимому, статистически связана с концентрацией селена в питьевой воде, а заболеваемость мужчин – с его содержанием в почве. По-видимому, это объясняется существующими различиями в пищевых привычках сельского населения в зависимости от пола.

Таблица 2

Статистическая значимость различий распределения геохимических показателей в районах Орловской области с высоким и низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ

Геохимический показатель		Мужчины					Женщины					
		<i>U</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	<i>Nh</i>	<i>Nl</i>	<i>U</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	<i>Nh</i>	<i>Nl</i>	
Загрязнение почвы ¹³¹ I на 10.05.1986		224666	6,015	0,000	737	744	208154	7,748	0,000	812	669	
Концентрация в подземных водах	I	479,0	-3,273	0,001	34	49	602,0	-1,492	0,136	27	56	
	Se	713,5	1,102	0,270	34	49	551,5	1,983	0,047	27	56	
Концентрация в почвах	I	0–5 см	233,0	0,095	0,924	19	25	206,0	-0,656	0,512	18	26
		5–10 см	222,0	-0,135	0,893	19	24	177,0	-1,169	0,242	18	25
		10–20 см	211,0	0,177	0,860	19	23	151,0	-1,639	0,100	18	24
	Se	0–5 см	48,5	2,182	0,029	12	16	87,5	-0,438	0,662	13	15
		5–10 см	45,0	2,344	0,019	12	16	85,0	-0,553	0,580	13	15
		10–20 см	45,0	2,344	0,019	12	16	89,5	0,345	0,730	13	15

Примечание. *U* – значение *U*-критерия Манна-Уитни, *Z* – значение *U*-критерия, приведенное к нормальному распределению, *p* – уровень значимости, *Nl* – число проб (образцов) в районах с низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ, *Nh* – число проб (образцов) в районах с суммарным риском заболеваемости РЩЖ. Жирным шрифтом выделены параметры $p \leq 0,100$.

Было показано, что селен выступает антагонистом иода как в почвах, так и в подземных водах исследуемого региона, что может обуславливать их совместное влияние на развитие заболеваний щитовидной железы. Концентрация иода во всех почвенных образцах в слое 0–20 см была ниже порогового уровня (5–40 мг/кг), установленного Ковальским и Андриановой [1970]. В 55% исследованных образцов содержание селена было ниже биогеохимической нормы (0,2 мг/кг) [Боев, 2013], при этом лишь в одном из 54 образцов концентрация этого микроэлемента превышала норму (>0,7 мг/кг) для почв.

По данным Синдиревой и др. [2021] в половине образцов серых почв (*Greyic Phaeozems Albic*) и в 60% образцов черноземов выщелоченных (*Voronic Chernozems Pachic*) в слое 0–20 см обнаружены концентрации селена ниже оптимального уровня (0,175–3,0 мг/кг). Медианные значения селена в большинстве исследованных нами зональных почв Орловской области также менее 0,175 мг/кг, что позволяет отнести Орловскую область к зоне селенодефицита. К области оптимума по селену здесь относятся только сельскохозяйственные угодья на

пойменных почвах и на дерново-подзолистых почвах (занимающих менее 4% площади области). Стоит отметить, что, несмотря на практически одинаковую удаленность от океана и, как следствие, одинаковое количество иода, поступающего в почвы с атмосферными осадками и сухими выпадениями, более интенсивная аккумуляция иода наблюдается в черноземах выщелоченных (*Voronic Chernozems Pachic*), чем в черноземах оподзоленных (*Greyic Phaeozems Albic*). Данное различие может быть связано с относительно высоким содержанием органического вещества в верхних горизонтах черноземов выщелоченных. Иод в почвах прочно связывается с органическими кислотами гумусового происхождения, образуя при этом малоподвижные комплексы в *Voronic Chernozems Pachic*. Эти комплексы, однако, остаются доступными для растений, чего не наблюдается в почвах *Greyic Phaeozems Albic*, где потери водорастворимых и летучих соединений гораздо выше. Косвенно это подтверждается более высокими значениями содержания органического вещества в *Voronic Chernozems Pachic* по всем исследованным глубинам.

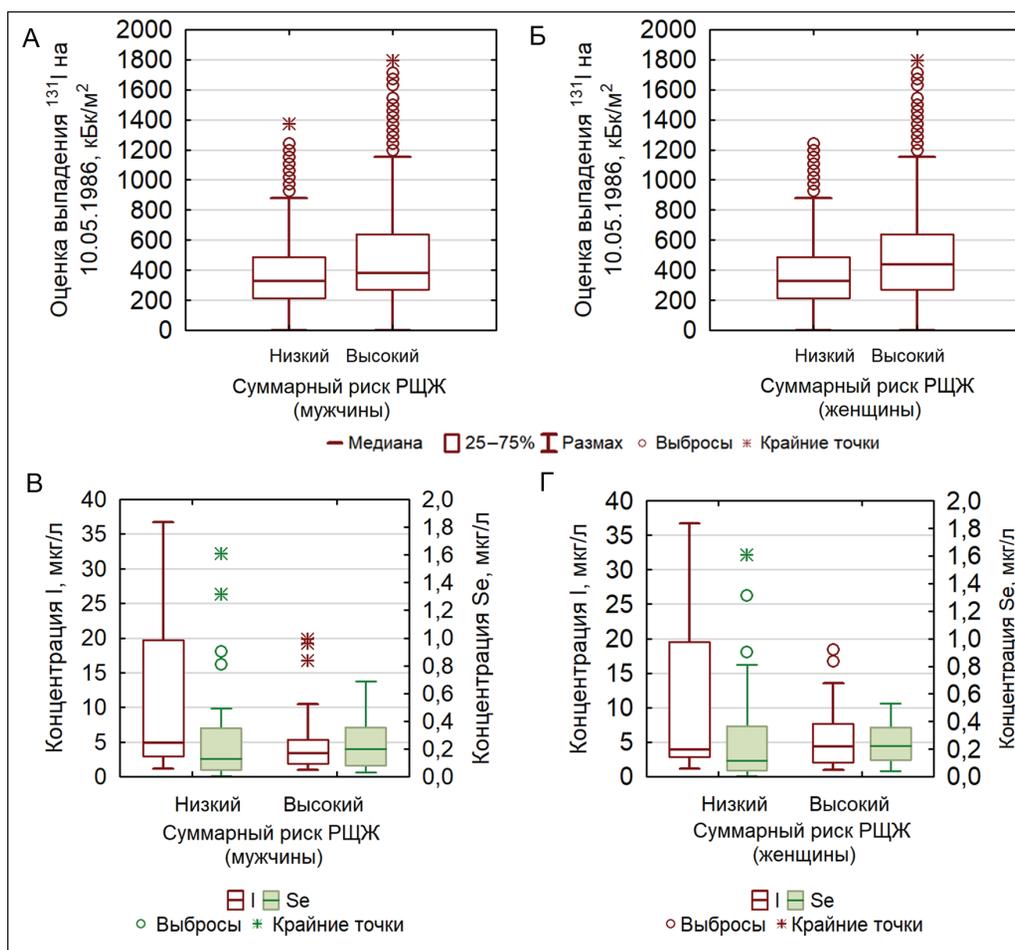


Рис. 5. Распределение рассчитанной активности ^{131}I в сельских населенных пунктах районов с высоким и низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ мужчин (А) и женщин (Б), а также концентраций I и Se в водах централизованного водоснабжения сельских населенных пунктов районов с высоким и низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ мужчин (В) и женщин (Г)

Fig. 5. Distribution of calculated ^{131}I activity in rural communities in the areas of high and low cumulative risk of Thyroid Cancer for men (A) and women (B); as well as I and Se concentrations in centralized water supply of rural communities in the areas of high and low cumulative risk of Thyroid Cancer for men (B) and women (Г)

Отбор образцов исследуемых типов почв производился только на пастбищных угодьях, используемых в настоящий момент для выпаса скота. Высокая степень освоенности исследуемой территории в исторический период позволяет предполагать, что ранее эти земли могли использоваться под пашню. Косвенно это подтверждают полученные авторами низкие медианные значения концентрации органического углерода даже для черноземов (для черноземов выщелоченных – 2,5%; для черноземов оподзоленных – 2,6%), что ниже, чем в литературных данных для этих типов почв [Отчет о научно-исследовательской работе..., 2013].

Полученные данные по распределению иода и селена в подземных водах верхнедевонской карбонатной толщи свидетельствуют о существовании неоднородности литолого-геохимических условий водоносных горизонтов по содержанию типоморфных элементов в водах фаменского (задонско-опту-

ховского (D_3zd-op) и франского ярусов (воронежско-ливенского (D_3vr-lv)). Обнаружено различие в соотношении Ca/Mg и показателях электропроводности (5,0, 0,53 мСм/см для D_3vr-lv и 3,5, 0,66 мСм/см для D_3zd-op). Некоторое обогащение напорных вод воронежско-ливенского карбонатно-терригенного комплекса иодом может быть связано с его значительной мощностью (151–193 м) по сравнению с задонско-оптуховским карбонатным комплексом (60–80 м), что обусловлено более высоким содержанием в осадочном слое органического вещества морского происхождения (основной источник иода в подземной гидросфере).

Существование водоупорного горизонта (петинский горизонт D_3pt) в подошве воронежско-ливенского комплекса создает условия для удержания подвижных форм элементов в растворе, препятствуя их миграции в нижележащие горизонты с фильтрационными водами.

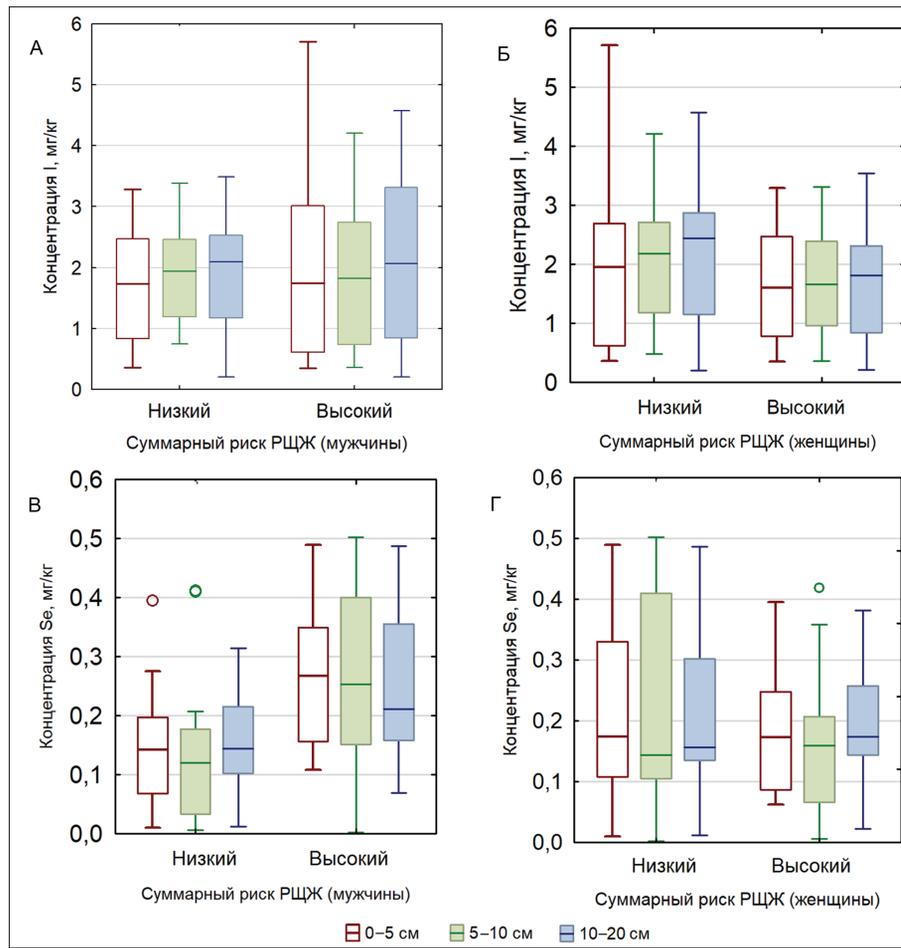


Рис. 6. Распределение концентраций иода в почвах пастбищ сельских населенных пунктов районов с высоким и низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ мужчин (А) и женщин (Б), а также селена в почвах пастбищ сельских населенных пунктов районов с высоким и низким суммарным риском заболеваемости РЩЖ мужчин (В) и женщин (Г)

Fig. 6. Distribution of concentrations of: iodine in soils of rural pastures in the areas of high and low cumulative risk of Thyroid Cancer for men (A) and women (B); selenium in soils of rural pastures in the areas of high and low cumulative risk of Thyroid Cancer for men (B) and women (Г)

Согласно результатам анализов, ни в одной из отобранных проб вод не было зафиксировано превышение предельно допустимых концентраций иода (125 мкг/л) и селена (10 мкг/л) [СанПиН 1.2.3685-21]. Хотя действующими российскими санитарными правилами и нормами не установлены минимальные концентрации химических элементов в питьевой воде, следует отметить, что в 67% проб концентрация иода была ниже оптимального уровня (10 мкг/л [Турецкая, Данилейченко, 1965]), в то время как дефицит селена был установлен для 99% проб (<2,5 мкг/л [Никитина и др., 1995]).

Дефицит иода выявлен в северной и центральной частях Орловской области, в которых распространены серые почвы (*Greyic Phaeozems Albic*), а верхнедевонские отложения представлены главным образом задонско-оптуховским водоносным комплексом. Кроме того, указанные территории являются наиболее пострадавшими от аварии на

Чернобыльской АЭС и характеризуются наиболее высоким стандартизованным по возрасту уровнем заболеваемости РЩЖ [Иванов и др., 2005].

Статистическая значимость различий геохимических индикаторов риска РЩЖ (природные – дефицит иода в питьевой воде и почвах пастбищ; техногенные – загрязнение территории ¹³¹I после аварии на ЧАЭС) в районах исследуемой области соответствует распределению тех же параметров в зонах с минимальной и максимальной заболеваемостью среди сельского населения соседней Брянской области [Korobova et al., 2023]. По данным Дрозд и др. [2015], самые низкие уровни иода в моче отмечены в Могилевской области Республики Беларусь, что может являться следствием дефицита иода в почве этой территории. Для Российской Федерации были обнаружены различия в отношении между уровнем радиоактивного загрязнения почв и дозой облучения ЩЖ в Брянской и Тульской обла-

стях, определяющиеся, вероятно, различным типом почв (дерново-подзолистые (*Umbric Albeluvisols Abruptic*) и серые (*Greyic Phaeozems Albic*) в Брянской области и черноземы (*Voronic Chernozems Pachic*) в Тульской области [Stepanenko et al., 1996]).

Принимая во внимание вклад проведения скрининговых исследований, в т. ч. ультразвуковой диагностики, в показатель роста общей заболеваемости РЦЖ, пространственная неоднородность распространения данной патологии внутри региона может быть связана с изучаемыми геохимическими факторами. Различия в распределении геохимических показателей между районами с высоким и низким риском развития РЦЖ у мужчин и женщин обуславливаются различиями в рационах [Choi, Kim, 2014]. Среди продуктов, выращиваемых в условиях домашних хозяйств, в рационе мужчин на мясные продукты приходится на 31% больше, чем у женщин, в то время как на овощи и фрукты приходится на 24% меньше [Выборочное наблюдение..., 2013].

В проведенном исследовании показано, что на пространственное распределение заболеваемости РЦЖ может оказывать влияние сочетание природных и антропогенных геохимических факторов. Полученные данные могут быть использованы для оценки вклада природно-техногенных факторов в распространенность эндемических заболеваний РЦЖ среди сельского населения с учетом особенностей поступления иода и селена. Данная информация может быть применена для разработки адресных рекомендаций по коррекции дефицита иода и селена.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Института геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН). Авторы благодарят А.С. Костина и М.Л. Голвина за помощь в пробоподготовке и химическом анализ проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боев В.А. Селен в почвах и сельскохозяйственных культурах юга Тюменской области // Вестник Тюменского гос. ун-та. Серия: Экология. 2013. № 12. С. 112–120.
- ГОСТ 26213-2021 Почвы. Методы определения органического вещества. Официальное издание. М.: РСТ, 2021. 11 с.
- ГОСТ Р 59024-2020 Вода. Общие требования к отбору проб (издание с Изменением № 1). Официальное издание. М.: РСТ, 2023. 40 с.
- Данные по радиоактивному загрязнению территории населенных пунктов Российской Федерации цезием – 137, стронцием – 90 и плутонием – 239+240 / под ред. С.М. Вакуловского, подг. В.Н. Яхрюшин. Обнинск: НПО «Тайфун», 2022. 233 с.
- Заболеваемость всего населения России в 2017 году. Статистические материалы. М.: Центральный научно-исследовательский ин-т организации и информатизации здравоохранения Минздрава России, 2018. 140 с.
- Злокачественные новообразования в России в 2021 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2022. 252 с.
- Иванов А.В., Шоба С.А. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Тула: Гриф и К, 2014. 768 с.
- Иванов В.К., Цыб А.Ф., Максютов М.А. и др. Основные результаты радиационно-эпидемиологического анализа данных РГМДР (к 20-летию Чернобыля) // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2005. Спецвыпуск. С. 6–111.
- Шишов Л.Л., Герасимова М.И., Тонконогов В.Д. и др. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
- Ковальский В.В., Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах СССР. М.: Наука, 1970. 180 с.

ВЫВОДЫ

Отмечена положительная корреляция между концентрацией иода в почвах и содержанием органического углерода, а также отрицательная корреляция с концентрацией селена. Установлено, что черноземы (*Voronic Chernozems Pachic*) Орловской области отличаются более высоким содержанием иода, в то время как для серых почв (*Greyic Phaeozems Albic*) характерен относительно более высокий уровень селена. Показана неоднородность распределения изучаемых элементов в подземных водах верхнедевонской карбонатной толщи. Относительно обогащенными иодом оказались подземные воды франского воронежско-ливенского карбонатно-терригенного комплекса, при этом некоторое увеличение содержания селена характерно для вод фаменского задонско-оптуховского карбонатного комплекса. Несмотря на широкое варьирование значений концентрации изучаемых элементов, большинство пастбищных почв и подземных вод, используемых для питьевого назначения, дефицитны как по иоду, так и по селену.

Распределение накопленного риска заболеваемости РЦЖ среди сельского населения региона может быть связано с пространственной неоднородностью концентраций иода и селена в нижних звеньях трофической цепи, а также с уровнем радиоактивного загрязнения.

- Ковальский В.В. Биологическая роль иода // Научн. тр. ВАСХНИЛ. 1972. С. 3–32.
- Ковальский В.В. Геохимическая экология. М., 1974. 282 с.
- Колмыкова Л.И. Особенности водной миграции иода и селена в геохимически контрастных ландшафтах Брянской области: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2017. 179 с.
- МУК 4.1.033-95 Методы контроля. Химические факторы. Определение селена в продуктах питания. Официальное издание. М.: Информационно-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 1995. 5 с.
- Никитина Л.П., Иванов В.Н., Аникина Л.В. Селен в горных породах и почвах // Селен в жизни человека и животных. М.: ВИНТИ РАН, 1995. С. 17–19.
- Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка и практическая реализация биологизированных систем земледелия, обеспечивающих существенное снижение энерго- и ресурсозатрат и экологостабилизирующий эффект в агроэкосистемах (заключительный)» / отв. исп. Н.В. Парахин. Орёл: Орловский государственный аграрный университет, 2013. 225 с.
- Отчет о результатах работ по объекту «Составление карт районирования территории ЦФО масштаба 1 : 500 000 (с врезками масштаба 1 : 200 000) для оптимизации производства региональных гидрогеологических, инженерно-геологических и геоэкологических работ в период 2005–2010 годов»: в 2 т. / отв. исп. Г.В. Лященко, В.В. Куренной. М.: Геоцентр-Москва, 2007. Т. 1. 106 с.
- Отчет по теме «Составление комплекта гидрогеологических карт масштаба 1 : 500 000 территории деятельности Центрального РГЦ»: в 5 т. Т. 1. Кн. 9. Пояснительная записка к гидрогеологическим картам: «Водоносные горизонты кайнозойских отложений» и «Воды мезозойских, палеозойских и докембрийских отложений». Масштаб 1 : 500 000. Орловская область / сост. Н.С. Викторова. М.: Межрегиональный центр по геологической картографии «Геокарт», 2001. 28 с.
- Проскурякова Г.Ф., Никитина О.Н. Ускоренный вариант кинетического роданидно-нитритного метода определения микроколичеств иода в биологических объектах // Агрохимия. 1976. Т. 7. С. 140–143.
- Синдирева А.В., Котченко С.Г., Гурьев Н.Е. Геохимическая оценка содержания селена в основных типах почв Тюменской области // Проблемы региональной экологии. 2021. № 3. С. 32–38.
- Турецкая Э.С., Данилейченко В.А. Иод, бром, кобальт и медь в питьевых водах горного района и эндемическая болезнь // Микроэлементы в животноводстве и медицине. Киев: Здоровье, 1965. С. 62–67.
- Atlas of Caesium 137 deposition on Europe after the Chernobyl accident*, M. de Cort (ed.), Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 1998. 63 p.
- Arthur J.R., Beckett G.J. Symposium 2 Newer aspects of micronutrients in at risk groups: New metabolic roles for selenium, *Proc. Nutr. Soc.*, 1994, vol. 53, no. 3, p. 615–624, DOI: 10.1079/PNS19940070.
- Bogović Crnčić T., Ilić Tomaš M., Giroto N. Risk Factors for Thyroid Cancer: What Do We Know So Far? *Acta clinica Croatica*, 2020, no. 59, p. 66–72, DOI: 10.20471/acc.2020.59.s1.08.
- Bonnefond S., Davies T.F. Thyroid Cancer – Risks and Causes, *Oncology & Hematology Review (US)*, 2014, vol. 10, no. 02, p. 144, DOI: 10.17925/OHR.2014.10.2.144.
- Cardis E., Kesminiene A., Ivanov V. et al. Risk of Thyroid Cancer After Exposure to 131 I in Childhood, *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 2005, vol. 97, no. 10, p. 724–732, DOI: 10.1093/jnci/dji129.
- Choi W.J., Kim J. Dietary Factors and the Risk of Thyroid Cancer: A Review, *Clin Nutr Res.*, 2014, vol. 3, no. 2, p. 75, DOI: 10.7762/cnr.2014.3.2.75.
- Gerashimov G., Judenitch O., Dedov I. Iodine Deficiency Disorders and Endemic Goiter in the Commonwealth of Independent States (CIS), *Iodine Deficiency in Europe: A Continuing Concern NATO ASI Series*, F. Delange, J.T. Dunn, D. Glinor (eds.), Boston, MA, Springer US, 1993, p. 347–351, DOI: 10.1007/978-1-4899-1245-9_43.
- Drozd V.M., Saenko V.A., Brenner A.V. et al. Major Factors Affecting Incidence of Childhood Thyroid Cancer in Belarus after the Chernobyl Accident: Do Nitrates in Drinking Water Play a Role? *PLoS One*, 2015, vol. 10, no. 9, e0137226, DOI: 10.1371/journal.pone.0137226.
- Jang J., Yoo D.-S., Chun B.C. Spatial distribution and determinants of thyroid cancer incidence from 1999 to 2013 in Korea, *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 22474, DOI: 10.1038/s41598-021-00429-w.
- Hanley J.P., Jackson E., Morrissey L.A. et al. Geospatial and Temporal Analysis of Thyroid Cancer Incidence in a Rural Population, *Thyroid*, 2015, vol. 25, no. 7, p. 812–822.
- International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, 4th edition, Vienna, International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022, 236 p.
- Kolmykova L.I., Korobova E.M. Iodine and selenium in natural waters as a risk factor in manifestation of endemic thyroid diseases (review), *Theoretical and Applied Ecology*, 2019, no. 2, p. 5–13, DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-005-013.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Kurnosova I.V. et al. Spatial geochemical differentiation of the iodine-induced health risk and distribution of thyroid cancer among urban and rural population of the Central Russian plain affected by the Chernobyl NPP accident, *Environ. Geochem. Health*, 2022, vol. 44, no. 6, p. 1875–1891, DOI: 10.1007/s10653-021-01133-4.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Kolmykova L.I. Theoretical and Methodological Approaches to the Analysis of the Spatial Distribution of Endemic Diseases of Geochemical Nature, *Geochem. Int.*, 2023, vol. 61, no. 10, p. 1074–1086, DOI: 10.1134/S0016702923100063.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Bech J. Cartographic evaluation of the risk of natural elements' deficiency in the soil cover provoking spatial variation of the endemic morbidity level (on example of thyroid morbidity among population of the Central Federal District, Russia), *Environ. Geochem. Health*, 2024, vol. 46, no. 3, art. 109, DOI: 10.1007/s10653-024-01912-9.
- Lossow K., Renko K., Schwarz M. et al. The Nutritional Supply of Iodine and Selenium Affects Thyroid Hormone Axis Related Endpoints in Mice, *Nutrients*, 2021, vol. 13, no. 11, p. 3773, DOI: 10.3390/nu13113773.
- Mann H.B., Whitney D.R. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other, *The Annals of Mathematical Statistics*, 1947, vol. 18, no. 1, p. 50–60, DOI: 10.1214/aoms/1177730491.

- Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples), *Biometrika*, 1965, vol. 52, no. 3–4, p. 591–611, DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591.
- Shakhtarin V.V., Tsyb A.F., Stepanenko V.F. et al. Iodine deficiency, radiation dose, and the risk of thyroid cancer among children and adolescents in the Bryansk region of Russia following the Chernobyl power station accident. *International journal of epidemiology*, 2003, vol. 32, no. 4., p. 584–591, DOI: 10.1093/ije/dyg205
- Stepanenko V., Kondrashov A., Yaskova E. et al. The reconstruction of thyroid dose following Chernobyl, *The radiological consequences of the Chernobyl accident*, 1996, p. 7–12.
- Sung H., Ferlay J., Siegel R.L. et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries, *CA A Cancer J Clinicians*, 2021, vol. 71, no. 3, p. 209–249, DOI: 10.3322/caac.21660.
- Global Scorecard of Iodine. Nutrition in 2020 in the General Population Based on School-Age Children (SAC), IGN, Ottawa, 2021, 14 p.
- Zvonova I., Krajewski P., Berkovsky V. et al. Validation of ¹³¹I ecological transfer models and thyroid dose assessments using Chernobyl fallout data from the Plavsk district, Russia, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2010, vol. 101, no. 1, p. 8–15, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2009.08.005.
- Электронные ресурсы
- Выборочное наблюдение рациона питания населения. 2013. URL: https://rosstat.gov.ru/free_doc/new_site/food1/survey0/index.html (дата обращения 17.07.2024).
- СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // Официальный интернет-портал правовой информации [www.pravo.gov.ru](http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022> (дата обращения 06.12.2024).
- Global Cancer Observatory: Cancer Today, URL: <https://gco.iarc.who.int/today> (access date 17.07.2022).

Поступила в редакцию 22.08.24
После доработки 05.10.2024
Принята к публикации 26.11.2024

DISTRIBUTION OF IODINE AND SELENIUM IN SOILS AND GROUNDWATER OF RURAL AREAS IN THE ORYOL REGION AS A RISK FACTOR FOR THYROID CANCER

V.S. Baranchukov¹, V.Yu. Berezkin², L.I. Kolmykova³, V.N. Danilova⁴, A.A. Dolgonosov⁵

¹⁻⁵ V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry

¹⁻⁴ Laboratory of Environmental Biogeochemistry

⁵ E.M. Galimov Laboratory of Carbon Geochemistry

¹ Scientific Researcher; e-mail: baranchukov@geokhi.ru

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology; e-mail: victor76@list.ru

³ Scientific Researcher, Ph.D. in Geology; e-mail: kmila9999@gmail.com

⁴ Scientific Researcher; e-mail: val1910@mail.ru

⁵ Junior Scientific Researcher; e-mail: dolgonosov@geokhi.ru

The environmental iodine and selenium deficiency is prevalent in Russia, including the Oryol region, leading to an increased risk of thyroid cancer (TC) among the local population. The aim of the research is to investigate the spatial heterogeneity of the TC incidence in relation to the environmental distribution of iodine and selenium in the Oryol region. Samples were collected from 52 rural settlements (20 cm layer of pasture soils ($n = 54$) and drinking groundwater ($n = 104$)). The investigation revealed a high heterogeneity of the concentration of the elements both in soils and in natural water. The concentrations of I and Se were found to be lower in *Greyic Phaeozems Albic* (median I content: 1,68 mg/kg; Se: 0,155 mg/kg) than in *Voronic Chernozems Pachic* (I: 2,53 mg/kg; Se: 0,158 mg/kg). The iodine concentrations in all soil samples were lower than the optimal level (5 mg/kg), while Se content was lower than the optimum (0,2–0,7 mg/kg) in 55% of samples. The distribution of the elements in the groundwater is primarily in correlation with particular aquifers. Higher concentrations of iodine are associated with the Frasnian carbonate-terrigenous complex (I: 9,89 µg/l; Se: 0,09 µg/l), while lower concentrations are associated with the Famennian carbonate complex (I: 3,83 µg/l; Se: 0,2 µg/l). Concentrations were found to be below the optimum in 67% of groundwater samples for iodine (10 µg/l), and in 99% for selenium (2,5 µg/l). A notable variation in iodine and selenium levels was observed between the districts with low and high TC risk in the region. Based on the data obtained, it is possible to estimate the environmental impact on the TC morbidity.

Keywords: biogeochemistry, geochemical ecology, trace elements, endemic diseases, drinking water, pasture soils

Acknowledgements. The work was carried out under the state task of the V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS. The authors are grateful to A.S. Kostin and M.L. Golovin for their assistance in sample preparation and chemical analysis.

REFERENCES

- Arthur J.R., Beckett G.J. Symposium 2 Newer aspects of micronutrients in at risk groups: New metabolic roles for selenium, *Proc. Nutr. Soc.*, 1994, vol. 53, no. 3, p. 615–624, DOI: 10.1079/PNS19940070.
- Atlas of Caesium 137 deposition on Europe after the Chernobyl accident*, M. De Cort (ed.). Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 1998, 63 p.
- Bogović Crnčić T. Risk Factors for Thyroid Cancer: What Do We Know So Far? *Acta clinica Croatica*, 2020, no. 59, p. 66–72, DOI: 10.20471/acc.2020.59.s1.08.
- Bonnefond S., Davies T.F. Thyroid Cancer – Risks and Causes, *Oncology & Hematology Review* (US), 2014, vol. 10, no. 02, p. 144, DOI: 10.17925/OHR.2014.10.2.144.
- Boyev V.A. Selen v pochvakh i sel'skokhozyaistvennykh kul'turakh yuga Tyumenskoi oblasti [Selenium in the soils and agricultural plants in the south of Tyumen region], *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya: Ekologiya*, 2013, no. 12, p. 112–120. (In Russian)
- Cardis E., Kesminiene A., Ivanov V. et al. Risk of Thyroid Cancer After Exposure to ¹³¹I in Childhood // *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 2005, vol. 97, no. 10, p. 724–732, DOI: 10.1093/jnci/dji129.
- Choi W.J., Kim J. Dietary Factors and the Risk of Thyroid Cancer: A Review, *Clin Nutr Res.*, 2014, vol. 3, no. 2, p. 75, DOI: 10.7762/cnr.2014.3.2.75.
- Dannye po radioaktivnomu zagryazneniju territorii naselennykh punktov Rossijskoj Federacii ceziem – 137, stronciem – 90 i plutoniem – 239+240* [The data on radioactive contamination of the territory of the settlements of the Russian Federation by caesium – 137, strontium – 90 and plutonium – 239+240], S.M. Valkylovsky (ed.), Obninsk, Typhoon Publ., 2022, 233 p. (In Russian)
- Drozd V.M. et al. Major Factors Affecting Incidence of Childhood Thyroid Cancer in Belarus after the Chernobyl Accident: Do Nitrates in Drinking Water Play a Role? *PLoS One*, 2015, vol. 10, no. 9, e0137226, DOI: 10.1371/journal.pone.0137226.
- Gerasimov G., Judenitch O., Dedov I. Iodine Deficiency Disorders and Endemic Goiter in the Commonwealth of Independent States (CIS), *Iodine Deficiency in Europe: A Continuing Concern* NATO ASI Series, F. Delange, J.T. Dunn, D. Glinoe (eds.), Boston, MA, Springer US, 1993, p. 347–351, DOI: 10.1007/978-1-4899-1245-9_43.
- Global Scorecard of Iodine. Nutrition in 2020 in the General Population Based on School-Age Children (SAC)*, IGN, Ottawa, 2021, p. 15.
- GOST 26213-2021 Pochvy, Metody opredelenija organicheskogo veshhestva* [State Standart 26213-2021 Soils, Methods for determination of organic matter], Official publication, Moscow, FGBU RST, 2021, 11 p. (In Russian)
- GOST R 59024-2020 Voda, Obshhie trebovanija k otboru prob* (Izdanie s Izmeneniem no 1). [State Standart R 59024-2020 Water, General requirements for sampling (Edition with Amendment No. 1), Official publication. Moscow, FGBU RST, 2023, 40 p. (In Russian)
- Hanley J.P., Jackson E., Morrissey L.A. et al. Geospatial and Temporal Analysis of Thyroid Cancer Incidence in a Rural Population, *Thyroid*, 2015, vol. 25, no. 7, p. 812–822.
- International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, 4th edition, Vienna, International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022, 236 p.
- Ivanov A.V., Shoba S.A. *Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennykh resursov Rossii. Versija 1.0* [Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0], Tula, Grif and K Publ., 2014, 768 p. (In Russian)
- Ivanov V.K., Tsyb A.F., Maksyutov M.A. et al. Osnovnye rezul'taty radiacionno-epidemiologicheskogo analiza dannyh RGMDR (k 20-letiju Chernobylya) [Basic results of the radiation-epidemiological analysis of the RGMDR data (on the 20th anniversary of Chernobyl accident)], *Radiacija i risk (Bjulleten' Nacional'nogo radiacionno-epidemiologicheskogo registra)*, 2005, no. S3, p. 6–111. (In Russian)
- Jang J., Yoo D.-S., Chun B.C. Spatial distribution and determinants of thyroid cancer incidence from 1999 to 2013 in Korea, *Sci Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 22474, DOI: 10.1038/s41598-021-00429-w.
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Russian soil classification and diagnostics], L.L. Shishov et al. Smolensk, Oikumena Publ., 2004, 341 p. (In Russian)
- Kolmykova L.I. *Osobennosti vodnoi migratsii ioda i selena v geokhimicheski kontrastnykh landshaftakh Bryanskoi oblasti* [Specific features of water migration of iodine and selenium in geochemically contrasting landscapes of the Bryansk oblast], Ph.D. Thesis in Geosciences, Moscow, Institut geokhimii i analiticheskoj khimii Rossijskoj akademii nauk, 2017, 179 p. (In Russian)
- Kolmykova L.I., Korobova E.M. Iodine and selenium in natural waters as a risk factor in manifestation of endemic thyroid diseases (review), *Theoretical and Applied Ecology*, 2019, no. 2, p. 5–13, DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-005-013.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Bech J. Cartographic evaluation of the risk of natural elements' deficiency in the soil cover provoking spatial variation of the endemic morbidity level (on example of thyroid morbidity among population of the Central Federal District, Russia), *Environ Geochem Health*, 2024, vol. 46, no. 3, art. 109, DOI: 10.1007/s10653-024-01912-9.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Kolmykova L.I. Theoretical and Methodological Approaches to the Analysis of the Spatial Distribution of Endemic Diseases of Geochemical Nature, *Geochem. Int.*, 2023, vol. 61, no. 10, p. 1074–1086, DOI: 10.1134/S0016702923100063.
- Korobova E.M., Baranchukov V.S., Kurmosova I.V., Silenok A.V. Spatial geochemical differentiation of the iodine-

- induced health risk and distribution of thyroid cancer among urban and rural population of the Central Russian plain affected by the Chernobyl NPP accident, *Environ Geochem Health*, 2022, vol. 44, no. 6, p. 1875–1891, DOI: 10.1007/s10653-021-01133-4.
- Kovalsky V.V. Biologicheskaya rol' ioda [Biological role of iodine], *Nauchn. tr. VASKhNIL*, 1972, p. 3–32. (In Russian)
- Kovalsky V.V. *Geokhimicheskaya ekologiya* [Geochemical ecology], Moscow, 1974, 282 p. (In Russian)
- Kovalsky V.V., Andrianova G.A. *Mikrojelementy v pochvah SSSR* [Micronutrients in the soils of the USSR], Moscow, Nauka Publ., 1970, 180 p. (In Russian)
- Lossow K., Renko K., Schwarz M. et al. The Nutritional Supply of Iodine and Selenium Affects Thyroid Hormone Axis Related Endpoints in Mice, *Nutrients*, 2021, vol. 13, no. 11, p. 3773, DOI: 10.3390/nu13113773.
- Mann H.B., Whitney D.R. On a Test of Whether One of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other, *The Annals of Mathematical Statistics*, 1947, vol. 18, no. 1, p. 50–60, DOI: 10.1214/aoms/1177730491.
- MUK 4.1.033-95 *Metody kontrolya. Khimicheskie faktory. Opredelenie selena v produktakh pitaniya* [Methodological guidelines 4.1.033-95. Control methods. Chemical factors. Determination of selenium in foodstuffs], Moscow, Informatsionno-izdatel'skii tsentr Goskomsanepidnadzora Rossii Publ., 1995, 5 p. (In Russian)
- Nikitina L.P., Ivanov V.N., Anikina L.V. [Selenium in rocks and soils], *Selen v zhizni cheloveka i zivotnykh* [Selenium in the life of humans and animals], Moscow, VINITI RAN Publ., 1995, p. 17–19. (In Russian)
- Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote po teme: Razrabotka i prakticheskaya realizatsiya biologizirovannykh sistem zemledeliya, obespechivayushchikh ushchestvennoe snizhenie energo- i resursozatrata i ekologostabiliziruyushchii effekt v agroekosistemakh (zaklyuchitel'nyi)* [Report on the research on the topic: Development and practical implementation of biological farming systems providing for a significant reduction in energy and resource costs and an ecologically stabilizing effect in agroecosystems (final)], N.V. Parakhin (ed.), Oryol, Orlovskii Gosudarstvennyi Agrarnyi Universitet Publ., 2013, 225 p. (In Russian).
- Otchet o rezul'tatakh rabot po ob"ektu "Sostavlenie kart raionirovaniya territorii TsFO masshtaba 1:500 000 (s vrezkami masshtaba 1:200 000) dlya optimizatsii proizvodstva regional'nykh gidrogeologicheskikh, inzhenerno-geologicheskikh i geoekologicheskikh rabot v period 2005–2010 godov" v 2-kh tomakh* [Report on the results of work on the object "Compilation of maps of zoning of the territory of the Central Federal District at the scale of 1:500 000 (with inserts at the scale of 1:200 000) for optimisation of regional hydrogeological, engineering-geological and geoecological works during 2005–2010", in 2 volumes] G.V. Lyashchenko, V.V. Kurennoi (eds.), Moscow, Geotsentr-Moskva Publ., 2007, vol. 1, 106 p. (In Russian)
- Otchet po teme "Sostavlenie kompleksa gidrogeologicheskikh kart masshtaba 1:500000 territorii deyatel'nosti Tsentral'nogo RGTs", v 5 t., t. 1, kn. 9, Poyasnitel'naya zapiska k gidrogeologicheskim kartam "Vodonosnye gorizonty kainozoiskikh otlozhenii" i "Vody mezozoiskikh, paleozoiskikh i dokembriiskikh otlozhenii", masshtab 1:500 000, Orlovskaya oblast'* [Report on the theme 'Compilation of a set of hydrogeological maps at a scale of 1:500 000 of the Central RGC activity area', in 5 vols, t. 1, book 9, Explanatory note to hydrogeological maps 'Aquifers of Cenozoic sediments' and 'Waters of Mesozoic, Paleozoic and Precambrian sediments'], N.S. Viktorova (ed.), Moscow, Mezhhregional'nyi tsentr po geologicheskoi kartografii, Geokart Publ., 2001, 28 p.
- Proskuryakova G.F., Nikitina O.N. Uskorennyi variant kineticheskogo rodanidno-nitritnogo metoda opredeleniya mikrokolichestv ioda v biologicheskikh ob'ektakh [The accelerated variant of the kinetic rhodanide-nitrite method for determination of trace quantities of iodine in biological objects], *Agrokhiimiya*, 1976, no. 7, p. 140–143. (In Russian)
- Shakhtarin V.V., Tsyb A.F., Stepanenko V.F. et al. Iodine deficiency, radiation dose, and the risk of thyroid cancer among children and adolescents in the Bryansk region of Russia following the Chernobyl power station accident, *International journal of epidemiology*, 2003, vol. 32, no. 4, p. 584–591, DOI: 10.1093/ije/dyg205.
- Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples), *Biometrika*, 1965, vol. 52, no. 3–4, p. 591–611, DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591.
- Simonova V.G. Analysis of the incidence of thyroid cancer in the population of the Oryol Region, *Sanitary Doctor*, 2022, no. 2, p. 132–141, DOI: 10.33920/med-08-2202-05.
- Sindireva A.V., Kotchenko S.G., Gur'ev N.E. Geokhimicheskaya otsenka sodержaniya selena v osnovnykh tipakh pochv Tyumenskoi oblasti [Geochemical assessment of selenium content in the main soil types of the Tyumen Oblast], *Problemy regional'noi ekologii*, 2021, no. 3, p. 32–38. (In Russian)
- Stepanenko V., Kondrashov A., Yaskova E. et al. The reconstruction of thyroid dose following Chernobyl, *The radiological consequences of the Chernobyl accident*, 1996, p. 7–12.
- Sung H., Ferlay J., Siegel R.L. et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries, CA, *A Cancer J. Clinicians*, 2021, vol. 71, no. 3, p. 209–249, DOI: 10.3322/caac.21660.
- Turetskaya E.S., Danileichenko V.A. [Iodine, bromine, cobalt and copper in drinking water of a mountainous area and endemic disease], *Mikroelementy v zhitovodstve i meditsine* [Trace elements in cattle breeding and medicine], Kiev, Zdorov'e Publ., 1965, p. 62–67. (In Russian)
- Zabolevaemost' vsego naseleniya Rossii v 2017 godu. Statisticheskie materialy* [Morbidity of the total population of Russia in 2017. Statistical materials], Moscow, Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut organizatsii i informatizatsii zdravookhraneniya Minzdrava Rossii Publ., 2018, 140 p. (In Russian)
- Zlokachestvennye novoobrazovaniya v Rossii v 2021 godu (zabolevaemost' i smertnost')* [Malignant neoplasms in Russia in 2021 (morbidity and mortality)], A.D. Kaprin, V.V. Starinsky, A.O. Shakhzodova (eds.), Moscow, P.A. Herzen Publ., 2022, 252 p. (In Russian)
- Zvonova I., Krajewski P., Berkovsky V. et al. Validation of ¹³¹I ecological transfer models and thyroid dose assessments using Chernobyl fallout data from the Plavsk district, Russia, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2010, vol. 101, no. 1, p. 8–15, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2009.08.005.

Web sources

Global Cancer Observatory: Cancer Today, URL: <https://gco.iarc.who.int/today> (access date 17.07.2024).

SanPiN 1.2.3685-21 Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya [Hygienic norms and requirements 1.2.3685-21 Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness of envi-

ronmental factors for humans], Official Internet portal of legal information www.pravo.gov.ru Publ., 2021, no 0001202102030022 (access date 06.12.2024). (In Russian)

Vyborochnoe nablyudenie ratsiona pitaniya naseleniya 2013 [Selective observation of the population's dietary intake 2013], URL: https://rosstat.gov.ru/free_doc/new_site/food1/survey0/index.html (access date 17.07.2024). (In Russian)

Received 22.08.2024

Revised 05.10.2024

Accepted 26.11.2024

ЭКОЛОГО-ЛАНДШАФТНОЕ ЗОНИРОВАНИЕ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ВЛАДИВОСТОКСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Е.Г. Егидарев

*Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН, лаборатория физической океанологии;
Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск,
науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: egidarev@yandex.ru*

В работе рассмотрен опыт выделения и картографирования функциональных зон для разработки программ по устойчивому природопользованию Владивостокской агломерации (ВА) с учетом прилегающей акватории.

Определены и предложены авторские границы ВА (12 149,2 км²), учитывающие взаимосвязанность сухопутных и морских пространственных компонентов в условиях существующей модели природопользования.

Созданы серии карт с целью изучения динамики ландшафтов и разработки рекомендаций по устойчивому природопользованию, включая морское пространственное планирование (МПП), и обеспечению экологической безопасности в комплексном управлении прибрежной зоны (КУПЗ). В результате были получены геоинформационные слои, отображающие текущую структуру природопользования ВА. На основе пространственного анализа предложена схема функционального зонирования, где показаны зоны дальнейшего развития территорий (1647,4 км²) и акваторий (3936,2 км²), отображены зоны сохранения (1975,8 км²) и изъятия (4178,3 км²), способные обеспечить экологическую безопасность ВА. Установлено, что Хасанский район в пределах ВА содержит только 11,8% территорий, отведенных под селитебно-промышленное освоение, и при этом 81% уже имеют особо охраняемый природный статус, позволяя не только сохранить уникальный природный потенциал, но и обеспечить рациональное освоение рекреационных ресурсов.

Ключевые слова: морское пространственное планирование, прибрежная зона, картографирование и пространственный анализ, комплексное управление прибрежными зонами, устойчивое развитие, территориальное планирование

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.4

ВВЕДЕНИЕ

Владивостокская агломерация (ВА) – это крупнейший экономический и культурный центр Дальнего Востока России (ДВР), расположенный на берегу Тихого океана. Она имеет большой потенциал для развития туризма [Кияшко, Лебедева, 2016; Преловский, Виговская, 2022; Сорокин, 2020; Костина и др., 2018; Розломий, 2012], рыбной промышленности и транспортных связей [Грицута, Телегина, 2017; Ембулаев, Заусаев, 2013; Фисенко, Юрченко, 2019; Москальчук, Ворожит, 2009; Мошков, 2020], но при этом находится под угрозой различных экологических проблем [Авдеев, 2021; Погорелов и др., 2018; Мощенко и др., 2019]. ВА представляет собой комплексное экономико-географическое образование, объединяющее поселения, их территориальное и акваториальное окружение, а также связанную между собой инфраструктуру, природно-ресурсную и экологическую среду, социальную и экономическую сферы. В целом, это высоко интегрированная урбанизированная географическая система, где изменение любого компонен-

та приводит к изменению связанных с ним элементов. Именно поэтому агломерационная геосистема должна стать основным объектом стратегического планирования и управления [Верещагина, Гусева, 2017; Рукавицына, 2014; Бакланов и др., 2017; Анискин, 2023]. Таким образом, здесь крайне необходимо обеспечить устойчивое развитие территории, сохранение природных ресурсов и экологическую безопасность [Майоров и др., 2009; Майоров, 2007]. Чтобы достичь наилучших результатов, важно учитывать взаимосвязь и взаимозависимость компонентов агломерации. Именно поэтому выделение ВА как целостного объекта управления становится первостепенной задачей в управлении территориями / акваториями.

При определении границ ВА учитывалась не только доступность наземным транспортом, но и морская близость через залив Петра Великого (ЗПВ). Это особенно важно в условиях прибрежного положения города, что отражает значительное увеличение доступности прибрежных территорий Хасанского района, островов и восточного берега

ЗПВ. Для выделения границ ВА рассмотрены ближайшие административные единицы, расположенные вблизи границ Владивостока, включающие в себя водосборы рек ЗПВ: Артемовский городской округ (ГО); Надеждинский район; Шкотовский район; ГО Большой Камень; северная часть Хасанского района. При этом была оценена транспортная связность этих территорий до центра города и выделена зона агломерации с 1,5-часовой доступностью по автодорогам и акватории ЗПВ, ограниченная прямой линией от мыса Гамова до южной части острова Аскольд (рис. 1). Следует подчеркнуть, что водо-

сборная сухопутная часть ВА играет немаловажную роль в исследовании прибрежной зоны [Музыченко, 2024], т. к. является неотъемлемой частью многих природных процессов, определяющих экологическое состояние ЗПВ.

Главная цель работы заключается в том, чтобы, определив границы ВА, на основе доступного материала с использованием геоинформационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) оценить современное состояние природопользования, провести ее функциональное зонирование для разработки КУПЗ и МПП.

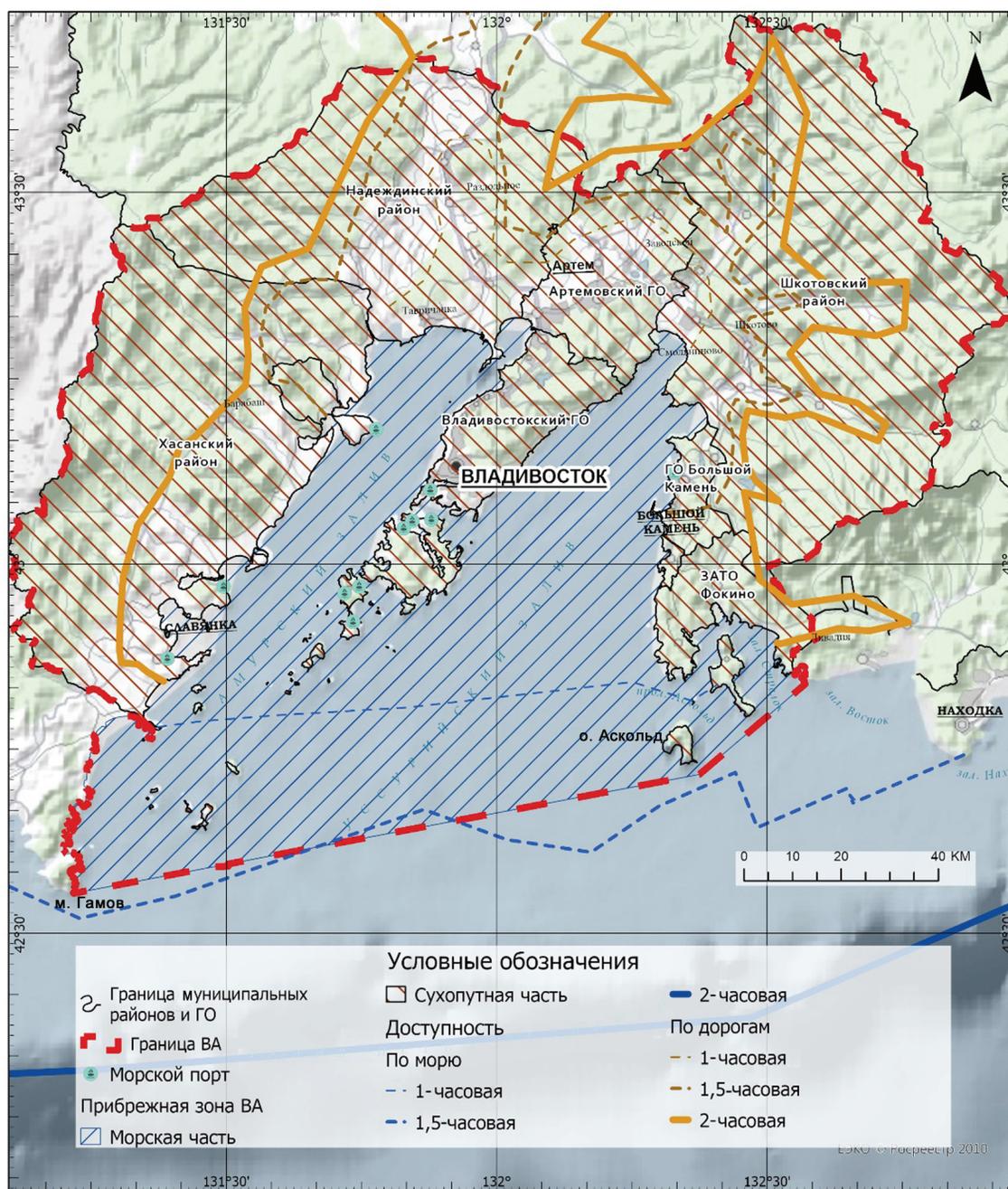


Рис. 1. Исследуемая территория / акватория ВА с зонами доступности

Fig. 1. The territory under study / the water area of the VA with accessibility zones

В исследовании проведена инвентаризация основных природных ресурсов и выполнено крупномасштабное (1 : 100 000) картографирование функциональных зон с целью дальнейших исследований для разработки предложений по устойчивому развитию ВА. Для этого был проведен анализ использования земельных участков, ресурсов водных объектов, лесных массивов, прибрежных территорий и акваторий. При создании ГИС также использовались актуальные данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), что позволило оценить природный потенциал ВА, выявить некоторые экологические проблемы и основные причины их возникновения.

Картографические данные в исследовании могут быть широко применимы для разработки программ устойчивого природопользования и МПП на основе оценки результатов функционального зонирования. При этом необходимо также учитывать интересы различных отраслей, оперирующих в одном пространстве, и рассмотреть их возможные сочетания [Сорокин, 2023]. Программы устойчивого природопользования должны включать в себя меры по охране и восстановлению природных ресурсов, регулированию загрязнения окружающей среды, контролю за использованием природных ресурсов и обеспечению экологической безопасности на территории ВА.

В действующем законодательстве России нет правового акта, строго определяющего прибрежную зону и трактующего ее как единое физико-географическое и природно-ресурсное пространство для принятия управленческих и планировочных решений. На основе анализа последних отечественных работ в области прибрежно-морского природопользования [Бакланов и др., 2017] можно определить, что прибрежная зона выделяется как зона контактных акватерриториальных структур суши – океана на основе иерархического функционального зонирования. Акватория прибрежной зоны, определенная в качестве объекта управления, должна рассматриваться как сложная динамическая система взаимодействий между хозяйственной деятельностью, общественными потребностями, природными ресурсами и внешними факторами, включая и антропогенное воздействие.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Массив информации, имеющийся в наличии в настоящее время, представлен преимущественно разрозненными картографическими данными, часть которых имеет узкоотраслевую направленность и ведомственную принадлежность, что затрудняет представление целостной картины на каждом конкретном участке прибрежно-морской зоны, где

был бы учтен весь комплекс факторов, влияющих на организацию природопользования. Предпринимаются отдельные попытки интеграции с использованием функциональных возможностей ГИС, однако, при этом неизбежно возникает ряд сложностей, связанных как с совмещением форматов, так и с содержанием конкретных информационных слоев системы [Блиновская и др., 2021]. По сути, пространственное планирование, в том числе морское, должно быть представлено в форме системы поддержки принятия решений, сформированной на основе ГИС-технологий. Этот подход успешно реализуется сейчас во многих отраслях промышленного производства социально-экономической сферы [Луценко, 2023].

Для проведения современной геоэкологической оценки изучаемой территории и ее пространственного планирования были собраны открытые публичные данные ДЗЗ с различных космических программ: Landsat, Sentinel, Alos и пр. Исходные пространственные данные для оценки текущей ситуации природопользования и проведения функционального зонирования ВА как основы проекта МПП включают информационные ресурсы органов государственной власти, отраслевые базы данных, а также другие источники (табл. 1), включая местные интернет-сайты. В пределах ВА уже многократно проводилось различное зонирование, которое должно было стать отправной точкой на пути устойчивого развития территорий, но многие разработанные планы ввиду отсутствия государственного финансирования так и остались без должного внимания и не были реализованы. Наиболее проработанные материалы удалось получить с различных схем территориального планирования (СТП), подготовленных к саммиту АТЭС (Азиатско-Тихоокеанское экономическое сотрудничество) в 2012 г. [Схема..., 2009] и далее обновленных в 2017 г. [Схема..., 2017].

Следует отметить, что некоторые накопленные информационные ресурсы различных организаций и отраслевых ведомств в РФ в силу своей разрозненности и разнотипности чаще всего бывают труднодоступны для проектировщиков, в связи с чем необходим механизм, обеспечивающий всем заинтересованным сторонам доступ ко всей необходимой информации.

В качестве главного независимого источника картографической информации в работе использовались данные ДЗЗ космических программ LANDSAT и SENTINEL, полученные с мировых баз данных (<http://landsat.usgs.gov>), EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>), Global Visualization Viewer (GloVis – <http://glovis.usgs.gov>), а также публичные картографические сервисы корпораций Google, Yandex, Microsoft, детально отображаю-

щие местность с использованием космической съемки высокого и сверхвысокого пространственного разрешения; мировые базы данных (MarineTraffic, ASTER Global DEM [Tachikawa et al., 2011], Global land cover and land use 2019 [Hansen et al., 2022], HydroSHEDS [Lehner et al., 2006], SRTM [Jarvis et al., 2008], Open Street Map [OpenStreetMap, 2024]); векторные топографические карты масштабов 1 : 500 000, 1 : 200 000 и 1 : 100 000 [Topographic..., 2000].

Таблица 1

Исходные данные для выполнения функционального зонирования ВА

Источник информации / Наименование	Разработчик / Владелец	Тип информационного ресурса / Доступ
Федеральная государственная информационная система территориального планирования (ФГИС ТП)	Министерство экономического развития РФ	Обеспечивает доступ к государственным и муниципальным информационным ресурсам. Доступ открыт: http://fgistp.economy.gov.ru/
Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО ФЦП)	Минтранс РФ, Федеральное агентство морского и речного транспорта; научно-исследовательские организации	База данных с графическими материалами, текстовым описанием характеристик морей, морских портов, международных транспортных коридоров. Доступ открыт: http://www.morinfocenter.ru/
MarineTraffic – онлайн-сервис отслеживания судов	Эгейский университет в Эрмуполе, Греция	Предоставляет информацию о движении судов и текущем местонахождении судов в гаванях и портах. Базовый сервис бесплатный; продвинутое функциями, такие как спутниковое слежение, доступны за дополнительную плату. Доступ открыт: https://www.marinetraffic.com/
Аквавосток.рф – онлайн-сервис, визуализирующий доступные морские акватории для ведения марикультурной деятельности	Государственная корпорация «Банк развития и внешнеэкономической деятельности (Внешэкономбанк)»	Обеспечивает инвестору возможность выбора границ рыболовного участка на интерактивной карте. Доступ открыт: https://app.aquavostok.ru/map
Статистические сборники, научно-технические отчеты ведомственных организаций, стратегии и программы социально-экономического развития	Роскомстат, отраслевые организации; научно-исследовательские институты	Данные, необходимые для оценки социально-экономического потенциала (реестр предприятий и их дислокация, характеристика производственных объектов прибрежной зоны, численность населения в населенных пунктах приморской территории и др.). Доступ к ресурсам преимущественно платный, доступ к ведомственным базам данных труднодоступен
Реестр особо охраняемых природных территорий, правовые и законодательные акты	Министерство природных ресурсов и экологии РФ, территориальные комитеты по природопользованию	Базовые данные по охраняемым объектам и их пространственному расположению. Доступ открыт: https://www.mnr.gov.ru/
Информационно-аналитическая система «Особо охраняемые природные территории России» (ИАС «ООПТ РФ»)	ААНИИ, Лаборатория геоинформационных технологий	Единая информационная система ООПТ, с обеспечением доступа специалистов к редактированию и обновлению данных. Обеспечивает ведение кадастра и мониторинга. Доступ открыт: http://oopt.aari.ru/
Геопортал Приморского края «СИХОТЭ-АЛИНЬ»	ООО «Центр геопространственной аналитики»; ООО «Инженерные системы», ООО «Геокад ДВ», ФГБУН ТИГ ДВО РАН	Программный комплекс для организации в Сети открытой публикации пространственных данных, их создания, актуализации и анализа. Доступ открыт: http://188.170.233.213/
Геопортал ТИГ ДВО РАН и электронные географические тематические атласы	ФГБУН ТИГ ДВО РАН	Сервис визуализации и редактирования данных из различных источников. Фондовые материалы ТИГ ДВО РАН. Систематические собрания карт, выполненных по единому методу. Доступ открыт: http://gis.tigdvo.ru/

В ходе работы использовано программное обеспечение различного назначения: Erdas (для обработки спутниковых данных), ArcGIS desktop 10.8; ArcPro (для обработки геоданных, визуального дешифрирования, составления картосхем, пространственного анализа и т. д.), Microsoft Excel (для расчета статистики и результирующих данных). Результаты были оформлены в виде электронных тематических слоев в формате данных геобазы (.gdb).

Методологической основой работы являются ландшафтные подходы [Ландшафтное..., 2002], основанные на бассейновом принципе [Корытный, 2001; Чалова, Чалов, 1999] и комплексном географическом анализе, включая: статистический; сравнительно-географический; математико-картографическое моделирование [Тикунов, 1997]; картографический [Лурье, 2008; Кравцова, 1995]; аналитический и геоинформационный.

Функциональное зонирование является составной частью работ по ландшафтному планированию, градостроительному зонированию территорий и МПП. Оно основано на базовых принципах, которые ориентированы на формирование геоэкологически и экономически рациональных систем природопользования путем совершенствования территориальной структуры и функционирования природно-хозяйственных систем в соответствии с природными, природно-ресурсными и экономическими особенностями географического пространства [Арзамасцев и др., 2010; Каракин, 2018].

Картографирование функциональных зон позволило разделить пространство ВА на части с различными целями использования, такими как: изъятие, сохранение, развитие и улучшение. В каждой зоне были установлены соответствующие ограничения на использование ресурсов и предложены меры по охране окружающей среды. Функциональное зонирование на базе интегрированной концепции использования территории выполнено с помощью анализа современной структуры использования земель и прилегающих к ним морских акваторий, существующих геоэкологических проблем, анализа социально-экономического состояния территории и ее ресурсной оценки, как отдельных компонентов, так и природных комплексов в целом. Результатом работы является карта функционального зонирования, составленная на основе разработанной концепции, которая отражает:

- территории и акватории, рекомендуемые для сохранения природной среды и социально-экономического развития;
- территории и акватории с наиболее острыми экологическими проблемами, где необходимо принятие особых мер для их восстановления;
- определение и уточнение направлений разви-

тия территории и акватории, с конкретизацией базовых структур природопользования и социально-экономического развития.

Методика картографирования функциональных зон на территории и акватории имеет значительные отличия, что в первую очередь связано с разным способом использования пространства и наличия природных ресурсов. Следует отметить, что в исследовании все границы функциональных зон для ВА были выделены впервые. Процесс картографирования происходил как полуавтоматическим, так и экспертным способом, т. к. некоторые границы были взяты с существующих объектов (такие, как ООПТ, зоны санитарной охраны, застройка и пр.), и с помощью моделирования пространственных данных в ГИС (крутизна склонов, высота / глубина, построение буферов, пересечение различных видов природопользования и др.). Для возможности опереться на ландшафтный подход были построены пространственные данные о цифровой модели местности и с помощью экспертного картографирования данных ДЗЗ получена картосхема современного землепользования.

Функциональные зоны сухопутной части преимущественно определялись ландшафтным подходом [Ландшафтное..., 2002] с учетом устоявшегося типа природопользования и определением оптимальных целей использования.

Реализация цели «изъятие» направлена на сохранение уникальных, особо ценных в экологическом, научном, культурном и эстетическом отношении ландшафтов естественного и искусственного происхождения. К данному типу целей относится формирование и развитие особо охраняемых природных территорий (ООПТ), для которых хозяйственная деятельность предельно регламентируется Федеральным законом об ООПТ [Федеральный..., 1995] и законом Приморского края об ООПТ Приморского края [Закон..., 2005].

Реализация цели «сохранение» направлена на сохранение естественных средоформирующих ландшафтных функций территории, нормального воспроизводства ее природных ресурсов, уникальных ландшафтов и природного разнообразия для сохранения современного состояния. Для данного типа цели наиболее актуальным является правило уникальности: «Все редкое и уникальное заслуживает щадящего режима землепользования» [Хорошев и др., 2019]. На достижение данной цели выделены ландшафты со следующими признаками:

- малоосвоенные районы с высокой пересеченностью рельефа (крутые склоны, горные гребты и пр.);
- наличие постоянной густой растительности, включая долинные комплексы, удаленной от поселений.

На достижение цели «развитие» ориентирована группа ландшафтов, предназначенных для развития существующей и планируемой хозяйственной деятельности. При этом были определены две подцели: экстенсивного и интенсивного природопользования в этих ландшафтах.

Для реализации цели «улучшение» выделены группы ландшафтов со значительной антропогенной нарушенностью. На них рекомендуется временный отказ от использования, выполнение мероприятий по улучшению их состояния с последующим переводом в целевую группу сохранения или развития.

Функциональные зоны морской части ВА определены не только путем сложившегося использования акватории, но и с учетом потенциально перспективных направлений для устойчивого развития морской и прибрежной деятельности.

Информационное обеспечение формировалось на основе географической модели акватории и включало пять блоков: природно-ресурсный, природоохранный, экологический; социально-экономический, историко-культурный, нормативно-правовой.

Алгоритм функционального зонирования содержал последовательное выполнение следующих этапов:

- анализ и комплексная оценка современного использования акватории по виду и характеру морской деятельности, ее пространственной локализации;
- установление ограничений, определенных международными и федеральными законами по видам использования акватории, интенсивности деятельности, характеру воздействия на природную морскую среду;
- выработка приоритетов в видах использования акватории исходя из принципа предосторожности и минимизации негативного воздействия на природную морскую среду;
- установление границ функциональных зон с учетом требований охраны окружающей морской среды и выбранных приоритетов по видам использования;
- выделение природно-ресурсных сочетаний по территории и акватории агломерации.

Функциональное зонирование выполнено в масштабе 1 : 100 000 на основе комплексного анализа современного использования территории и акватории ВА, программных отраслевых документов, определяющих основные направления развития различных видов прибрежно-морской деятельности, оценки экологического состояния и проблемных ситуаций, возникающих при наложении нескольких видов природопользования на различных участках суши и морской акватории (рис. 2).

Помимо выделенных функциональных зон на созданной карте присутствуют дополнительные актуальные пространственные данные, связанные

с природопользованием: полезные ископаемые, лицензионные участки марикультуры, зона санитарной охраны, морские пристани, перспективные для рекреации пляжи, туристические базы и пр.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для целей устойчивого развития и управления территориями ВА на основе проведенного *картографирования функциональных зон на суше* были рассчитаны площади различного целевого назначения в разрезе существующего административного деления Приморского края (табл. 2).

Предложенная структура *функционального зонирования сухопутной части* ВА (составляет 7613,84 км²), из которой 4,65% представляют собой селитебные территории, преимущественно занятые застройкой городов Владивосток и Артем, а также населенными пунктами Славянка, Большой Камень, Шкотово, Штыково и др. Данные территории имеют сложившиеся территориально-хозяйственные сочетания и рассматриваются как стержневые элементы формирования различных зон развития агломерации.

Наибольшую площадь ВА занимают зоны функционального назначения «изъятие» – 51,2% площади. Основная часть таких земель приходится на федеральные заповедники – Национальный парк «Земля леопарда» и Уссурийский государственный природный заповедник [Берсенева, 2017]. Национальный парк «Земля леопарда» (занимает полностью западную часть агломерации), Уссурийский государственный природный заповедник (занимает северо-восточную часть агломерации). Хозяйственная деятельность для данной зоны регламентируется Федеральным законом «Об особо охраняемых природных территориях». Также в зону изъятия входят памятники природы, общая площадь которых составляет 0,6% от площади агломерации.

В качестве разрешенных видов деятельности здесь необходимо упомянуть возможность развития научно-познавательного туризма, которая активно реализуется в Национальном парке «Земля леопарда». Данные ООПТ являются центрами сохранения популяции амурского тигра и дальневосточного леопарда. Этот факт определяет мировую специфику наличия зон с уникальными биогеоценозами и перспективными зонами интенсивного хозяйственного развития в рамках единой агломерации.

Земли санитарной охраны также имеют целевое назначение «изъятие» с общей площадью 1186,27 км². Земли санитарной охраны включают в себя водосборные бассейны водохранилищ Седанкинского и Богатинского, бассейн реки Шкотовка, значительную часть бассейна реки Артемовка.

Также зона санитарной охраны установлена вдоль северной границы Национального парка «Земля леопарда». Зона санитарной охраны имеет особые

условия использования с установленным специальным режимом хозяйственной деятельности, санитарного надзора, контроля за качеством воды.

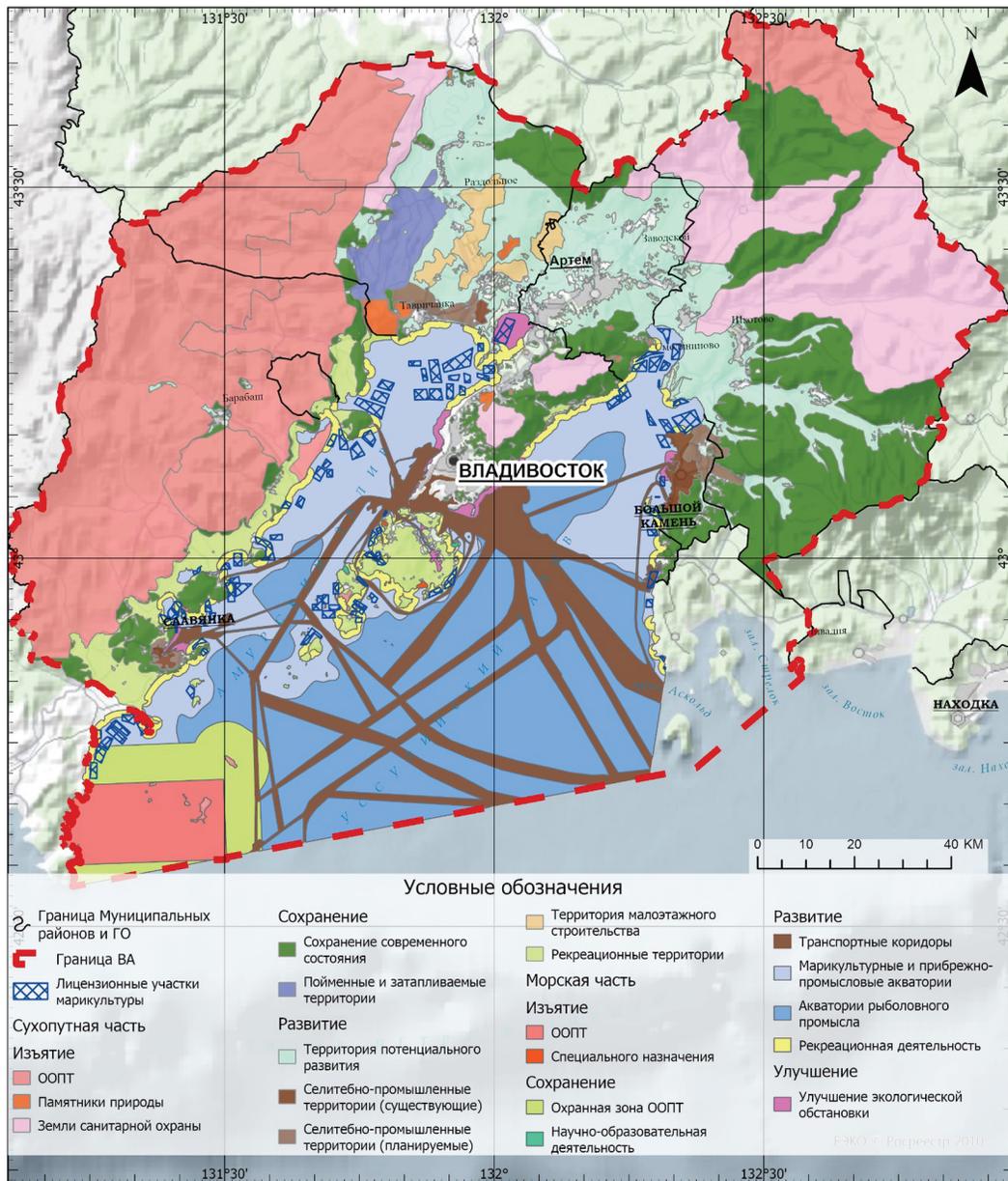


Рис. 2. Генерализованная схема функционального зонирования ВА

Fig. 2. Generalized scheme of functional zoning of the VA

Земли функционального назначения «сохранение» занимают площадь 1710,66 км². Они разделены на две части – зона сохранения современного состояния и пойменные и затопляемые территории. Зона сохранения современного состояния локализуется в восточной и северной частях агломерации, в центральной и северной частях полуострова Муравьева-Амурского, а также мозаично вдоль западного побережья Амурского залива. В северо-восточной части она граничит с зонами санитарной охраны.

Данные земли характеризуются распространением природных комплексов низко- и среднегорных крутых склонов и водоразделов с преобладанием полидоминантных широколиственных, мелколиственных и хвойно-широколиственных лесов. Сохранение данных природных комплексов обеспечит реализацию естественных средоформирующих функций на территории агломерации, воспроизводство природных ресурсов и сохранение природного разнообразия. Это формирует комфортную соци-

альную среду и минимизирует возникновение опасных природных процессов (например, наводнений, оползней, эрозионных процессов и др.). Реализация хозяйственной деятельности на землях целевого назначения «сохранения современного состояния» должна осуществляться таким образом, чтобы не нарушать естественное функционирование компо-

нентов природных комплексов. Наиболее предпочтительным является развитие рекреационной деятельности – охота и собирательство, организация экологических троп, локальных баз отдыха. В дальнейшем данную зону возможно рассматривать и как резервные земли для последующего развития агломерации.

Таблица 2

Зоны функционального назначения административных районов ВА

Район / Площадь, км ²	Зона	Хозяйственное назначение	Площадь, км ²	Всего	От сухо- путной части ВА, %	От рай- она, %
Артемовский ГО / 516,6	Изъятие	Земли санитарной охраны	21,4	24,7	0,3	4,8
		Памятники природы	3,3			
	Развитие	Селитебные территории	91,0	403,2	5,3	78,1
		Территория малоэтажного строительства	12,6			
		Территория потенциального развития	299,6			
Сохранение	Сохранение современного состояния	88,7	88,7	1,2	17,2	
Владивосток- ский ГО / 559,2	Изъятие	Земли санитарной охраны	84,2	149,5	2,0	26,7
		ООПТ	59,9			
		Памятники природы	5,4			
	Развитие	Научно-образовательные и рекреацион- ные территории	95,7	281,5	3,7	50,3
		Рекреационные территории	28,5			
		Селитебные территории	149,3			
		Территория потенциального развития	7,9			
Сохранение	Сохранение современного состояния	128,2	128,2	1,7	22,9	
ГО Большой Камень / 118,7	Развитие	Селитебно-промышленные территории (план.)	20,5	68,5	0,9	57,7
		Селитебно-промышленные территории (сущ.)	32,8			
		Селитебные территории	6,6			
		Территория потенциального развития	8,6			
	Сохранение	Сохранение современного состояния	50,2	50,2	0,7	42,3
Надеждин- ский район / 1606,9	Изъятие	Земли санитарной охраны	88,2	741,2	9,7	46,1
		ООПТ	617,1			
		Памятники природы	36,0			
	Развитие	Селитебно-промышленные территории (план.)	33,2	614,3	8,1	38,2
		Селитебно-промышленные территории (сущ.)	6,0			
		Селитебные территории	42,2			
		Территория малоэтажного строительства	93,2			
		Территория потенциального развития	439,7			
	Сохранение	Пойменные и затапливаемые территории	132,0	251,4	3,3	15,6
Сохранение современного состояния		119,3				

Район / Площадь, км ²	Зона	Хозяйственное назначение	Площадь, км ²	Всего	От сухо- путной части ВА, %	От рай- она, %
Хасанский район / 2158,1	Изъятие	ООПТ	1745,2	1747,7	23,0	81,0
		Памятники природы	2,6			
	Развитие	Рекреационные территории	216,1	255,1	3,4	11,8
		Селитебно-промышленные территории (план.)	6,0			
		Селитебно-промышленные территории (сущ.)	7,9			
		Селитебные территории	17,7			
		Территория потенциального развития	7,5			
	Сохранение	Пойменные и затопляемые территории	5,1	155,2	2,0	7,2
Сохранение современного состояния		150,1				
Шкотовский район / 2654,5	Изъятие	Земли санитарной охраны	992,6	1238,4	16,3	46,7
		ООПТ	245,8			
	Развитие	Селитебно-промышленные территории (план.)	10,3	379,1	5,0	14,3
		Селитебные территории	47,5			
		Территория потенциального развития	321,3			
	Сохранение	Сохранение современного состояния	1037,0	1037,0	13,6	39,1
Всего			7613,84		100	100

Земли с пойменными и затопляемыми территориями располагаются в нижнем течении реки Раздольная. Они с вероятностью один раз в 1–2 года в период летней муссонной циркуляции и прохождения тайфунов подвергаются затоплению. Выполнение на данной территории какой-либо хозяйственной деятельности связано с высокой степенью рисков. Потенциально здесь возможно проведение гидротехнических мероприятий для минимизации или полного предотвращения затопления, однако необходимо проведение комплексных работ по оценке их эколого-экономической эффективности.

Под обобщенную функциональную цель «развитие» в пределах ВА выделяется территория площадью 1647,46 км². Необходимо отметить, что потенциальная зона развития агломерации по отношению к существующей селитебной и селитебно-промышленной территории более чем в 4 раза больше. Подавляющая часть зоны с функциональной целью «развитие» приходится на территории потенциального развития – 1084,65 км². По пространственному положению она опоясывает с севера город Артем, представлена вдоль долины реки Раздольная, на востоке протягивается вдоль побережья Уссурийского залива до города Большой Камень и проникает по долинам рек в восточном направлении. В при-

родном отношении здесь преобладают низкогорные, субгоризонтальные и равнинные прибрежные комплексы с сильно нарушенной антропогенной деятельностью растительностью. Именно данную территорию, на наш взгляд, необходимо рассматривать как первоочередную для реализации мероприятий по развитию агломерации – жилищного, инфраструктурного, примышленного строительства.

На данном этапе необходимо констатировать целесообразность выделения наряду с существующими селитебно-промышленными территориями в г. Большом Камне территории опережающего развития (ТОР) «Надежденская» и потенциальной территории у п. г. т. Славянки для развития промышленных предприятий на площади 70 км² с соответствующей специализацией и формированием производственных кластеров. Севернее г. Артема, п. г. т. Вольно-Надежденска и в районе пос. Кипарисово в настоящее время значительные площади используются для ведения садоводства. При этом увеличиваются территории, которые представляют собой участки с возведенными индивидуальными жилыми домами для постоянного проживания. С вводом в эксплуатацию моста на полуостров Де-Фриз значительно улучшилось транспортное сообщение между Владивостоком

и данными районами. Активно осуществляется строительство новых малоэтажных жилых районов. В перспективе здесь должна быть сформирована территория малоэтажного строительства на площади более чем 100 км².

Ключевое функциональное назначение полосы западного побережья Амурского залива, островов Рикорда и Рейнеке – развитие рекреационной деятельности, на островах Русский и Попова – научно-образовательной и рекреационной.

В результате расчетов можно увидеть, что самые значимые территории для потенциального развития локализованы в трех муниципальных образованиях, а именно в Артемовском ГО, Надеждинском и Шкотовском районах. Это соответствует утвержденным планам территориального развития ВА, где в На-

деждинском районе размещены территории опережающего развития и дополнительная жилая застройка в виде города – спутника Владивостока на 93 тыс. жителей [Схема..., 2011]. При этом Хасанский район имеет огромную функциональную зону изъятия, что ограничивает здесь развитие крупных инфраструктурных проектов за исключением их рекреационной направленности.

На основе ландшафтных и геоэкологических исследований *морские акватории* агломерации также соотнесены с типами целей использования (изъятие, сохранение, развитие, улучшение), определенных с учетом приоритетности существующих и планируемых видов прибрежно-морского природопользования. Площади акваторий, отнесенных к каждой из целей использования, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Площади прибрежных акваторий агломерации, сгруппированных по типам целей использования

Тип цели (зона)	Хозяйственное название (назначение)	Площадь, км ²	Всего
Изъятие	ООПТ	275,16	276,9
	Специального назначения	1,74	
Сохранение	Охранная зона ООПТ	263,86	265,22
	Научно-образовательная деятельность	1,37	
Развитие	Транспортные коридоры	863,82	3936,24
	Марикультурные и прибрежно-промысловые акватории	1168,02	
	Акватории рыболовного промысла	1638,10	
	Рекреационная деятельность	266,31	
Улучшение	Улучшение экологической обстановки	57,02	57,02
Всего		4535,41	

В группу акваторий, ориентированных на достижение цели «изъятие», отнесены акватории ООПТ, ориентированные на сохранение биоразнообразия на видовом и экосистемном уровнях, сохранение уникальных ландшафтов и местообитаний, ценных в экологическом, научном, культурном и эстетическом отношениях. Заповедные морские акватории (Дальневосточный морской заповедник под управлением ФГБУ «Земля леопарда») составляют основу экологического каркаса морехозяйственного района агломерации. Изменение его целевого назначения не только нежелательно, но и практически невозможно с точки зрения действующего законодательства. Акватории заказников и памятников природы также являются элементами экологического каркаса, но их нельзя считать полностью выведенными из хозяйственного оборота, поскольку режим охраны устанавливается здесь положением об охранной зоне конкретного заказника или памятника природы. Общая площадь акваторий ООПТ, от-

несенных к типу цели «изъятие», составила 6,07% общей площади прибрежной акватории ВА. Этот показатель более чем в два раза превышает среднероссийский, где под охраной находится лишь 3% российских акваторий [О состоянии..., 2023]. Суммарная площадь акваторий с целевым назначением «изъятие» составляет 6,11% от всей акваторий ВА.

Целевая группа «сохранение» предназначена для улучшения естественных средоформирующих ландшафтных функций акватории, воспроизводства ее природных ресурсов, сохранения природного разнообразия и уникальных ландшафтов. К этой категории отнесены морские участки, примыкающие к границам ООПТ, где ограничиваются наиболее опасные для природы виды хозяйственной деятельности. Их площадь составляет 5,82% акватории агломерации.

На морские участки, обеспечивающие деятельность научных и научно-образовательных учреждений (Владивостокского океанариума (НЦМБ),

районы морских экспериментальных и научно-производственных станций институтов ДВО РАН и ТИНРО) проходится 0,03% от общей площади акватории агломерации. Суммарная площадь акваторий с целевым назначением «сохранение» составляет 5,85% от всей акватории ВА.

В участки для достижения цели «развитие» входят транспортный каркас и морские коридоры с назначением устойчивого развития хозяйственной деятельности.

Планировочный каркас акватории определяется основными судоходными путями и во многом постоянен в пространстве. Зоны судоходства федерального и международного значения – приоритетные зоны, являющиеся ограничением для всех остальных видов морской деятельности. Они обеспечивают развитие транспортной хозяйственной деятельности в пределах агломерации. Портовые хозяйства ВА представляют собой комплекс, осуществляющий экспортные и импортные операции, внутренние морские транспортировки, что имеет важное значение для экономики края и Российской Федерации в целом. На транспортный каркас и морские коридоры приходится 19,05% акватории Владивостокской агломерации.

Марикультурные и прибрежно-промысловые акватории (25,75% общей площади акватории ВА) включают районы современного и потенциального развития марикультурных хозяйств и прибрежного промысла морских беспозвоночных. Все морские акватории ВА находятся в благоприятных климатических условиях для культивирования и воспроизводства наиболее дорогостоящих на внутреннем и внешнем рынке промысловых гидробионтов: двусторчатых моллюсков (гребешок, мидия, устрица, анадара, спизула), иглокожих (морской еж и голотурия), ракообразных (промысловый краб, крабиды, шримсы, чилим, рак-богомол) и макрофитов. В данном исследовании предлагается установить границу прибрежно-морского природопользования по глубине (30 м), которая рассматривается нами как фактор, ограничивающий хозяйственную деятельность человека в море [Сорокин, 2021].

Акватории рыболовного промысла (приходится 36,12% морского пространства агломерации) включают все районы, где ведется или потенциально возможен промышленный лов рыбы. Акватория ВА отличается не только видовым разнообразием, но и существенными запасами рыбных ресурсов. Многолетние наблюдения за составом уловов рыб по данным комплексных донных съемок показали, что в районах интенсивного рыболовства происходят изменения в соотношении различных видов и групп донных рыб. Как в прошлом, так и в настоящее время значительное влияние на состояние запасов и

соотношение видов в ЗПВ оказывает не промысел, поскольку промысловый пресс в заливе значительно ниже рекомендованного, а в большей степени климато-океанологические и экологические условия воспроизводства и трофические отношения.

Для ведения и развития рекреационной деятельности предназначены акватории (5,87% акватории ВА), примыкающие к геоморфологическим типам берегов, в максимальной степени дополняющих прибрежные рекреационные ресурсы. Поскольку рекреационная деятельность, как правило, совместима с марикультурой и промыслом беспозвоночных, частичное пространственное наложение этих зон не влечет возникновение конфликтных ситуаций между природопользователями.

К участкам на реализацию цели «улучшение» (1,26% от общей акватории) отнесены природные комплексы, характеризующиеся значительной антропогенной нарушенностью. Сюда входят залив Угловой, кутовая часть бухты Новик, прибрежные акватории, примыкающие к Владивостоку в Амурском и Уссурийском заливах и Большому Камню. Для этих акваторий рекомендуется временный отказ от интенсивного использования и выполнение работ по улучшению экологической ситуации с последующим переводом в целевую группу «развитие».

ВЫВОДЫ

Результатом проведенных работ стал стратегический план использования территорий и акваторий ВА в виде функционального зонирования суши и прибрежной морской зоны. Предложенный вариант функционального зонирования может быть использован при формировании научно-методической базы комплексного пространственного планирования территорий и акваторий ВА. Таким образом, прибрежную зону целесообразно рассматривать как объект управления, для которого обосновано установление сухопутной границы по низовым административным рубежам. Важно учитывать, что море представляет собой конечный бассейн, аккумулирующий загрязняющие вещества и взвеси, поступающие с суши. При этом принципы выделения акваторий агломерации должны соответствовать существующему российскому и международному законодательству.

Установление функциональных зон ВА является первоочередной задачей в КУПЗ, т. к. необходимо своевременно зарезервировать некоторые значимые территории / акватории до вовлечения их в хозяйственный оборот, что, в свою очередь, может вызвать их коренное преобразование и утерю важных экосистемных услуг.

Береговая зона ВА чрезвычайно удобна для создания крупного транспортного узла, здесь имеются

достаточно обширные территории для капитального строительства и одна из самых разнообразных акваторий Японского моря. Сочетание равнинного и горного рельефов прибрежных территорий делает возможным сохранение дикой природы в непосредственной близости от интенсивно урбанизированной территории, а обилие солнца и тепла, морская вода, обширные пляжи, целебные грязи, экзотические животные и растения создают благоприятные условия для развития здесь комплексной рекреации.

Рекомендации. Проведенный анализ показал необходимость проведения следующих мероприятий и предложений по использованию пространства ВА с учетом устойчивого природопользования и МПП.

1. На этапе формирования ВА следует обеспечить законодательное оформление понятия «агломерация» и определить / утвердить ее границы. С этой целью, необходима разработка и утверждение Федерального закона «Об агломерациях в Российской Федерации», и внесение соответствующих изменений в закон о местном самоуправлении, в также в Федеральные законы «О территориях опережающего развития» и «О свободном порте Владивосток».

2. Провести стыковки документов СТП и МПП, а также внесение изменений и дополнений в правовые акты с учетом специфики прибрежно-морской зоны. Однако для этого требуется значительная работа по совершенствованию действующей правовой базы. Потребуется сформировать управляющий орган данным акваториальным образованием с включением в него действующих глав муниципалитетов, входящих в состав агломерации на данном этапе. Необходима отработка механизма формирования бюджета, налоговых поступлений и прочих административных решений.

3. Организация в прибрежных поселках (Славянка, Безверхово, Девятый Вал, Мысовой, Подъяпольское и др.) комплексных хозяйств, включающих рыбное, рыборазводное хозяйства, марикультуру и рекреационную деятельность с целью рациональ-

ного использования биологических ресурсов акваторий Амурского и Уссурийского заливов. Такой подход не только существенно повысит продуктивность прибрежных акваторий, но и позволит улучшить экологическую ситуацию в регионе.

4. Организовать мониторинг общего природопользования, прежде всего прибрежно-морского, и развития территорий в пределах ВА.

5. В рамках выделенных акваторий с функциональным зонированием «улучшение» (57,02 км²), локализованных в различных частях ЗПВ (побережье населенных пунктов Владивосток, Большой Камень, Славянка, кутовая часть бухты Новик и залив Угольный), незамедлительно произвести мероприятия по очистке морских вод с одновременным снижением интенсивности хозяйственного использования данных акваторий.

6. Согласно проведенному исследованию, прибрежная полоса вдоль Хасанского района должна быть наименее затронута строительством со стороны крупных инфраструктурных промышленных объектов и сохранена в счет резервирования уникального на Дальнем Востоке природного потенциала с экологически приемлемым освоением рекреационных ресурсов.

7. Целесообразно проведение дальнейшей детализации подобного зонирования на более крупных масштабных уровнях на базе собранного и обработанного материала.

Будущее развитие экономики в прибрежной зоне ВА, по нашему мнению, необходимо осуществлять в направлении устойчивого природопользования с щадящим по отношению к береговым экосистемам режимом хозяйствования. Это экономически и экологически оправдано, т. к. позволит вести хозяйствование на долгосрочной перспективе с сохранением гео- и экосистем, снизить социальную напряженность в связи с обеспечением населения дополнительными рабочими местами и повысить привлекательность региона, способствуя развитию внутреннего и внешнего туризма.

Благодарность. Работы выполнены в рамках темы госзадания № 122020900188-3 «Пространственные структуры природопользования Тихоокеанской России, в том числе аква-территориальные и трансграничные стадии их формирования и варианты развития с реализацией моделей устойчивого природопользования в Северо-Восточной Азии».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдеев Ю.А. Владивостокская агломерация: проблемы и варианты ее развития // Тихоокеанская география. 2021. № 1. С. 21–30.
- Аникеев В.В. Территориальное развитие города Владивостокской агломерации // Тихоокеанская география. 2023. № 2. С. 23–36. DOI: 10.35735/26870509_2023_14_2.
- Арзамасцев И.С., Бакланов П.Я., Говорушко С.М. и др. Прибрежно-морское природопользование: теория, индикаторы, региональные особенности. Владивосток: Дальнаука, 2010. 308 с.
- Бакланов П.Я., Авдеев Ю.А., Романов М.Т. Новый этап в развитии г. Владивостока и его агломерации // Вест-

- ник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2017. Т. 9. № 3(38). С. 27–46. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2017-3/27-46.
- Бакланов П.Я., Ермошин В.В., Каракин В.П. и др. Прибрежно-морское природопользование в Тихоокеанской России и Северном Вьетнаме: понятия, структурные особенности и типы // География и природные ресурсы. 2017 № 4. С. 29–37.
- Берснев Ю.И. Особо охраняемые природные территории Приморского края: существующие и проектируемые / под ред. А.Н. Качур. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2017. 202 с.
- Блиновская Я.Ю., Жариков В.В., Егидарев Е.Г. Требования к информационным ресурсам при формировании системы морского пространственного планирования // Геосистемы Северо-Восточной Азии: природа, население, хозяйство территорий. Владивосток, ТИГ ДВО РАН. 2021. С. 223–227.
- Верецагина А.В., Гусева А.С. Территориальное зонирование во Владивостокской агломерации: некоторые вопросы // Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2017. Т. 9. № 3. С. 57–70.
- Грицута А.С., Телегина В.А. Транспортно-логистическая составляющая свободного порта Владивосток // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2017. Т. 1. С. 168–175.
- Ембулаев В.Н., Заусаев В.К. Инновационное развитие Владивостокского транспортного узла как основа повышения предпринимательской активности в регионе // Экономика и предпринимательство. 2013. № 1(30). С. 268–270.
- Каракин В.П. Районирование береговой зоны Тихоокеанской России по природным условиям хозяйственного освоения // Геосистемы в Северо-восточной Азии. Типы, современное состояние и перспективы развития. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2018. С. 601–608.
- Кияшко Г.А., Лебедева А.А. Комплексная оценка рекреационных ресурсов владивостокской агломерации на основе геоинформационных систем // Актуальные проблемы природообустройства, кадастра и землепользования: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию факультета землеустройства и кадастров ВГАУ. 2016. Т. 1. С. 127–131.
- Кравцова В.И. Космические методы картографирования / под ред. Ю.Ф. Книжникова. М.: Изд-во МГУ, 1995. 240 с.
- Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Изд-во ин-та географии СО РАН, 2001. 163 с.
- Костина Е.Ю., Орлова Н.А., Панфилова А.О. Факторы и риски социально-экономической капитализации приморского портового города (на примере г. Владивостока) // Социология – городу и региону: материалы Межрегиональной научно-практической конференции. 2018. С. 41–47.
- Ландшафтное планирование: принципы, методы, европейский и российский опыт. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2002. 141 с.
- Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: учебник. М.: КДУ, 2008. 424 с.
- Луценко Я.В. Обзор отрасли геоинформационных систем (ГИС): сферы применения, тенденции развития // Технические науки в системе профессионального образования: проблемы и перспективы: материалы V Всероссийской научно-практической конференции. Волгоград: ВГУ, 2023. С. 10–13.
- Майоров И.С., Преловский В.И., Дюкарев В.Н. и др. К проблеме эколого-экономической оценки земельного фонда прибрежных территорий залива Петра Великого // Вестник ТГЭУ. 2009. № 3. С. 66–76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme-ekologo-ekonomicheskoy-otsenki-zemel'nogo-fonda-pribrezhnyh-territoriy-zaliva-petra-velikogo> (дата обращения 01.09.2024).
- Мошков А.В. Важнейшие центры морехозяйственной активности тихоокеанской России (владивостокская агломерация) // Геосистемы Северо-Восточной Азии: природные, природно-ресурсные, социальные и хозяйственные структуры территорий. Владивосток, 2020. С. 196–205.
- Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. и др. Современное загрязнение донных отложений и экологическое состояние макрозообентоса в прибрежной зоне Владивостока (залив Петра Великого Японского моря) // Известия ТИНРО. 2019. Т. 196. С. 155–181.
- Музыченко Т.К. Пространственная структура землепользования в административных границах водосбора залива Петра Великого // Геосистемы Северо-Восточной Азии: природные и социально-экономические факторы и структуры. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2024. С. 469–474. DOI: 10.35735/9785604968338_469.
- О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023. 686 с.
- Преловский В.И., Виговская В.Н. Познавательный туризм во Владивостоке и его пригороде: ресурсы, проблемы и приоритеты развития // Тихоокеанская география. 2022. № 2(10). С. 60–73.
- Сорокин П.С. Бухта муравьиная: возможности организации познавательного туризма на территории рекреационно-туристского комплекса владивостокской агломерации // Колпинские чтения по краеведению и туризму. Межрегиональная научно-практическая конференция с международным участием. СПб., 2020. Т. 2. С. 300–304.
- Сорокин П.С. Морская граница в прибрежно-морском природопользовании и вариант ее выделения по глубине // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2021. № 1. С. 66–74.
- Сорокин П.С. К вопросу оценки пространственного сочетания природопользователей в прибрежно-морской зоне // Геосистемы Северо-Восточной Азии: природные, природно-ресурсные и социально-экономические структуры: сб. науч. статей. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2023. С. 164–170. DOI: 10.35735/9785604844175_164.
- Схема территориального планирования Надеждинского муниципального района Приморского края. Схема границ зон с особыми условиями использования территории / ООО «Инжиниринг Консалтинг Компани». Владивосток, 2011.
- Тикунов В.С. Моделирование в картографии. М.: Изд-во МГУ, 1997. 405 с.
- Фисенко А.И., Юрченко Е.Ю. Территориальный SWOT-анализ перспектив развития морского порта как основы

- морского портового транспортно-логистического кластера // Трансграничная экономика. 2019. № 3(3). С. 10.
- Хорошев А.В., Авессаломова И.А., Дьяконов К.Н. Теория и методология ландшафтного планирования. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2019. 444 с.
- Чалова Е.Р., Чалов Р.С. Бассейновый подход к комплексному картографированию // Веста. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1999. № 1. С. 82–84.
- Hansen M.C., Potapov P.V., Pickens A.H. et al. Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data, 2022, DOI: 10.1088/1748-9326/ac46ec.
- Tachikawa T., Hato M., Kaku M. et al. The characteristics of ASTER GDEM, 2011, Version 2, IGARSS, July 2011.
- Электронные ресурсы*
- Закон Приморского края № 245-КЗ «Об особо охраняемых природных территориях Приморского края» от 11 мая 2005 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/494212628> (дата обращения 10.07.2023).
- Майоров И.С. Природопользование в береговой зоне залива Петра Великого (история, перспективы и уроки экологических просчетов) // Россия и АТР. 2007. № 1. С. 44–55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prirodopolzovanie-v-beregovoy-zone-zaliva-petravelikogo-istoriya-perspektivy-i-uroki-ekologicheskikh-proschetov> (дата обращения 01.09.2024).
- Москальчук С.С., Ворожбит О.Ю. Оценка конкурентоспособности в системе управления рыбохозяйственной организацией (на примере Приморского края) // Известия ТИНРО. 2009. № 156. С. 357–369. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-konkurentosposobnosti-v-sisteme-upravleniya-rybohozyaystvennoy-organizatsiy-na-primere-primorskogo-kraja> (дата обращения 01.09.2024).
- Погорелов А.Р., Вовженяк И.С., Коровин К.М. Ландшафтная ситуация в природоохранной зоне Владивостокской агломерации // Социально-экологические технологии. 2018. № 1. С. 65–78. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/landshaftnaya-situatsiya-v-prirodoohrannoy-zone-vladivostokskoy-aglomeratsii> (дата обращения 01.09.2024).
- Розломий Н.Г. Объекты рекреации в преддверии АТЭС-2012 (Приморский край) // Вестник КрасГАУ. 2012. № 7. С. 83–86. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obekty-rekreatsii-v-preddverii-ates-2012-primorskiy-kraju> (дата обращения 10.07.2023).
- Рукавицына М.Н. Состояние и перспективы развития инновационной деятельности в Приморском крае // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. URL: <https://сайт/article/3702/> (дата обращения 10.07.2023).
- Схема территориального планирования Приморского края // Постановление администрации Приморского края от 30 ноября 2009 г. № 323-па. URL: <https://docs.cntd.ru/document/494219419> (дата обращения 10.07.2023).
- Схема территориального планирования Приморского края // Постановление администрации Приморского края от 03 апреля 2017 г. № 105-па «О внесении изменений в постановление Администрации Приморского края от 30 ноября 2009 г. № 323-па “Об утверждении схемы территориального планирования Приморского края”». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/2500201704040001> (дата обращения 10.07.2023).
- Федеральный закон № 33-ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.1995. URL: <http://base.garant.ru/10107990> (дата обращения 10.07.2023).
- Topographic maps VMAP 0*. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) Database, 2000, URL: https://www.mapability.com/info/vmap0_download.php (дата обращения 01.09.2024).
- Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A. et al. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90 m, Database, 2008, URL: <http://srtm.csi.cgiar.org> (дата обращения 01.09.2024).
- Lehner B., Verdin K., Jarvis A. HydroSHEDS Technical Documentation, Washington, World Wildlife Fund US, DC, 2006, 27 p. URL: <http://hydrosheds.cr.usgs.gov> (дата обращения 01.09.2024).
- OpenStreetMap, 2024, URL: <https://www.openstreetmap.org/copyright> (дата обращения 01.09.2024).

Поступила в редакцию 08.10.2024

После доработки 10.11.2024

Принята к публикации 26.11.2024

ECOLOGICAL AND LANDSCAPE ZONING OF THE COASTAL ZONE OF THE VLADIVOSTOK AGGLOMERATION

E.G. Egidarev

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Physical Oceanography; Sakhalin State University, Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: egidarev@yandex.ru

The paper examines the experience of functional zones identifying and mapping for developing sustainable natural resource management programs for the Vladivostok agglomeration (VA), with due account of the adjacent water area.

The author suggests specific boundaries for the VA (12 149,2 km²), which consider the interconnection between land and marine spatial components within the existing nature management model.

A series of maps has been created to study landscape dynamics and to develop recommendations for sustainable resource management, including marine spatial planning (MSP) and ensuring environmental security

within the integrated management of coastal areas (ИМКА). As a result, geoinformation layers were obtained, reflecting the current structure of nature management in the VA. Based on spatial analysis, a functional zoning scheme was proposed, showing zones for further development of terrestrial (1647,4 km²) and aquatic (3936,2 km²) areas, as well as conservation (1975,8 km²) and withdrawal (4178,3 km²) zones capable of ensuring the environmental safety of the VA. It was found that the Khasansky district within the VA includes only 11,8% of areas allocated for residential and industrial development, while 81% of the area has a specially protected natural status, allowing not only to preserve the unique natural potential but also to ensure the rational development of recreational resources.

Keywords: Marine Spatial Planning, coastal zone, mapping and spatial analysis, Integrated Coastal Zone Management, sustainable development, territorial planning

Acknowledgements. The work was carried out under the state budget task no. 122020900188-3 “Spatial structures of nature management in Pacific Russia, including aquatic-territorial and transboundary ones, stages of their formation, and development options with the implementation of sustainable natural resource use models in Northeast Asia”.

REFERENCES

- Anikeev V.V. Territorial'noe razvitiye goroda Vladivostok i ego aglomeratsii [Territorial development of the city of Vladivostok and its agglomeration], *Pacific geography*, 2023, no. 2, p. 23–36, DOI: 10.35735/26870509_2023_14_2. (In Russian)
- Arzamastsev I.S., Baklanov P.Ya., Govorushko S.M. et al. *Pribrezhno-morskoe prirodopol'zovanie: teoriya, indikatory', regional'ny'e osobennosti* [Coastal and marine nature management: theory, indicators, regional peculiarities], P.Ya. Baklanov (ed), Vladivostok, Dalnauka, 2010, 308 p. (In Russian)
- Avdeev Yu.A. Vladivostokskaya aglomeratsiya: problemy' i varianty' ee razvitiya [Vladivostok agglomeration: problems and options for its development], *Pacific geography*, 2021, no. 1, p. 21–30. (In Russian)
- Baklanov P.Y., Ermoshin V.V., Karakin V.P. et al. Coastal-marine nature management in Pacific Russia and Northern Vietnam: Notions, structural features, and types, *Geography and Natural Resources*, 2017, no. 4, p. 333–340.
- Baklanov P.Ya., Avdeev Yu.A., Romanov M.T. Novy'i' e'tap v razvitiy g. Vladivostoka i ego aglomeratsii [A new phase in development of Vladivostok City and its agglomeration, The Territory of New Opportunities], *The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*, 2017, vol. 9, no. 3(38), p. 27–46, DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2017-3/27-46. (In Russian)
- Bersenev Yu.I. *Osobo okhraniyaemy'e prirodny'e territorii Primorskogo kraia: sushchestvuyushchie i proektiruyemy'e* [Specially protected natural areas of Primorsky Krai: existing and planned], A.N. Kachur (ed.), Vladivostok, Publishing house of the Far Eastern Federal University, 2017, 202 p. (In Russian)
- Blinovskaya Ya.Yu., Zharikov V.V., Egidarev E.G. [Requirements for information resources in the formation of a marine spatial planning system], *Geosistemy' Severo-Vostochnoi' Azii: priroda, naselenie, hoziay'stvo territorii'* [Geosystems of North-Eastern Asia: nature, population, economy of territories], 2021, p. 223–227. (In Russian)
- Chalova E.R., Chalov R.S. Bassei'novy'i' podhod k kompleksnomu kartografirovaniyu [Basin approach to complex mapping], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 1999, no. 1, p. 82–84. (In Russian)
- Embulaev V.N., Zausaev V.K. Innovatsionnoe razvitiye Vladivostokskogo transportnogo uzla kak osnova pov'ysheniya predprinimatel'skoi' aktivnosti v regione [Innovating development of Vladivostok transportation as the basis of improving entrepreneurial activity in the region], *Economy and entrepreneurship*, 2013, no. 1(30), p. 268–270. (In Russian)
- Fisenko A.I., Yurchenko E.Yu. Territorial'ny'i' SWOT-analiz perspektiv razvitiya morskogo porta kak osnovy' morskogo portovogo transportno-logisticheskogo klastera [Territorial SWOT analysis of the development prospects of the seaport as the basis of the seaport transport and logistics cluster], *Trans-border economy*, 2019, no. 3(3), p. 10. (In Russian)
- Gritsuta A.S., Telegina V.A. [Transport and logistics aspect of the free port of Vladivostok] *Nauchnoe, tehicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo Aziatsko-Tihookeanskikh stran v 21 veke* [Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the 21st century], 2017, vol. 1, p. 168–175. (In Russian)
- Hansen M.C., Potapov P.V., Pickens A.H. et al. Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data, 2022, DOI: 10.1088/1748-9326/ac46ec.
- Karakin V.P. [Zoning of the coastal zone of Pacific Russia by natural conditions of economic mastering], *Geosistemy' v Severo-vostochnoi' Azii. Tipy', sovremennoe sostoyanie i perspektivy' razvitiya*, [Geosystems in North-Eastern Asia. Types, current state and development prospects], 2018, p. 601–608. (In Russian)
- Khoroshev A.V., Abessalomova I.A., Dyakonov K.N. *Teoriya i metodologiya landshaftnogo planirovaniya* [Theory and methodology of landscape planning], Moscow Partnership of Scientific Publications KMK, 2019, 444 p. (In Russian)
- Kiyashko G.A., Lebedeva A.A. [Comprehensive assessment of recreational resources of the Vladivostok agglomeration based on geographic information systems], *Aktual'ny'e problemy' prirodobustroi'stva, kadastra i zemlepol'zovaniya* [Actual problems of environmental management, cadastre and land use. Proc. of the international scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of the faculty of land management and cadastres of VGAU], 2016, vol. 1, p. 127–131. (In Russian)
- Korytny L.M. *Bassei'novaya kontseptsiya v prirodopol'zovanii* [Basin concept in nature management], Irkutsk, Publishing house of the Institute of Geography SB RAS, 2001, 163 p. (In Russian)

- Kostina E.Yu., Orlova N.A., Panfilova A.O. [Factors and risks of socio-economic capitalization of a seaside port city (on the example of Vladivostok)], *Sotsiologiya – gorodu i regionu* [Sociology – to the city and region. Proc. of the interregional scientific and practical conference], 2018, p. 41–47. (In Russian)
- Kravtsova V.I. *Kosmicheskie metody' kartografirovaniia* [Space methods of mapping], Yu.F. Knizhnikov (ed.), Moscow State University Publishing House, 1995, 240 p. (In Russian)
- Landshaftnoe planirovanie: printsiipy', metody', evropeiskii i rossiskii' opyt'* [Landscape planning: principles, methods, European and Russian experience], A.P. Antipov, L.V. Drozdov et al., Irkutsk, Publishing house of the Institute of Geography SB RAS, 2002, 141 p. (In Russian)
- Lurye I.K. *Geoinformatcionnoe kartografirovanie. Metody' geoinformatiki i tsifrovoy' obrabotki kosmicheskikh snimkov* [Geoinformation mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of space images], Moscow, KDU Publ., 2008, 424 p. (In Russian)
- Lutsenko Ya.V. [Review of the geographic information systems (GIS) industry: areas of application, development trends], *Tekhnicheskie nauki v sisteme professional'nogo obrazovaniia: problemy' i perspektivy'* [Technical sciences in the system of professional education: problems and prospects. Proc. of the V All-Russian scientific and practical conference], Volgograd, VSU, 2023, p. 10–13. (In Russian)
- Mayorov I.S., Prelovsky V.I., Dyukarev V.N. K probleme e'kologo-e'konomicheskoi' ocenki zemel'nogo fonda pribrezhny'kh territorii' zaliva Petra Velikogo [On the problem of ecological and economic assessment of the land fund of coastal territories of Peter the Great Bay], *Vestn. Tikhookeanskogo econom. un-ta*, 2009, no. 3, p. 66–76. (In Russian)
- Moshchenko A.V., Belan T.A., Borisov B.M. Sovremennoe zagriaznenie donny'kh otlozhenii' i e'kologicheskoe sostoiianie makrozoobentosa v pribrezhnoi' zone Vladivostoka (zaliv Petra velikogo Japonskogo moria) [Modern pollution of bottom sediments and the ecological state of macrozoobenthos in the coastal zone of Vladivostok (Peter the Great Bay, Sea of Japan)], *Izvestia TINRO*, 2019, vol. 196, p. 155–181. (In Russian)
- Moshkov A.V. [The most important centers of marine economic activity of Pacific Russia (Vladivostok agglomeration)], *Geosistemy' Severo-Vostochnoi' Azii: priroda, naselenie, hoziai'stvo territorii'* [Proc. of the Geosystems of North-East Asia: nature, population, economy of territories], Vladivostok, 2020, p. 196–205. (In Russian)
- Muzychenko T.K. Spatial structure of land use within the administrative boundaries of the Peter the Great Bay catchment area, *Geosistemy' Severo-Vostochnoi' Azii: priroda, naselenie, hoziai'stvo territorii'* [Proc. of the Geosystems of North-East Asia: nature, population, economy of territories], Vladivostok, TIG FEB RAS, 2024, p. 469–474. (In Russian)
- O sostoianii i ob okhrane okruzhaiushchei' sredy' Rossii'skoi' Federatii v 2022 godu. Gosudarstvennyj doklad* [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022. State report], Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2023, 686 p. (In Russian)
- Prelovsky V.I., Vigovskaya V.N. Poznavatel'ny'i' turizm vo Vladivostoke i ego prigorode: resursy', problemy' i prioritety' razvitiia [Educational tourism in Vladivostok and its suburbs: resources, problems and development priorities], *Pacific geography*, 2022, no. 2(10), p. 60–73. (In Russian)
- Skhema territorial'nogo planirovaniia Nadezhdinskogo munitcipal'nogo rai'ona Primorskogo kraia. Skhema granic zon s osoby'mi usloviiami ispol'zovaniia territorii'* [Territorial planning scheme of the Nadezhdinsky municipal district of Primorsky Krai. Scheme of boundaries of zones with special conditions of territory use], Engineering Consulting Company LLC, Vladivostok, 2011. (In Russian)
- Sorokin P.S. [Muravyinaya Bay: Possibilities of Organizing Educational Tourism on the Territory of the Recreational and Tourist Complex of the Vladivostok Agglomeration], *Kolpinskie chteniia po kraevedeniui i turizmu* [Proc. of the Kolpino Readings on Local History and Tourism], St. Petersburg, 2020, vol. 2, p. 300–304.
- Sorokin P.S. [On the issue of assessing the spatial combination of nature users in the coastal-marine zone], *Geosistemy' Severo-Vostochnoi' Azii: priroda, naselenie, hoziai'stvo territorii'* [Proc. of the Geosystems of North-East Asia: nature, population, economy of territories], Vladivostok, TIG FEB RAS, 2023, p. 164–170. (In Russian)
- Sorokin P.S. Morskaia granitca v pribrezhno-morskom prirodopol'zovanii i variant ee vy'deleniia po glubine [Marine border in coastal management and marine delimitation by depth], *Bulletin of the North-Eastern Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2021, no. 1, p. 66–74. (In Russian)
- Tachikawa T., Hato M., Kaku M. et al. *The characteristics of ASTER GDEM, 2011, Version 2*, IGARSS, July 2011.
- Tikunov V.S. *Modelirovanie v kartografii* [Modeling in cartography], Moscow State University Publishing House, 1997, 405 p. (In Russian)
- Vereshchagina A.V., Guseva A.S. Territorial'noe zonirovanie vo Vladivostokskoi' aglomeracii: nekotory'e voprosy' [The issue of establishing territorial zones within the Vladivostok agglomeration], *The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*, 2017, vol. 9, no. 3, p. 57–70. (In Russian)

Web sources

- Federal'ny'i' zakon no. 33-FZ "Ob osobo okhraniaemy'kh prirodny'kh territoriiakh"* [Federal Law no. 33-FZ "On Specially Protected Natural Areas"], dated 14.03.1995, URL: <http://base.garant.ru/10107990> (access date 10.11.2024). (In Russian)
- Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A. et al. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90 m, Database, 2008, URL: <http://srtm.csi.cgiar.org> (дата обращения 01.09.2024).
- Law of Primorsky Krai No. 245-KZ "On Specially Protected Natural Areas of Primorsky Krai" dated May 11, *Ob osobo okhraniaemy'kh prirodny'kh territoriiakh Primorskogo kraia*, 2005, URL: <https://docs.cntd.ru/document/494212628> (access date 10.11.2024). (In Russian)
- Lehner B., Verdin K., Jarvis A. HydroSHEDS Technical Documentation, Washington, World Wildlife Fund US, DC, 2006, 27 p., URL: <http://hydrosheds.cr.usgs.gov> (дата обращения 01.09.2024).
- Mayorov I.S. Prirodopol'zovanie v beregovoi' zone zaliva Petra Velikogo (istoriia, perspektivy' i uroki e'kologicheskikh proshchetov) [Nature management in

- the coastal zone of Peter the Great Bay (history, prospects and lessons of environmental miscalculations)], *Russia and Asia Pacific region*, 2007, no. 1, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prirodopolzovanie-v-beregovoy-zone-zaliva-petra-velikogo-istoriya-perspektivy-i-uroki-ekologicheskikh-proschetov> (access date 10.11.2024). (In Russian)
- Moskalchuk S.S., Vorozhbit O.Yu. Ocenka konkurentosposobnosti v sisteme upravleniia ry'bohoziai'stvennoi' organizatsiei' (na primere Primorskogo kraia) [Assessment of competitiveness in the management system of a fisheries organization (case study of the Primorsky Krai)], *Izvestia TINRO*, 2009, no. 156, p. 357–369, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-konkurentosposobnosti-v-sisteme-upravleniya-rybohozyaystvennoy-organizatsiei-na-primere-primorskogo-kraia> (access date 01.09.2024). (In Russian)
- OpenStreetMap*, 2024, URL: <https://www.openstreetmap.org/copyright> (дата обращения 01.09.2024).
- Pogorelov A.R., Vovzhenyak I.S., Korovin K.M. Landshaftnaia situatsiia v prirodookhrannoi' zone Vladivostokskoi' aglomeratsii [Landscape situation in the nature conservation zone of the Vladivostok agglomeration], *Social and environmental technologies*, 2018, no. 1, p. 65–78, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/landshaftnaya-situatsiia-v-prirodookhrannoy-zone-vladivostokskoy-aglomeratsii> (access date 01.09.2024). (In Russian)
- Rozlomy N.G. Ob'ekty' rekreatsii v preddverii ATES-2012 [Recreational objects in advance of APEC-2012 (Primorskiy region)], *Bulletin of KrasGAU*, 2012, no. 7, p. 83–86. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obekty-rekreatsii-v-preddverii-ates-2012-primorskiy-kray> (access date 10.07.2023). (In Russian)
- Rukavitsyna M.N. Sostoianie i perspektivy' razvitiia innovatsionnoi' deiatel'nosti v Primorskom krae [Current situation and perspectives of the innovative activity in Primorsky region], *Regional Economy and Management*, 2014, no. 1(37), URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-innovatsionnoy-deyatelnosti-v-primorskom-krae> (access date 10.11.2024). (In Russian)
- Skhema territorial'nogo planirovaniia Primorskogo kraia* [Territorial planning scheme of Primorsky Krai], Resolution of the Primorsky Krai administration dated November 30, 2009, no. 323-pa, URL: <https://docs.cntd.ru/document/494219419> (access date 10.07.2023). (In Russian)
- Skhema territorial'nogo planirovaniia Primorskogo kraia* [Territorial planning scheme for Primorsky Krai], Resolution of the Administration of Primorsky Krai dated April 3, 2017, no. 105-pa “On Amendments to the Resolution of the Administration of Primorsky Krai dated November 30, 2009 no. 323-pa “On Approval of the Territorial Planning Scheme for Primorsky Krai”, URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/2500201704040001> (access date 10.07.2023). (In Russian)
- Topographic maps VMAP 0*. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) Database, 2000, URL: https://www.mapability.com/info/vmap0_download.php (дата обращения 01.09.2024).

Received 08.10.2024
 Revised 10.11.2024
 Accepted 26.11.2024

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ТОКСИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ РЕКИ НЕГЛИНКИ В ПЕТРОЗАВОДСКЕ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Д.С. Рыбаков

Карельский научный центр Российской академии наук, Институт геологии, лаборатория геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии; ст. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: rybakovd@krc.karelia.ru

Статья посвящена актуальной проблеме загрязнения поверхностных вод. Цель работы – оценка влияния изменчивой городской среды на элементный состав речных вод. Для достижения этой цели в нижнем течении малой реки Неглинка, протекающей через территорию города Петрозаводска и впадающей в Онежское озеро, отобраны пробы речной воды. Пробы взяты в один день (19.06.2023) до и после кратковременного дождя. На этой основе изучены концентрации 30 элементов, определенные методом ICP-MS. Выбранные элементы наиболее характерны для урбанизированной территории и важны для ее экологической оценки. Для 26 элементов полученные концентрации сопоставлены с региональным фоном. Результаты свидетельствуют о загрязнении речных вод в условиях города. Усредненные концентрации элементов в сухую погоду превысили региональный фон: U (в 20,4–27,5 раза), Mg (10,9–13,5), Na (11,4–11,7), Sr (6,7–6,9), Cu (6,4–6,5), Mo (6,0–6,6), Sb (5,8–6,5 и до 7,3), Ba (5,0–5,2 и до 7,4), Ca (4,8–5,3), K (4,4–4,9), Cd (4,0–5,8), Cr (3,9–5,1), P (3,6–5,1), Li (3,2–4,0), Ni (3,1–3,2), Co (2,2–2,6), Mn (1,9–3,2) и т. д. Фоновые концентрации не превышались по Th и Fe. Отмечены различия в распределении концентраций ряда элементов в речной воде на разных участках. Наибольшее отношение максимальной концентрации к минимальной установлено для W ($C_{\max}/C_{\min} = 7,5$). После выпадения дождевых осадков отмечено резкое, по сравнению с сухой погодой, увеличение концентраций Ti, Th, Zr, Zn, V, Ag, Sn, W, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Sb, Ni и др. и уменьшение – Mg, Ca, Na, Sr и U. Полученные результаты имеют важное значение для понимания эколого-геохимических связей в природно-антропогенной геосистеме, а также принятия природоохранных решений.

Ключевые слова: загрязнение природных вод, городская река, дождевые осадки, поверхностный сток, потенциально токсичные элементы (ПТЭ)

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.5

ВВЕДЕНИЕ

Поступление химических элементов в поверхностные водные объекты обусловлено как природными, так и антропогенными факторами [Водные объекты..., 2013; Давыдова и др., 2014; Khatri, Tyagi, 2015].

Особую роль в изучении химического состояния геосистем играют малые водотоки, наиболее подверженные влиянию факторов среды в силу небольших водосборных площадей.

Известны пути поступления загрязняющих веществ в поверхностные воды, в том числе сток через ливневую канализацию, сбросы промышленных и сельскохозяйственных объектов, стоки с мест захоронения отходов, выпадения из атмосферы и др. [Двинских, 2020].

Большой интерес вызывает локальный уровень исследований [Рыжков и др., 2012; Водные объекты..., 2013; Теканова и др., 2021], при этом локальные исследования приводят к решению научных задач регионального значения [Лозовик и др., 2006; Янин и др., 2016].

Судя по содержанию целого спектра библиографических источников [Рыжков и др., 2012; Терещи-

на и др., 2021; Ерина и др., 2023; Chalov et al., 2023 и др.], одной из актуальных задач является изучение изменчивости концентраций химических веществ в водах городских рек.

В настоящем исследовании решается задача анализа элементного состава вод нижнего течения реки Неглинка, протекающей через территорию города Петрозаводска, с ранжированием химических элементов в зависимости от характера их распределения. Также оценивается степень поступления ПТЭ в воды реки в результате кратковременного дождя. Ранее многоэлементный анализ поверхностных вод данного водного объекта не проводился.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования послужили воды малой реки Неглинка в пределах Петрозаводска (рис. 1). Река берет начало за городом, в болотистой местности, которая осложнена густой сетью лесной мелиорации. От первых застроенных участков до устья расстояние по руслу составляет 10,5 км.

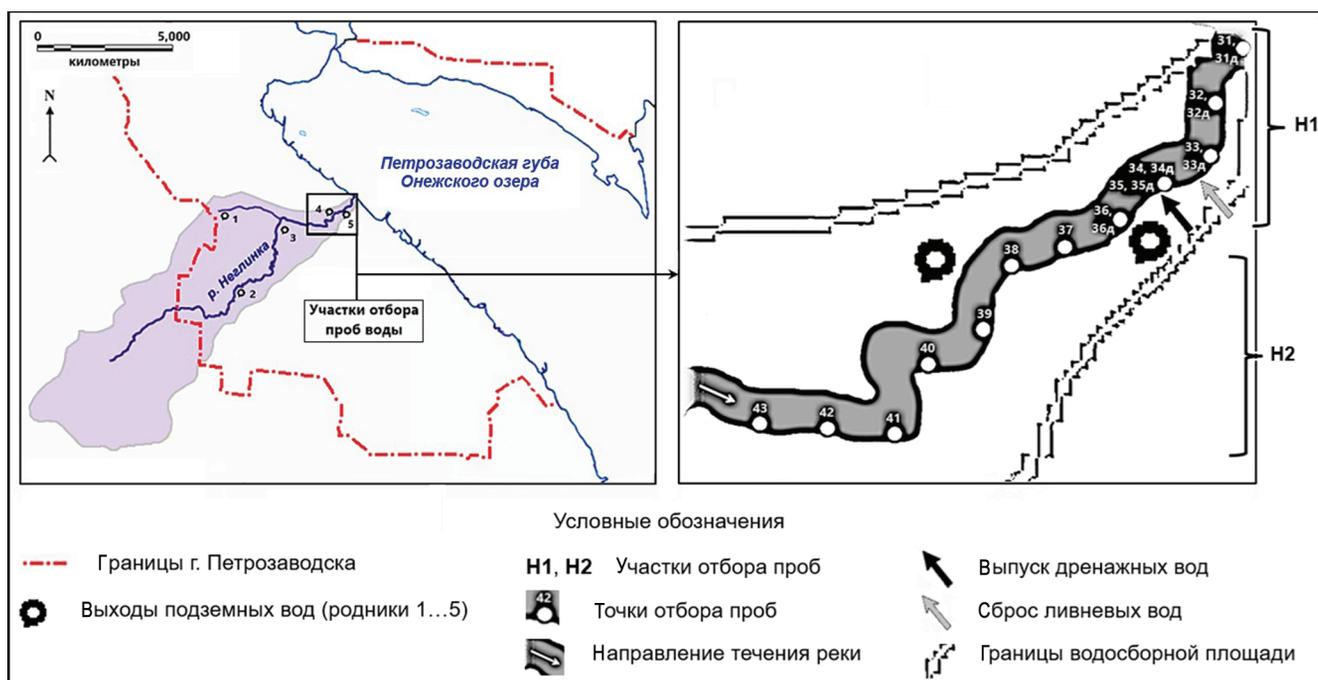


Рис. 1. Водосбор р. Неглинки [Водные объекты..., 2013], расположение выходов подземных вод (1...5 в табл. 4), участки и точки отбора проб поверхностных вод. Расположение точек отбора проб: 31–36 (участок Н1, 150–950 м от устья), 37–43 (участок Н2, 1050–2400 м от устья); 31д–36д – отбор проб после выпадения дождей

Fig. 1. Neglinka river catchment [Water bodies..., 2013], location and sampling points of groundwater outlets (1...5 in Table 4) and surface water sampling sites. Location of water sampling points: 31–36 (site H1, 150–950 m from the mouth), 37–43 (site H2, 1050–2400 m from the mouth); 31д–36д – sampling after the passage of rainfall

Протяженность реки – 14 км, площадь водосбора – 46,1 км². Средняя скорость течения – 0,3–0,4 м/с. Дно песчано-каменистое, местами заиленное с произрастающей высшей водной растительностью. В связи с этим р. Неглинка очень мелководна (глубина не более 1 м). Ширина небольшая – 5–6 м, ближе к устью достигает 10–12 м. Воды не зарегулированы. Средний многолетний расход в устье – 0,51 м³/с. Больше половины годового стока проходит в весенний период – 57%, доля летне-осеннего стока – 34%, зимнего – 9% [Ресурсы..., 1972; Водные объекты..., 2013].

Изучены колебания элементного состава двух участков нижнего течения реки общей протяженностью 2,2 км (см. рис. 1). Для выбранных участков имеются различия по величине жесткости воды: в 200 м выше участка Н2 (точка 43) она составляет 3,76 ммоль/л, на границе участков Н2 и Н1 (между точками 36 и 37) – 3,00 ммоль/л, в конце участка Н1 (точка 31 в 150 м от устья) – 3,15 ммоль/л [Водные объекты..., 2013].

Основная часть проб отбиралась в центре города 19 июня 2023 г. по правому берегу реки через каждые 180–200 м, начиная от Казарменного моста в 150 м от устья до точки в 20 м выше Неглинского моста (участок Н1) и далее от спорткомплекса «Луми» до Студенческого моста на аллее 300-летия

Петрозаводска (участок Н2). Из-за отсутствия доступа к реке (ремонт Путейского моста) расстояние между точками 40 и 41 составило 330 м (см. рис. 1). На участке 150–950 м от устья отбор проводился как в сухую погоду (первый этап), так и после выпадения дождя (второй этап). Взятие проб осуществлялось с берега, что допустимо согласно действующим рекомендациям [Рекомендации..., 2012]. Две пробы отобраны из выпуска сточных вод (также до и после дождя) и две пробы речной воды – на следующий день для контроля естественного восстановления ее состава (третий этап). Отбор воды производился в конические полипропиленовые пробирки объемом 50 мл с винтовой крышкой. Всего отобрано 18 проб речной воды и две пробы из дренажно-ливневой канализации. Пробы в течение трех дней до поступления в аналитическую лабораторию выдерживались в холодильнике, а затем исследовались в Центре коллективного пользования КарНЦ РАН с помощью ICP-MS. Фильтрация проб не проводилась с целью сохранения более полной информации об их загрязнении, пробы не подкислялись, а перед анализом отстаивались, материал для определения брался из самого верхнего слоя воды. Для анализа использовался квадрупольный масс-спектрометр Agilent 7900 ICP-MS (Agilent Technologies, Singapore).

Получены концентрации 54 химических элементов. Для 26 элементов рассчитаны средние геометрические концентрации для сравнения с региональным фоном – средними геометрическими концентрациями элементов в поверхностных водах подзоны средней тайги на территории Карелии и сходных по ландшафтно-климатическим условиям соседних районов Ленинградской и Вологодской областей. Фоновые значения рассчитаны по 75 анализам, полученным методом ICP-MS в ходе работ по международному проекту «Экогеохимия Баренцева региона» [Томилина и др., 2004]. Еще четыре элемента (Sn, Ti, W, Zr), для которых региональный фон не определен, также включены в рассмотрение в связи с их не меньшей экологической и геохимической важностью [Попов, Конюшева, 1983; Климатические..., 2013; Nabi et al., 2021; Рыбаков, Крутских, 2021].

Важным аспектом настоящего исследования является оценка влияния на элементный состав речных вод сильного дождя, прошедшего между первым и вторым этапами отбора проб: в течение 0,5 часа выпало 2,1 мм осадков.

Все расчеты и графические построения выполнялись с помощью пакета «Анализ данных» программы Microsoft Excel. Соответствие распределения данных нормальному закону проверялось с помощью показателей асимметрии (K_A) и эксцесса (K_E) [Плохинский, 1970], наличие статистических аномалий – с помощью критерия Граббса (U) [Grubbs, 1969]. Распределение считалось близким к нормальному при выполнении условий $|K_A| \leq 3$ и $|K_E| \leq 3$, отсутствие или наличие квази- и статистических выбросов контролировалось путем сравнения $U_{\text{расч}}$ с табличными значениями двустороннего критерия Граббса при уровнях значимости (p) 0,05 ($U_{0,05}$) и 0,01 ($U_{0,01}$) соответственно. Сравнение выборок осуществлялось путем проверки статистической значимости различия выборочных средних с учетом различия или сходства выборочных дисперсий. Соответственно использовались двусторонние вероятности для t -распределения Стьюдента (p_t) и F -распределения Фишера (p_F). Различия признавались статистически значимыми при $p < 0,05$. Для полной выборки (данные для отрезка реки, включающего участки Н2 и Н1) рассчитывались коэффициенты линейной аппроксимации (R^2), статистическая значимость которых контролировалась с помощью критерия Фишера: $F_{\text{экср}} = R^2(n-2)/(1-R^2)$. Аппроксимация считалась статистически надежной, если эмпирические значения были выше табличных [Большев, Смирнов, 1983] для уровня значимости 0,05 ($F_{\text{экср}} > F_{\text{табл}}$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены концентрации химических элементов в пробах воды нижнего течения р. Неглинки.

Проверка гипотезы о нормальности распределения данных. Показано, что для концентраций всех изученных элементов в природной воде городского водотока в сухую погоду, а также логарифмов этих концентраций может быть принята гипотеза о нормальном распределении (отдельный расчет для участков Н1 и Н2): $|K_A| = 0,000-2,062$; $|K_E| = 0,019-2,330$.

Для участка Н1 в выборках концентраций и их логарифмов установлен (проба 31) один статистический выброс – максимум Ва ($U_{\text{расч}} = 1,780-1,783 > U_{0,01} = 1,764$) и квазिवыброс – минимум Са ($U_{\text{расч}} = 1,727-1,731 > U_{0,05} = 1,715$). Максимум Sb (проба 32) также является квазिवыбросом ($U_{\text{расч}} = 1,730-1,737$).

Для участка Н2 статистические выбросы выявлены для Zn: $8,61 \text{ мг/м}^3$ ($U_{\text{расч}} = 4,956-5,015 > U_{0,01} = 1,973$; $n = 6$) и $8,13 \text{ мг/м}^3$ ($U_{\text{расч}} = 4,652-4,657 > U_{0,01} = 1,764$; $n = 5$).

В полной выборке ($n = 11$) распределение большинства элементов подчиняется нормальному закону: $|K_A| = 0,074-1,975$; $|K_E| = 0,037-2,415$. При этом не принята гипотеза о нормальном распределении W: $|K_A| = 3,218$; $|K_E| = 4,454$ и Ti: $|K_A| = 3,348$; $|K_E| = 4,443$. Для логнормального распределения W: $|K_A| = 1,225$; $|K_E| = 0,673$; Ti: $|K_A| = 2,470$; $|K_E| = 2,407$.

Для Ti и V в данной выборке установлен статистический выброс ($U_{\text{расч}} = 2,755 > U_{0,01} = 2,564$) и квазिवыброс ($U_{\text{расч}} = 2,430 > U_{0,05} = 2,355$) соответственно. Оба аномальных значения приходятся на участке русла с укрепленным подпорной стенкой вогнутым берегом излучины реки (точка 41 на рис. 1). Для логарифмов концентраций этих элементов величины критерия Граббса ниже ($U_{\text{расч}} = 2,508$ и $2,341$ соответственно).

К статистически аномальной ($U_{\text{расч}} = 2,457-2,487$; $n = 11$) отнесена концентрация Na в 5 м ниже выпуска дренажных вод (точка 34), в которых содержание Na составило $46,2 \text{ мг/л}$, что в 2,1 раза выше, чем в среднем в речной воде. Отличия по Zn (минимальное значение, $U_{\text{расч}} = 2,418-2,512$) и Ва (максимальное значение, $U_{\text{расч}} = 2,827-2,880$) выявлены вблизи устья (точка 31).

Для представленных в табл. 1 концентраций элементов в пробах, отобранных после дождя (участок Н1), и логарифмов этих значений принята гипотеза о нормальном распределении: $|K_A| = 0,017-1,717$ и $|K_E| = 0,027-1,686$.

Для рассчитанных по каждой точке участка Н1 соотношений содержания элементов в воде после дождя и в сухую погоду также принята гипотеза о нормальном распределении: $|K_A| = 0,020-1,595$ и $|K_E| = 0,001-1,572$.

Таблица 1

Концентрации химических элементов в пробах воды р. Неглинки, мг/м³

Элемент	Номер пробы																	
	31	32	33	34	36	31д	32д	33д	34д	36д	37	38	39	40	41	42	42*	43*
Ag	0,003	0,003	0,003	0,002	0,004	0,008	0,015	0,006	0,010	0,027	0,003	0,004	0,002	0,001	0,003	0,002	0,002	0,004
As	0,67	0,56	0,51	0,54	0,58	0,74	0,62	0,66	0,77	0,99	0,57	0,61	0,67	0,62	0,65	0,60	0,79	0,72
Ba	81,1 ^{1,2}	55,1	54,1	55,9	53,4	72,0	56,6	67,5	61,5	80,8	52,9	54,8	57,1	57,1	59,8	59,9	59,3	57,4
Ca	20447	21628	21862	22113	21887	16038	15508	19600	18759	18894	22536	23214	24125	24292	24697	24396	20628	20378
Cd	0,055	0,060	0,072	0,046	0,059	0,070	0,059	0,067	0,089	0,053	0,048	0,038	0,037	0,043	0,032	0,041	0,034	0,030
Co	0,35	0,36	0,38	0,36	0,39	1,18	0,95	0,66	1,20	1,93	0,41	0,45	0,45	0,45	0,49	0,42	0,63	0,62
Cr	2,19	2,30	2,25	2,23	2,34	8,61	13,6	3,65	3,96	7,77	2,42	1,87	1,42	1,78	1,51	1,38	1,81	1,75
Cu	3,67	4,20	4,08	4,03	3,98	15,8	16,1	6,63	9,02	12,5	4,02	4,26	3,93	3,73	3,58	3,98	5,35	5,09
Fe	255,7	268,0	270,8	250,3	285,1	726,6	541,3	421,0	957,9	1552,2	346,9	353,9	396,8	432,8	486,7	485,8	656,0	642,3
K	2000	2129	2143	2365	2010	2435	2277	2117	2099	2152	1875	1928	1877	1866	1906	1892	1927	1882
Li	2,31	2,40	2,41	2,41	2,56	3,11	2,89	2,62	3,32	4,34	2,74	2,84	3,06	3,15	3,14	3,18	3,18	3,15
Mg	15646	17036	17180	17348	17936	10974	10594	15241	14544	14846	19242	20276	21073	21616	21854	21604	16512	16275
Mn	136,1	101,3	105,3	89,6	112,5	277,4	192,4	467,8	301,5	299,6	140,4	149,1	188,6	205,3	215,6	232,2	418,0	388,8
Mo	0,76	0,67	0,64	0,62	0,61	1,03	1,04	0,65	0,80	1,13	0,68	0,76	0,74	0,74	0,71	0,74	0,75	0,79
Na	22214	22803	22889	24004 ²	22416	19459	18503	20526	18783	19517	21816	22629	22529	22181	22725	22146	21780	21588
Ni	1,30	1,48	1,47	1,43	1,39	2,93	2,71	1,98	3,08	4,08	1,43	1,41	1,42	1,35	1,48	1,43	1,77	1,77
P	76,6	70,0	71,5	75,1	80,8	156,5	140,6	94,4	129,6	164,7	89,4	93,2	102,8	105,3	117,2	122,5	110,9	107,7
Pb	0,54	0,61	0,57	0,54	0,63	1,26	1,36	0,91	2,35	2,48	0,66	0,50	0,54	0,54	0,56	0,46	0,54	0,52
Rb	2,18	2,27	2,21	2,24	2,46	4,56	4,11	2,98	3,89	5,40	2,71	2,82	2,83	2,87	2,88	2,98	3,68	3,49
Sb	0,196	0,220 ¹	0,197	0,198	0,191	0,513	0,720	0,306	0,478	0,745	0,181	0,200	0,174	0,156	0,181	0,149	0,303	0,290
Sn	0,044	0,033	0,042	0,033	0,044	0,130	0,182	0,063	0,188	0,284	0,043	0,044	0,031	0,036	0,026	0,021	0,070	0,079
Sr	146,2	139,1	140,7	145,0	137,6	111,9	98,3	127,8	119,6	118,8	140,6	146,0	146,4	150,2	147,4	149,2	137,7	132,0
Ti	1,57	1,62	2,19	1,78	1,58	43,4	32,7	14,1	63,8	159,1	1,64	3,06	2,24	2,02	5,20 ²	2,01	17,7	39,0
Th	0,012	0,009	0,010	0,008	0,009	0,066	0,039	0,023	0,110	0,252	0,011	0,015	0,012	0,013	0,019	0,011	0,036	0,038
Tl	0,015	0,012	0,012	0,015	0,014	0,020	0,018	0,013	0,020	0,026	0,016	0,013	0,006	0,007	0,007	0,008	0,011	0,009
U	0,56	0,61	0,62	0,61	0,67	0,43	0,40	0,52	0,66	0,69	0,73	0,81	0,82	0,87	0,88	0,85	0,61	0,61
V	0,85	0,83	0,82	0,86	0,82	3,23	3,13	1,43	3,75	6,75	0,84	0,92	0,90	0,89	1,04 ²	0,77	1,85	1,71
W	0,22	0,12	0,086	0,080	0,097	0,42	0,58	0,15	0,36	0,83	0,11	0,60	0,25	0,21	0,20	0,17	0,22	0,17
Zn	6,36 ²	7,99	8,37	7,35	8,91	42,4	48,7	19,7	27,5	39,4	8,62 ¹	8,00	8,00	8,13 ¹	8,02	8,011	12,9	13,3
Zr	0,17	0,14	0,13	0,10	0,14	0,74	0,75	0,33	1,31	3,68	0,15	0,26	0,25	0,18	0,18	0,17	0,54	0,38

Примечание. Статистически аномальные значения (могут влиять на результаты расчетов): ¹ в отдельных выборках для участков Н1 и Н2, ² в общей выборке для сухой погоды (см. текст).

Сравнение с региональным фоном и мировыми данными. После проверки гипотез о нормальном распределении данных и исключения из выборок статистически аномальных значений проведено сравнение средних концентраций элементов в речной воде с имеющимися оценками регионального фона (табл. 2). Заметим, что поверхностные воды Карелии в целом содержат меньше макро- и микро-

элементов по сравнению с мировым уровнем. Данный уровень превышен только по Mn и Fe (в среднем в 5,7 и 1,5 раза соответственно).

Судя по средним значениям, имеющиеся фоновые концентрации превышались по всем элементам кроме Th и Fe. Самые большие превышения отмечены по U (в 20,4–27,5 раза), Mg (10,9–13,5), Na (11,4–11,7), Sr, Cu, Mo, Sb (5,7–6,9), Ba (5,0–5,2).

Таблица 2

Концентрации химических элементов в воде нижнего течения р. Неглинка в сравнении с региональным фоном и мировыми данными, стоках дренажно-ливневой канализации в сухую погоду и после дождевых осадков

Элемент	Речные воды мира ^а , мг/м ³	Фон, средняя тайга, мг/м ³	Участок Н2		Участок Н1		Стоки				
			Сухая погода						После дождя, мг/м ³	Сухая погода, мг/м ³	После дождя, мг/м ³
			мг/м ³	Отношение к фону	мг/м ³	Отношение к фону	–	–			
Ag	0,2	0,002	0,0023	1,14	0,0029	1,47	0,011	0,003	0,006		
As	2	0,49	0,62	1,26	0,57	1,16	0,74	0,78	0,75		
Ba	25 ^б	10,92	56,9	5,21	54,6**	5,00	67,1	110,8	52,0		
Ca	13 000 ^б	4541	23 865	5,26	21 579	4,75	17 681	31 962	15 781		
Cd	0,2	0,01	0,040	3,95	0,058	5,78	0,067	0,039	0,057		
Co	0,3 (0,25 ^б)	0,17	0,45	2,62	0,37	2,16	1,11	0,41	1,04		
Cr	1	0,44	1,70	3,85	2,26	5,14	6,66	2,59	4,84		
Cu	7	0,61	3,91	6,41	3,99	6,54	11,4	4,83	17,3		
Fe	670 ^б	1028	413,3	0,40	265,7	0,26	755,5	72,1	383,8		
K	1500 ^б	429,9	1890	4,40	2125	4,94	2213	6606	3601		
Li	2,5	0,75	3,01	4,02	2,41	3,22	3,21	3,23	2,70		
Mg	3300 ^б	1555	20 924	13,5	17 012	10,9	13 078	22 641	8799		
Mn	10	57,2	185,4	3,24	107,9	1,89	295,6	51,3	137,7		
Mo	1	0,11	0,73	6,60	0,66	5,99	0,91	0,61	0,53		
Na	4500 ^б	1953	22 336	11,4	22 857	11,7	19 345	46 234	21 531		
Ni	2,5	0,45	1,42	3,15	1,41	3,14	2,88	2,27	3,82		
P	40 (20 ^б)	20,67	104,4	5,05	74,70	3,61	134,7	139,6	271,3		
Pb	1	0,29	0,54	1,86	0,58	1,99	1,56	0,19	0,64		
Rb	2	0,98	2,85	2,90	2,27	2,32	4,11	2,31	4,88		
Sb	1	0,03	0,173	5,76	0,195**	6,52	0,526	0,162	0,338		
Sn	0,5 ^б	н/д	0,032	н/д	0,039	н/д	0,151	0,028	0,107		
Sr	50 (80 ^б)	21,2	146,6	6,92	141,7	6,68	114,9	261,4	117,4		
Th	0,1	0,04	0,013	0,33	0,010	0,24	0,070	0,004	0,050		
Ti	3 (4 ^б)	н/д	2,49	н/д	1,73	н/д	45,8	1,28	26,0		
Tl	н/д	0,005	0,0089	1,78	0,014	2,71	0,019	0,008	0,014		
U	0,5 (0,3 ^б)	0,03	0,82	27,5	0,61	20,4	0,53	1,36	0,39		
V	1	0,56	0,89	1,59	0,84	1,49	3,26	1,64	3,26		
W	0,03	н/д	0,220	н/д	0,111	н/д	0,405	0,048	0,319		
Zn	20	5,09	8,00**	1,57	7,74	1,52	33,8	2,96	130,4		
Zr	2,6 (2,5 ^б)	н/д	0,19	н/д	0,13	н/д	0,99	0,033	0,61		
<i>n</i>	н/д	75	6(4**)		5(4**)		5	1	1		
Статистически аномальные значения			8,61 (Zn)	1,69	81,1 (Ba)	7,43	–	–			
			8,13 (Zn)	1,60	0,220 (Sb)	7,33					

Примечание. * Растворенные формы по данным В.В. Гордеева, А.П. Лисицина (Гордеев, 1983), по данным А.П. Виноградова, А.П. Лисицина, Д. Голдберга, Х. Боуэна, К. Турекиана, В.В. Добровольского (Добровольский, 2008). Для речных вод даны средние геометрические значения.

** Расчет после удаления статистически аномальных значений (см. текст). Фоновые значения – средние геометрические для поверхностных вод подзоны средней тайги [Томилина и др., 2004]; *n* – число проб.

В воде городской реки ниже мировых оказались концентрации: Ag (в 68–87 раз), Zr (13,4–19,3), Sn (12,9–15,4), Th (7,6–10,5), Sb (5,1–5,8), Cd (3,5–5,1), As (3,2–3,5) и т. д. Мировой уровень превышен по Mn (в 10,8–18,5 раза), W (3,7–7,3), Mg (5,2–6,3), Na (5,0–5,1), Sr (2,8–2,9), P (1,9–2,6), Ba (2,2–2,3), Cr (1,7–2,3), Ca (1,7–1,8), U (1,2–1,6) и т. д.

Распределение элементов в воде нижнего течения р. Неглинка в сухую погоду. Участки Н1 и Н2 (см. рис. 1) отличались по содержанию ряда элементов. Так, концентрация Fe уменьшалась вниз по течению, одновременно фиксировалось статистически значимое различие выборочных средних и наиболь-

шее из всех элементов расхождение концентраций между верхней и нижней точками (табл. 3). Такая же тенденция установлена для Mg, Ca, а также Mn. Чуть более активное снижение концентраций Fe и Mn отмечено в 5 м ниже места выпуска дренажных вод (точка / проба 34 на рис. 1 и в табл. 1).

Вслед за указанными элементами снижение концентраций по направлению к устью и статистически значимые различия средних установлены для микроэлементов: Li, U, P, Rb, Co. Для Sr, в целом примыкающего к этой группе, отмечены небольшие колебания, которые повлияли на величину коэффициента аппроксимации.

Таблица 3

Сравнение элементного состава вод на участках нижнего течения р. Неглинка в сухую погоду

Элемент	Отношение средних на участках реки: Н1/Н2, число раз	P_{Fig}	P_{dig}	Отношение концентраций в крайних точках: т. 31/т. 42, число раз	R^2_{lg}	F
Fe	0,64	0,059	<0,001	0,53	0,92	104,5
Mn	0,58	0,603	<0,001	0,59	0,74	25,5
P	0,72	0,160	<0,001	0,63	0,93	112,7
U	0,74	0,867	<0,001	0,66	0,93	113,8
Mg	0,81	0,919	<0,001	0,72	0,95	166,2
Li	0,80	0,348	<0,001	0,73	0,95	169,7
Rb	0,80	0,404	<0,001	0,73	0,90	82,0
Ti	0,70	0,055	0,098	0,78	0,23**	2,43**
Zn	0,97*	<0,001*	0,660*	0,79	0,00**	0,03**
Co	0,82	0,620	<0,001	0,83	0,76	28,8
Ca	0,90	0,842	0,001	0,84	0,93	120,0
Ni	1,00	0,238	0,847	0,92	0,02	0,23
Cu	1,02	0,736	0,578	0,92	0,07	0,70
Sr	0,97	0,775	0,048	0,98	0,39	5,71
Na	1,02	0,185	0,134	1,00	0,05**	0,42**
Zr	0,69	0,699	0,016	1,01	0,22	2,56
Mo	0,91	0,161	0,033	1,02	0,18	1,92
K	1,12	0,002	0,017	1,06	0,43	6,87
Th	0,72	0,540	0,017	1,09	0,32	4,56
V	0,94	0,008	0,197	1,10	0,01**	0,07**
As	0,92	0,197	0,117	1,11	0,15	1,53
Pb	1,07	0,243	0,297	1,18	0,21	2,45
W	0,51	0,569	0,050	1,31	0,15	1,54
Sb	1,13*	0,010*	0,037*	1,32	0,64	16,2
Cd	1,46	0,735	0,002	1,34	0,63	15,1
Ba	0,96*	0,186*	0,156*	1,35	0,50**	7,89**
Ag	1,28	0,215	0,332	1,50	0,16	1,74
Cr	1,33	0,001	0,020	1,59	0,68	19,1
Tl	1,98	0,032	0,046	1,88	0,54	10,6
Sn	1,44	0,225	0,239	2,10	0,41	6,33

Примечание. Вычисление вероятностей выполнено для логарифмов концентраций: * расчеты проведены после исключения статистически аномальных значений (см. табл. 2); R^2 – коэффициент линейной аппроксимации для полной выборки; $F_{эксп}$ – расчетная величина F -распределения; ** $F_{табл} = 5,12$ при $n = 11$; $F_{табл} = 5,32$ при $n = 10$ (Ti, Zn, Na, V, Ba).

Средняя концентрация К, наоборот, по направлению к устью повышалась (см. табл. 3). При этом максимум роста до 2,37 мг/л отмечен в точке 34, где наблюдается влияние дренажных вод, содержащих 6,61 мг/л этого элемента. На участке Н2, в отличие от участка Н1, колебания концентраций К меньше (см. табл. 1), что приводит к статистически значимому различию не только выборочных средних, но и дисперсий (см. табл. 3). Средние концентрации Na на двух сравниваемых участках статистически не различались, однако в точке 34, так же как для К, замечен небольшой рост его содержания: 24,0 мг/л при содержании в дренажной воде 46,2 мг/л.

Концентрация Сг вниз по течению повысилась с 1,38 мг/м³ (точка 42) до 2,42 мг/м³ (точка 37), т. е. в 1,8 раза, а затем немного снизилась до 2,19 мг/м³ (точка 31). В связи с этим получено статистически значимое различие как выборочных средних, так и дисперсий (см. табл. 3). Тем не менее данные полной выборки, характеризующей общее повышение концентрации Сг вниз по течению, могут быть аппроксимированы статистически значимым вероятностным распределением. Статистически значимое увеличение концентраций по направлению к устью характерно и для других ПТЭ, что в целом позволило сформировать следующий ряд по убыванию величины R²: Cr > Sb > Cd > Tl > K > Sn.

Для остальных элементов в отдельных точках наблюдались вариации, снизившие качество оцениваемых статистических моделей. Последнее касается как проверки статистических гипотез, так и аппроксимации данных.

Наибольшее отношение максимума концентрации к минимуму установлено для W: для точек 38 и 34 $C_{\text{макс}}/C_{\text{мин}} = 7,5$; точек 38 и 37 – 5,4 (см. данные табл. 1). Для других элементов эти значения по всему изученному отрезку реки ниже: Ag (4,0), Ti (3,3), Tl (2,7), Mn (2,6), Zr (2,5), Th (2,4), Cd (2,3), Sn (2,1), Fe (1,9), Cr (1,8), P (1,7), U (1,6), Ba, Sb (1,5) и т. д.

Влияние дренажного стока на химический состав речных вод может быть прослежено по данным табл. 2. Так, в сухую погоду в дренажном стоке, по сравнению с речной водой (среднее по участку Н1), присутствовало (рис. 2) больше: К (в 3,1 раза), U (2,2), Ba, Na, V (2,0), P (1,9), Sr (1,8), Ni (1,6), Ca (1,5), As (1,4), Li, Mg (1,3), Cu (1,2) и меньше: Zr (4,1), Fe (3,7), Pb (3,1), Zn (2,6), Th (2,4), W (2,3), Mn (2,1), Tl (1,7), Cd (1,5), Sn, Ti (1,4) и т. д. При этом вблизи выпуска дренажных стоков (точка 34; см. рис. 1), по сравнению с ближайшей точкой 36 выше по течению, при чуть более высоких концентрациях К (в 1,2 раза) и Na (1,1) обнаружены относительно меньшие количества Sn, Zr, Cd, Mn (в 1,3 раза), Zn, W и Pb (1,2).

Влияние дождевых осадков. Для участка Н1 в табл. 1 и 2 представлены данные, характеризующие изменчивость элементного состава речной воды в результате выпадения дождевых осадков. После дождя в воде в среднем увеличились концентрации (рис. 3): Ti (в 26,5 раза), Th, Zr (7,3), Zn (4,4), V, Ag, Sn (3,9), W (3,6), Co (3,0), Cr (2,9), Cu, Fe (2,8), Mn, Pb (2,7), Sb (2,6), Ni (2,0), Rb, P (1,8), Tl, Mo (1,4), Li, As (1,3), Cd (1,2), Ba (1,1), снизились – Mg (в 1,3 раза), Sr, Ca, Na и U (1,2), не изменилась концентрация К (1,0).

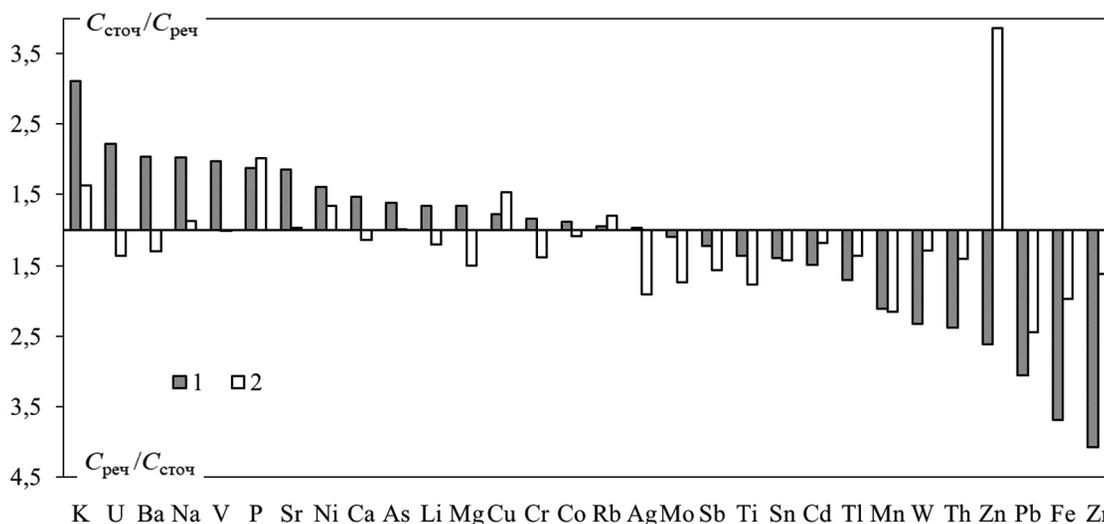


Рис. 2. Соотношение между концентрациями химических элементов в стоках дренажно-ливневой канализации ($C_{\text{сточ}}$ – пробы 35 и 35д в табл. 1) и воде р. Неглинки ($C_{\text{реч}}$ – среднее по участку Н1 в табл. 2): 1 – в сухую погоду; 2 – после дождя; выше линии $C_{\text{сточ}}/C_{\text{реч}} = 1$ – элементы, концентрации которых преобладают в стоках, ниже линии – в речной воде

Fig. 2. The ratio between the concentrations of chemical elements in drains of drainage-storm sewers (C_{drains} – samples 35 and 35d in Table 1) and water of the Neglinka River (C_{river} – average for site H1 in Table 2): 1 – in dry weather; 2 – after rain; above the line $C_{\text{drains}}/C_{\text{river}} = 1$ – elements whose concentrations prevail in the runoff, below – in river water

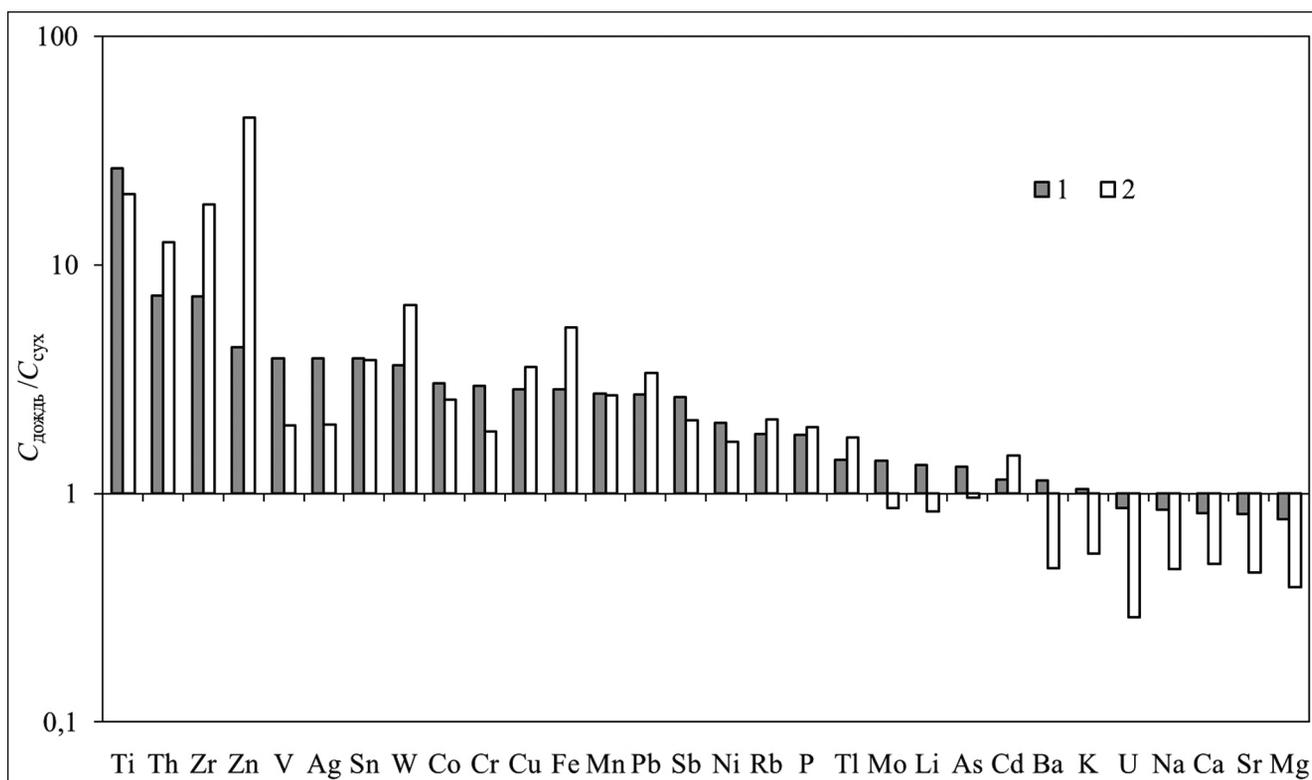


Рис. 3. Изменчивость концентраций химических элементов в речных и сточных водах:
1 – отношение концентраций в воде р. Неглинка (среднее по участку Н1) после дождя ($C_{\text{дождь}}$) и в сухую погоду ($C_{\text{сух}}$);
2 – то же в стоках дренажно-ливневой канализации (пробы 35д и 35 соответственно)

Fig. 3. Variability of concentrations of chemical elements in river and drains:
1 – the ratio of concentrations in the water of the Neglinka river (average for site H1) after rain (C_{rain}) and in dry weather (C_{dry});
2 – the same in drains of drainage-storm sewers (samples 35д and 35 respectively)

Самовосстановление речных вод заняло определенное время: на следующий день после дождя концентрации элементов все еще отличались от выявленных в условиях сухой погоды. Выше среднего значения в воде участка Н2 (см. табл. 2) в точках 42 и 43 (см. рис. 1, пробы 42* и 43* в табл. 1) оказалось среднее содержание ($n = 2$): Ti (в 11,4 раза), Th (2,8), Zr (2,4), Sn (2,3), Mn (2,2), V (2,0), Sb (1,7), Zn, Fe (1,6), Co (1,4), Cu, Ag, Rb (1,3), Ni, As (1,2). Концентрации других элементов, как и на участке Н1 после дождя, были относительно понижены: U (в 1,4 раза), Mg (1,3), Ca (1,2), Sr (1,1). Быстрее всего восстанавливались концентрации Na, K, Ba и Li (1,0).

После дождя дренажно-ливневая вода, по сравнению с изначальной дренажной, содержала больше (см. рис. 3): Zn (в 44 раза), Ti (20,3), Zr (18,4), Th (12,5), W (6,6), Fe (5,3), Sn (3,8), Cu (3,6), Pb (3,4), Mn (2,7), Co (2,6), Rb, Sb (2,1), Ag, V (2,0), P, Cr (1,9), Tl (1,8), Ni (1,7), Cd (1,5) и меньше: U (в 3,5 раза), Mg (2,6), Sr (2,2), Na, Ba (2,1), Ca (2,0), K (1,8) и т. д. Одновременно количество элементов, концентрация которых в сточных водах превышала концентрацию в водах реки, сократилось; при этом отличие составило (см. рис. 2): Zn (3,9 раза), P (2,0), K (1,6), Cu (1,5), Ni (1,3), Rb (1,2).

Из табл. 2 и рис. 3 видно, что за время дождя в речной воде в большей степени, чем в стоках, выросли концентрации V, Ag, Cr, Ti, Sb, Ni, Co, в стоках – Zn, Zr, Fe, W, Th, Cu, Cd, Pb, Tl, Rb, P. Одновременно в сточных водах произошло более сильное, чем в речной воде, снижение концентраций U, Mg, Na, Sr, Ca. И наконец, при росте концентраций Ba, K, Mo, Li, As в речной воде содержание этих же элементов в стоках уменьшилось.

Воды р. Неглинка в г. Петрозаводске сильно загрязняются большим количеством химических элементов как в сухую погоду, так и, в большей степени, в результате выпадения дождевых осадков. Даже в межень, когда питание реки сильно зависит от подземных вод, по всем элементам, кроме Th и Fe, отмечается превышение фоновых концентраций: U (в 20–27 раз), Mg, Na (11–13), Sr, Cu, Mo, Sb (6–7), Ca, Ba, Cd, Cr, K, P, Li (3–6), Mn, Ni, Rb, Co, Pb (2–3). Также превышаются средние уровни для рек мира: Mn (в 10–19 раз), Mg, Na (5–6), W (4–7), Sr, P, Ba, Cr, Ca (2–3), U, Co (до 1,5 раза) и т. д.

После дождя, при небольшом снижении концентраций Mg, Ca, Sr, Na и U, концентрации элементов-загрязнителей на самом нижнем участке реки (150–950 м от устья) возрастают: Ti (в 26,5 раза), Th, Zr

(7,3), Zn (4,4), V, Ag, Sn (3,9), W (3,6), Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Sb (3,0–2,6), Ni (2,0), Rb, P (1,8), Tl, Mo, Li, As, Cd (1,4–1,2). Такое увеличение является особенностью по сравнению, например, с наиболее полными данными по изменчивости элементного состава вод р. Сетуни (г. Москва) в результате экстремальных паводков, которые не приводят к колебаниям в речных водах концентраций растворенных (фильтр < 0,45 мкм) Cu, Zn, Mo, Sn, Pb, Ba, U, а также снижают концентрации Li, Cr, As и др. [Chalov et al., 2023]. Пробы воды р. Неглинка не фильтровались, поэтому на полученные концентрации Co, V, Ni, Pb, Ag, ассоциирующихся в речной воде после дождя с Fe, Ti и Zr (см. ниже), могли оказать влияние попавшие в пробы крупные (>0,45 мкм) коллоидные частицы.

Значительные концентрации U – выше, чем, например, в поверхностных водах района бывшего радиового промысла (максимум $0,37 \pm 0,05$ мг/м³) [Рачкова, Шапошникова, 2019] – связываются с геохимическими особенностями района: содержание U в залегающих под водосбором р. Неглинка калевийских метаморфических образованиях (падосская свита) составляет 5,8 г/т [Томилини и др., 2004], что выше кларка в земной коре в 2,3 раза. Аномальное содержание U обнаружено также в донных осадках и рыхлых отложениях района [Михайлов и др., 2014]. Снижение концентрации U в речных водах и воде дренажно-ливневой канализации при увеличении поверхностного стока в результате выпадения дождевых осадков служит еще одним аргументом в пользу версии о поступлении этого элемента к поверхности из недр.

О влиянии подземного стока на формирование катионного состава вод городской реки можно судить, исходя из табл. 4. В ней подобраны те выходы подземных вод, положение которых совпадает с водосбором реки. Как известно, в Карелии водосборы

поверхностных и подземных вод совпадают, движение подземных вод направлено от водоразделов к ближайшим поверхностным водотокам и водоемам, где происходит их разгрузка [Бородулина, 2022]. В связи с этим можно предполагать, что влияние подземного стока будет отражаться на концентрации элементов в речных водах. Вместе с тем устанавливается неполное соответствие по содержанию основных химических компонентов в подземных и поверхностных водах. Так, воды р. Неглинка в ее нижнем течении близки к изливающимся на поверхность подземным водам по пространственному распределению концентраций Mg, Ca и K, но отличаются неоднозначностью по изменчивости концентраций Na и Fe.

В том числе, если выше исследованных участков (см. рис. 1) концентрация Mg в подземных водах увеличивается с 12–18 мг/л (источники 1 и 2 в табл. 4) до 35–45 мг/л (источник 3), то ниже (между точками 39 и 38) она составляет 4–14 мг/л (источники 4 и 5). При этом концентрация Mg в речной воде вниз по течению снижается в среднем в 1,2 раза, а между крайними точками всего изученного отрезка реки – в 1,4 раза (см. табл. 3). То же самое наблюдается для Ca: увеличение концентрации с 18–28 мг/л (источники 1 и 2) до 43–67 мг/л (источник 3) и снижение до 12–27 мг/л (источники 4 и 5), при уменьшении концентрации в речной воде в среднем в 1,1 раза, между крайними точками – в 1,2 раза. С описанными вариациями хорошо соотносится распределение общей жесткости речной воды [Водные объекты..., 2013]: 3,76 ммоль/л – соответствует более высокому содержанию Mg²⁺ и Ca²⁺ в воде источника 3 (см. табл. 4), 3,00 и 3,15 ммоль/л – сравнительно пониженному содержанию этих катионов в воде источников 4 и 5.

Таблица 4

Состав катионов и минерализация подземных вод [Водные объекты..., 2013]

Местоположение источников	pH	Na ⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	Fe _{общ} ⁺ , мг/л	Минерализация, г/л
Р-н Сулажгора, «Сулажгорский»	6,9–7,3	6–7	1–2	18–23	12–17	<0,2	0,19–0,21
Ул. Попова, лесной массив	7,2–7,6	5–7	1–2	24–28	14–18	0,2–0,7	0,23–0,25
Ул. Пионерская, 41	6,6–7,3	31–43	3–4	43–67	35–45	<0,2	0,52–0,61
Река Неглинка, ул. Вольная	6,2–6,7	7–28	2–4	12–26	4–11	<0,2	0,10–0,20
Ул. Дзержинского, гимназия № 17	6,3–6,7	14–22	5–6	19–27	5–14	0,1–0,3	0,15–0,23

Примечание. На рис. 1 расположены источники: 1 – родник, водосбор р. Рыбка (приток р. Неглинка, выше участков Н2 и Н1); 2 – ключ, водосбор р. Неглинка (выше участков Н2 и Н1); 3 – родник, водосбор р. Неглинка (выше участков Н2 и Н1); 4 – родник, участки Н2 и Н1; 5 – разрушенный родник, сток по канаве в реку, участок Н1.

Концентрация K в воде реки вниз по течению не много увеличивается (в 1,1 раза) сообразно ее изменчивости в подземных водах (мг/л): 1–2 (источники 1 и 2), 2–4 (источники 3 и 4), 5–6 (источник 5).

Что касается Fe, то его появление в воде нижнего течения реки, видимо, следует связывать не столько с подземными источниками напрямую, сколько с болотным стоком. Это согласуется с данными 1993–

2002 г. [Рыжков, Артемьева, 2004], по которым концентрация Fe за городской чертой (заболоченная местность) превышает таковую на приустьевом участке в 1,9 раза (6,4 и 3,4ПДК_{рх} соответственно).

Обычно Fe в водах рек связывают со взвешенными и коллоидными частицами, а также растворенным органическим (гумусовым) веществом [Лозовик и др., 2006; Савичев и др., 2020; Ерина и др., 2023]. Очевидно, что из-за влияния различных факторов в разных пространственно-временных координатах соотношение растворенных и нерастворенных форм химических элементов будет различным.

В целом на основании определения концентраций основных катионов подтверждается предположение, сделанное ранее для р. Неглинка [Andronikov et al., 2019], о влиянии подземного стока на гидрохимический состав речной воды. Вместе с тем для нижнего течения реки характер пространственной изменчивости элементного состава представляется более дробным, чем предложенное авторами деление по гидрохимическим показателям на два различных потока: один представлен верхним участком реки, а другой – нижним. На основе проведенного исследования показано, что в пределах нижнего течения также имеются два участка, различающихся по составу как основных элементов, так и микроэлементов.

Поверхностный сток, образующийся под воздействием дождевых осадков, нивелирует участие подземного стока, что выражается не только в снижении концентраций литофильных элементов, но и привнесении в водный поток элементов, обычно мигрирующих с органическими комплексами наряду с Fe, в том числе значительных количеств Ti и относительно повышенных – Th и Zr.

На диффузный сток Fe и сопутствующих ему Zr, Th и Pb указывает более интенсивное, по сравнению с водами реки, увеличение концентраций этих элементов в дренажно-ливневых стоках. Очевидно, что к этой же ассоциации следует отнести и Ti.

Концентрация антропогенного TiO₂ в речных водах растет с увеличением городского стока, что может представлять повышенный риск для водных организмов [Nabi et al., 2023]. В связи с получением данных по р. Неглинке целесообразно проведение более детальных исследований миграции в поверхностных водах и смежных средах Ti и коррелирующих с ним элементов.

Значительное увеличение концентрации Zn в дренажно-ливневых стоках может объясняться локальными особенностями загрязнения. Вместе с тем миграция Zn может носить и более сложный

характер, а загрязнение в целом может быть связано с высоким (200–300 мг/кг) и очень высоким (>300 мг/кг) содержанием Zn в городских почвах [Климатические..., 2013] или с еще более впечатляющим его присутствием в асфальте дорожного покрытия (0,57 масс. % по фракции <1 мм) [Рыбаков, 2017].

Определение специфики загрязнения городских водных объектов является трудной задачей, поскольку повышение концентрации конкретного элемента может носить как природный, так и антропогенный характер. Например, содержание в почвах As, поступающего в речные воды как с дренажным, так и поверхностным стоком, достаточно велико не только на части территории Петрозаводска, но и на его окраинах, в относительно слабо нарушенных ландшафтах. В том числе в пределах водосбора реки оно очень часто достигает величин от 3 до 6 мг/кг и более [Климатические..., 2013].

ВЫВОДЫ

Элементный состав вод нижнего течения р. Неглинка в Петрозаводске в летний период нестабилен и обладает рядом особенностей, а именно:

1. Усредненные концентрации ПТЭ в межень превышают региональный фон: U (в 20,4–27,5 раза), Cu (6,4–6,5), Mo (6,0–6,6), Sb (5,8–6,5 и до 7,3), Ba (5,0–5,2 и до 7,4), Cd (4,0–5,8), Cr (3,9–5,1), P (3,6–5,1), Li (3,2–4,0), Ni (3,1–3,2), Co (2,2–2,6), Mn (1,9–3,2) и т. д.

2. Распределение Mg, Ca и K в водах реки соответствует опубликованным данным по катионному составу изливающихся на поверхность подземных вод. Зависимость распределения Fe и Na от гидрохимического состава подземных вод требует дополнительного анализа.

3. Концентрации ПТЭ значительно возрастают вследствие дождя: Ti (в 26,5 раза), Th, Zr (7,3), Zn (4,4), V, Ag, Sn (3,9), W (3,6), Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Sb (3,0–2,6), Ni (2,0) и т. д. Напротив, концентрации Mg, Ca, Na, Sr, U снижаются (в 1,3–1,1 раза).

4. Со стоками дренажно-ливневой канализации в реку в ее нижнем течении в сухую погоду поступает больше, чем присутствует в речных водах: K (в 3,1 раза), U, Ba, Na, V (2,2–2,0), P, Sr, Ni, Ca (1,9–1,5), после дождя – Zn (в 3,9 раза), P (2,0), K (1,6), Cu (1,5), а с общим речным потоком привносится больше, чем содержится в стоках: Pb, Mn, Fe (в 2,4–2,0 раза), Ag, Ti, Mo, Zr, Sb, Mg (1,9–1,5).

5. Сток в реку Zn во время дождя может происходить за счет как вымывания из городских почв, так и, возможно, выщелачивания из искусственных покрытий.

Благодарности. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН).

Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.
- Бородулина Г.С. Родники Карелии – природные объекты научного и социального значения // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 4(32). С. 53–65. DOI: 10.24852/2411-7374.2022.4.53.65.
- Водные объекты города Петрозаводска / под ред. А.В. Литвиненко, Т.И. Регеранд. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 109 с.
- Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
- Давыдова О.А., Климов Е.С., Ваганова Е.С. и др. Влияние физико-химических факторов на содержание тяжелых металлов в водных экосистемах / под ред. Е.С. Климова. Ульяновск: УлГТУ, 2014. 167 с.
- Добровольский В.В. Геохимическое землеведение. М.: ВЛАДОС, 2008. 208 с.
- Ерина О.Н., Терешина М.А., Борисычева М.С. и др. Анализ форм миграции потенциально токсичных элементов в р. Сетуни по результатам исследований 2019–2021 гг. / Международный симпозиум «Инженерная экология – 2023»: материалы (Москва, 5–7 дек. 2023 г.). Выпуск XII. Сер. Научные Международные симпозиумы. М., 2023. С. 203–206.
- Климатические и геохимические аспекты формирования экологических рисков в Республике Карелия / отв. ред. А.В. Яблоков. СПб.: ЭлекСис, 2013. 130 с.
- Лозовик П.А., Шкиперова О.Ф., Зобков М.Б. и др. Геохимические особенности поверхностных вод Карелии и их классификация по химическим показателям // Труды КарНЦ РАН. 2006. № 9. С. 130–143.
- Михайлов В.А., Лодыгин А.Н., Кушнеренко В.К. Особенности геологического строения и металлоносность Шуйско-Петрозаводской площади (Республика Карелия) // Региональная геология и металлогения. 2014. № 59. С. 61–69.
- Плохинский Н.А. Биометрия. М.: Изд-во МГУ, 1970. 364 с.
- Попов Ю.П., Конюшева Л.В. Олово в окружающей среде // Гигиена и санитария. 1983. № 9. С. 55–57.
- Рачкова Н.Г., Шапошникова Л.М. Формы нахождения урана в почве, поверхностных водах и донных отложениях района бывшего радиевого промысла // Успехи современного естествознания. 2019. № 10. С. 107–112. DOI: 10.17513/use.37222.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Ч. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 278 с.
- Рыбаков Д.С. Геоэкология Карелии: геохимический подход к проблемам оценки риска. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 313 с.
- Рыбаков Д.С., Крутских Н.В. Геоэкологические закономерности распределения молибдена и вольфрама при антропогенной трансформации геосистем Прионежья // Географический вестник. 2021. № 1(56). С. 81–95. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-1-81-95.
- Рыжков Л.П., Артемьева Н.В. Изменение биологического качества воды реки Неглинки – притока Онежского озера под влиянием антропогенной нагрузки // Эко-системы малых рек: биоразнообразие, биология, охрана: тезисы докладов Всероссийской конференции (16–19 ноября 2004, г. Борок). Борок, 2004. С. 75.
- Рыжков Л.П., Горохов А.В., Марченко Л.П. Трансформация химического состава вод реки Лоосинки под воздействием природных и антропогенных факторов // Ученые записки ПетрГУ. Сер. Естественные и технические науки. 2012. Т. 1. № 8. С. 20–24.
- Савичев О.Г., Домаренко В.А., Лепокурова О.Е. Пространственно-временные изменения вещественного состава донных отложений и речных вод Туганского россыпного узла (Томская область) // Известия РАН. Сер. Геогр. 2020. Т. 84. № 5. С. 715–727. DOI: 10.31857/S2587556620050143.
- Теканова Е.В., Макарова Е.М., Калинин Н.М. Экологическая оценка качества воды урбанизированного притока Онежского озера по химическим показателям // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 3(87). С. 75–84. DOI: 10.23968/2305-3488.2021.26.3.75-84.
- Томилина О.В., Паламарчук С.Ф., Яхнин Э.Я. и др. Геохимическое картирование севера европейской территории России в рамках международной программы «Экогеохимия Баренцева региона» и проведение опережающего этапа составления геохимических основ Госгеолкарты-1000 третьего поколения на листы Р-35, 36. Т. 2: Отчет о НИР / отв. исп. В.А. Чекушин. СПб., 2004. 146 с.
- Янин Е.П., Кузьмич В.Н., Иваницкий О.М. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. № 6. С. 3–72.
- Andronikov A.V., Novak M., Borodulina G.S. et al. One river, two streams: chemical and chromium isotopic features of the Neglinka River (Karelia, northwest Russia), *Hydrol. Sci. J.*, 2019, vol. 64, iss. 8, p. 974–982, DOI: 10.1080/02626667.2019.1617418.
- Chalov S., Platonov V., Erina O. et al. Rainstorms impacts on water, sediment, and trace elements loads in an urbanized catchment within Moscow city: case study of summer 2020 and 2021, *Theor. Appl. Climatol.*, 2023, vol. 151, iss. 1, p. 871–889, DOI: 10.1007/s00704-022-04298-9.
- Grubbs F.E. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples, *Technometrics*, 1969, vol. 11, no. 1, p. 1–21, DOI: 10.1080/00401706.1969.10490657.
- Khatri N., Tyagi S. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas, *Front. Life Sci.*, 2015, vol. 8, no. 1, p. 23–39, DOI: 10.1080/21553769.2014.933716.

Nabi M.M., Wang J., Baalousha M. Episodic surges in titanium dioxide engineered particle concentrations in surface waters following rainfall events, *Chemosphere*, 2021, 263:128261, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128261.

Электронные ресурсы

Двинских С.А. Факторы формирования и элементы химического состава поверхностных вод: учеб.-метод. пособие / ПГНИУ. Пермь, 2020. 77 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/dvinskix-factory-formirovaniya-i-elementy-xim-sostava-poverxnostnyx-vod.pdf> (дата обращения 15.09.2023).

Рекомендации Р 52.24.353–2012. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. Ростов н/Д, 2012. 36 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/692/4293792809.pdf> (дата обращения: 28.02.2024).

Терешина М.А., Ерина О.Н., Соколов Д.И. и др. Продольная трансформация загрязненности воды р. Сетуни / Современные проблемы водохранилищ и их водосборов (Пермь, 27–30 мая 2012 г.): труды VIII Всерос. научно-практ. конференции с международным участием. Пермь, 2021. С. 369–373. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45960774> (дата обращения 02.04.2024).

Поступила в редакцию 20.10.2023

После доработки 16.08.2024

Принята к публикации 26.11.2024

VARIABILITY OF TOXIC POLLUTION OF THE NEGLINKA RIVER IN PETROZAVODSK IN SUMMER

D.S. Rybakov

Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Geology, Laboratory of Geochemistry, Quaternary Geology and Geoecology, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: rybakovd@krc.karelia.ru

The article discusses an actual problem of surface water pollution. The aim of the work is to assess the influence of a variable urban environment on the elemental composition of river water. To achieve this goal, river water samples were taken in the lower reaches of the small Neglinka River, which flows through the territory of the town of Petrozavodsk and runs into the Onega Lake. Samples were taken on the same day (06.19.2023) before and after a short-term rainfall. Thereupon concentrations of 30 elements determined by the ICP-MS method were studied. These elements are most typical of an urbanized area and are important for its environmental assessment. The concentrations of 26 elements were compared with the regional background. The results indicate the pollution of river waters in urban conditions. The average concentrations of elements in dry weather exceeded the regional background: U (20.4–27.5 times), Mg (10.9–13.5), Na (11.4–11.7), Sr (6.7–6.9), Cu (6.4–6.5), Mo (6.0–6.6), Sb (5.8–6.5 and up to 7.3), Ba (5.0–5.2 and up to 7.4), Ca (4.8–5.3), K (4.4–4.9), Cd (4.0–5.8), Cr (3.9–5.1), P (3.6–5.1), Li (3.2–4.0), Ni (3.1–3.2), Co (2.2–2.6), Mn (1.9–3.2), etc. Background concentrations were not exceeded for Th and Fe. Different distribution of concentrations in river water at different sites was noted for a number of elements. The highest ratio of the maximum concentration to the minimum one was recorded for W ($C_{\max}/C_{\min}=7.5$). A sharp increase in concentrations of Ti, Th, Zn, V, Ag, Sn, W, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Sb, Ni, etc. was found after rainfall, as well as a decrease in Mg, Ca, Na, Sr and U. The results obtained are important for understanding the ecological and geochemical relationships within a natural-anthropogenic geosystem, as well as for environmental decisions-making.

Keywords: pollution of natural waters, urban river, rainfall, surface runoff, potentially toxic elements (PTE)

Acknowledgements. The research was financed from the federal funds allocated for the state assignment of the KarRC RAS (Institute of Geology of the KarRC RAS).

The studies were carried out on the scientific equipment of the Center for Collective Use of the Federal Research Center “Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences”.

REFERENCES

- Andronikov A.V., Novak M., Borodulina G.S. et al. One river, two streams: chemical and chromium isotopic features of the Neglinka River (Karelia, northwest Russia), *Hydrol. Sci. J.*, 2019, vol. 64, iss. 8, p. 974–982, DOI: 10.1080/02626667.2019.1617418.
- Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* [Tables of mathematical statistics], Moscow, Nauka Publ., 1983, 416 p. (In Russian)
- Borodulina G.S. Rodniki Karelii – prirodnye ob'ekty nauchnogo i sotsial'nogo znacheniya [Springs of Karelia – natural objects of scientific and social significance], *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii*, 2022, no. 4(32), p. 53–65, DOI: 10.24852/2411-7374.2022.4.53.65. (In Russian)
- Chalov S., Platonov V., Erina O. et al. Rainstorms impacts on water, sediment, and trace elements loads in an urbanized catchment within Moscow city: case study of summer

- 2020 and 2021, *Theor. Appl. Climatol.*, 2023, vol. 151, iss. 1, p. 871–889, DOI: 10.1007/s00704-022-04298-9.
- Davydova O.A., Klimov E.S., Vaganova E.S., Vaganov A.S. *Vliyanie fiziko-khimicheskikh faktorov na sodержanie tyazhelykh metallov v vodnykh ekosistemakh* [Influence of Physical-Chemical Factors on the Content of Heavy Metals in Aquatic Ecosystems], E.S. Klimov (ed.), Ulyanovsk, UISTU Publ., 2014, 167 p. (In Russian)
- Dobrovolskii V.V. *Geokhimicheskoe zemlevedenie* [Geochemical Earth Science], Moscow, VLADOS Publ., 2008, 208 p. (In Russian)
- Erina O.N., Tereshina M.A., Borisycheva M.S. et al. [Migration of potentially toxic elements in the Setun river in 2019–2021], *Materialy mezhdunar. simpoz. "Inzhener-naya ekologiya – 2023"* [Mat. Int. Symp. "Environmental engineering – 2023"], Moscow, 5–7 Dec. 2023, Moscow, 2023, p. 203–206. (In Russian)
- Gordeev V.V. *Rechnoi stok v okean i cherty ego geokhimii* [River runoff into the ocean and features of its geochemistry], Moscow, Nauka Publ., 1983, 160 p. (In Russian)
- Grubbs F.E. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples, *Technometrics*, 1969, vol. 11, no. 1, p. 1–21, DOI: 10.1080/00401706.1969.10490657.
- Khatri N., Tyagi S. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas, *Front. Life Sci.*, 2015, vol. 8, no. 1, p. 23–39, DOI: 10.1080/21553769.2014.933716.
- Klimaticheskie i geokhimicheskie aspekty formirovaniya ekologicheskikh riskov v Respublike Kareliya* [Climatic and geochemical aspects of environmental risks formation in the Republic of Karelia], D.S. Rybakov i dr. (auth.), A.V. Yablokov (ed.), St Petersburg, ElekSis Publ., 2013, 130 p. (In Russian)
- Lozovik P.A., Shkiperova O.F., Zobkov M.B., Platonov A.V. Geokhimicheskie osobennosti poverkhnostnykh vod Karelii i ikh klassifikatsiya po khimicheskim pokazatelyam [Geochemical properties of Karelian surface water and their classification by chemical parameters], *Trudy KarRC of RAS*, 2006, no. 9, p. 130–143. (In Russian)
- Mikhailov V.A., Lodygin A.N., Kushnerenko V.K. Osobennosti geologicheskogo stroeniya i metallonosnost' Shuiskko-Petrozavodskoi ploschadi (Respublika Kareliya) [Geological structural features and metal content of the Shuya-Petrozavodsk area (Republic of Karelia)], *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 2014, no. 59, p. 61–69. (In Russian)
- Nabi M.M., Wang J., Baalousha M. Episodic surges in titanium dioxide engineered particle concentrations in surface waters following rainfall events, *Chemosphere*, 2021, 263:128261, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128261.
- Plokhinskii N.A. *Biometriya* [Biometrics], Moscow, MGU Publ., 1970, 364 p. (In Russian)
- Popov Yu.P., Konyusheva L.V. Olovo v okruzhayushchei srede [Tin in the environment], *Gigiena i sanitariya*, 1983, no. 9, p. 55–57. (In Russian)
- Rachkova N.G., Shaposhnikova L.M. Formy nakhozheniya urana v pochve, poverkhnostnykh vodakh i donnykh otlozheniyakh raiona byvshego radiyevogo promysla [Uranium speciation in soils, surface waters and bottoms from former radium plant area], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, no. 10, p. 107–112, DOI:10.17513/use.37222. (In Russian)
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost'* [Surface water resources of the USSR: Hydrological studies], t. 2, Kareliya i Severo-Zapad, ch. 2, Lenin-grad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 278 p. (In Russian)
- Rybakov D.S. *Geokologiya Karelii: geokhimicheskii podkhod k problemam otsenki riska* [Geocology of Karelia: a geochemical approach to the problems of risk assessment], Petrozavodsk, KarRC of RAS Publ., 2017, 313 p. (In Russian)
- Rybakov D.S., Krutskikh N.V. Geoekologicheskie zakonomernosti raspredeleniya molibdena i vol'frama pri antropogennoi transformatsii geosistem Prionezh'ya [Geoecological regularities of the molybdenum and tungsten distribution during anthropogenic transformation of the geosystems of Prionezhye], *Geograficheskii vestnik*, 2021, no. 1(56), p. 81–95, DOI: 10.17072/2079-7877-2021-1-81-95. (In Russian)
- Ryzhkov L.P., Artem'eva N.V. [Changes in biological quality of the Neglinka River (tributary of Lake Onego) waters under anthropogenic load], tez. dokl. Vseros. konf. "Ekosistemy malyykh rek: bioraznoobrazie, biologiya, okhrana" [Abstracts of the All-Russian Conf. "Ecosystems of small rivers: biodiversity, biology, conservation"], Borok Publ., 2004, p. 75. (In Russian)
- Ryzhkov L.P., Gorokhov A.V., Marchenko L.P. Transformatsiya khimicheskogo sostava vod reki Lososinki pod vozdeystviem prirodnykh i antropogennykh faktorov [Transformation of Chemical Composition of the Waters of the Lososinka River Under the Effect of Natural and Anthropogenic Factors], *Uchenye zapiski PetrGU, Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2012, vol. 1, no. 8, p. 20–24. (In Russian)
- Savichev O.G., Domarenko V.A., Lepokurova O.E. Prostranstvenno-vremennye izmeneniya veshchestvennogo sostava donnykh otlozhenii i rechnykh vod Tuganskogo rossypnogo uzla (Tomskaya oblast') [Spatiotemporal Changes in River Waters and Bottom Sediments Composition Within the Tugan Placer Deposit (Tomsk Oblast)], *Izvestiya RAN, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 5, p. 715–727, DOI: 10.31857/S2587556620050143. (In Russian)
- Tekanova E.V., Makarova E.M., Kalinkina N.M. Ekologicheskaya otsenka kachestva vody urbanizirovannogo pritoka Onezhskogo ozera po khimicheskim pokazatelyam [Ecological assessment of water quality in the Onego Lake's urban tributary by chemical indicators], *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2021, no. 3(87), p. 75–84, DOI: 10.23968/2305-3488.2021.26.3.75-84. (In Russian)
- Tomilina O.V., Palamarchuk S.F., Yakhnin E.Ya., Egorov A.I. *Geokhimicheskoe kartirovanie severa evropeiskoi territorii Rossii v ramkakh mezhdunarodnoi programmy "Ekogeokhimiya Barentseva regiona" i provedenie opereshayushchego etapa sostavleniya geokhimicheskikh osnov Gosgeol'karty-1000 tret'ego pokoleniya na listy R-35, 36* [Geochemical mapping of the European north of Russia within the framework of the international program "Ecogeochemistry of the Barents Region" and the advanced stage of compiling geochemical foundations of the third generation of State Geological Map-1000, sheets R-35, 36], vol. 2, Sci. Report, V.A. Chekushin (resp. exec.), St Petersburg, 2004, 146 p. (In Russian)
- Vodnye ob'ekty goroda Petrozavodsk* [Water bodies of Petrozavodsk city], A.V. Litvinenko & T.I. Regerand (eds.), Petrozavodsk, KarRC of RAS Publ., 2013, 109 p. (In Russian)
- Yanin E.P., Kuz'mich V.N., Ivanitskii O.M. Regional'naya prirodnyaya neodnorodnost' khimicheskogo sostava pov-

erkhnostnykh vod sushi i neobkhodimost' ee ucheta pri otsenkakh ikh ekologicheskogo sostoyaniya i intensivnosti tekhnogenogo zagryazneniya [Regional natural heterogeneity of the chemical composition of surface waters and the need to take it into account when assessing their ecological state and the intensity of technogenic pollution], *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnykh resursov*, 2016, no. 6, p. 3–72. (In Russian)

Web sources

- Dvinskikh S.A. *Factory formirovaniya i elementy khimicheskogo sostava poverkhnostnykh vod: ucheb.-metod. posob.* [Factors of formation and elements of the chemical composition of surface waters], Perm, PGNIU Publ., 2020, 77 p., URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/dvinskix-factory-formirovaniya-i-elementy-xim-sostava-poverkhnostnyx-vod.pdf> (access date 15.09.2023). (In Russian)
- Rekomendatsii R 52.24.353–2012. Otkor prob poverkhnostnykh vod sushi i ochishchennykh stochnykh vod [Sampling of land surface water and treated wastewater], Rostov-na-Donu: Rosgidromet, FGBU “GKhI”, 2012, 36 p., URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/692/4293792809.pdf> (access date 28.02.2024). (In Russian)
- Tereshina M.A., Erina O.N., Sokolov D.I. et al. [Longitudinal patterns of different pollutant concentrations in the Setun River], *Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov* [Modern problems of reservoirs and their catchments] (Perm, 27–30 May 2012), Perm, PGNIU Publ., 2021, p. 369–373, URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/modern-problems-of-reservoirs-and-their-catchments.pdf> (access date 02.04.2024) (In Russian)

Received 20.10.2023

Revised 16.08.2024

Accepted 26.11.2024

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.535.5

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕДКИХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ
ЛЕДОВЫХ ЗАТОРОВ НА РЕКЕ ПЕЧОРЕ**

С.М. Иглин¹, В.М. Морейдо², К.И. Головнин³

¹⁻³ *Институт водных проблем РАН, лаборатория гидроинформатики*

¹ *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: iglin.sm@bk.ru*

² *Ст. науч. сотр., зав. лаб., канд. геогр. наук; e-mail: vsevolod.moreydo@iwp.ru*

³ *Инж.; e-mail: golovnin98@bk.ru*

Редкие гидрологические явления, как следует из названия, характеризуются малой повторяемостью, что, наряду с их зачастую катастрофическими проявлениями для человека, также говорит о малой доле измерений, сопровождающих эти события (что называется дисбалансом классов). Это, в свою очередь, мешает создавать надежные модели для прогнозирования таких процессов и особенно проявляется при построении моделей природных процессов с использованием алгоритмов машинного обучения, которым свойственна чувствительность к таким выборкам, проявляющим дисбаланс классов. В настоящем исследовании предпринята попытка обойти высказанные ограничения путем дополнения ряда для обучения моделей искусственно сгенерированными событиями. В качестве предмета и объекта исследований были выбраны, соответственно, долгосрочные прогнозы ледовых заторов, происходящих в устье Печоры – арктической реки европейской территории России. За длительный период наблюдений были собраны данные о ледовых заторах, подобраны предикторы и модели. Были использованы алгоритмы машинного обучения: k ближайших соседей (KNN), логистическая регрессия, градиентный бустинг (CatBoost) и многослойный перцептрон (MLP). Результаты показывают, что все модели после применения дополнения ряда искусственными событиями показали прирост качества моделирования. Это подтверждает перспективность метода дополнения ряда для обучения моделей редко повторяющихся процессов.

Ключевые слова: прогнозирование ледовых заторов, дисбаланс классов, машинное обучение, балансировка классов

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.6

ВВЕДЕНИЕ

Экстремальные гидрологические события, наносящие максимальный урон, как правило, находятся в области редкой повторяемости. Освещенность таких событий данными наблюдений зачастую недостаточна, так как в процессе их прохождения оказывается экстремальное воздействие на наблюдательные системы, вплоть до выхода их из строя. По определению, такие события лежат в области низкой обеспеченности, и количество данных об интересующих нас характеристиках в ряду наблюдений может составлять не более 1%. В мировой практике такие ряды наблюдений принято называть несбалансированными (imbalanced dataset [Bourel et al., 2021; Wang et al., 2024]). Использование таких рядов данных для настройки параметров моделей машинного обучения может

приводить к неудовлетворительным результатам расчетов, поскольку выборка данных недостаточна для надежного снижения ошибки моделирования. Наиболее ярко эта особенность несбалансированных рядов может проявляться в задачах классификации, когда требуется определить вероятность возникновения экстремального события по набору входных данных. В настоящее время разработаны несколько подходов к балансировке классов в рядах для обучения моделей классификации, один из которых (SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique [Chawla et al., 2002]) мы применили к задаче бинарной классификации в настоящей статье. К числу таких задач относится и определение вероятности возникновения ледовых заторов при прохождении весеннего половодья на реках с устойчивым ледоставом.

Ледовые заторы являются одним из наиболее опасных гидрологических явлений, в особенности характерным для рек бассейна Северного Ледовитого океана, верховьям которых свойственно более раннее начало весеннего ледохода. Возникновение ледовых заторов часто приводит к стремительному подъему уровня воды, а выход льда на берег также сопровождается повреждениями и разрушениями. Наиболее катастрофические заторы в России наблюдались в таких городах, как Великий Устюг, Котлас, Ленск, Томск, Якутск.

Прогнозирование ледовых заторов является довольно сложной задачей, что связано прежде всего с механизмом их формирования под воздействием множества факторов, таких как морфология русла, речной сток во время ледохода, осенний шугоход, температура воздуха и количество оттепелей за зимний период, сумма твердых осадков и т. д. [Бузин, 2004; Агафонова, Фролова, 2007]. Разработано множество методик оценки вероятности развития затора, учитывающих различные группы факторов [Козлов и др., 2015]. Однако на практике исследователям этих явлений часто приходится сталкиваться с неполнотой исходных данных для построения прогностических моделей. Кроме того, отсутствует четкий критерий определения факта наличия затора. Наблюдениями обычно охвачены только участки реки в непосредственной близости от гидрологического поста, а регулярные авиаразведки в последнее время являются редкостью и данные по ним, как правило, недоступны. В силу отмечающихся в последние годы климатических изменений, разработанные для других условий методики прогноза, требуют существенной переработки [Методические рекомендации..., 2004].

К настоящему времени имеется ряд довольно успешных примеров применения методов машинного обучения для прогнозирования ледовых заторов [Малыгин, 2014; Малыгин, Алешин, 2022; Сумачев и др., 2024]. Во многих из них, ввиду недостатка информации о ледовых явлениях, большое значение имеют данные метеорологических наблюдений. При этом, как правило, используются данные ближайшей метеостанции, атмосферного реанализа или их сочетание [Малыгин, Алешин, 2022]. Среди моделей машинного обучения применяются как простые методы: k ближайших соседей (*K Nearest Neighbors*), дерево решений (*Decision Tree, DT*), так и ансамблевые алгоритмы, например случайный лес (*Random Forest, RF*) [Малыгин, Алешин, 2022]. Особенно следует отметить нейронные сети, из которых наиболее распространены модели с архитектурой многослойного перцептрона (*Multi-layer perceptron, MLP*) [Агафонова и др., 2016; Guo et al., 2018; Wang et al., 2019; Graf et al., 2022]. Выбор ме-

тодики определяется как особенностями объекта исследования, так и исходными данными. Как упоминалось выше, при прогнозе ледовых заторов часто приходится сталкиваться с малой повторяемостью прогнозируемого события, что может быть связано как с экстремальным характером явления (затор, вызвавший катастрофическое наводнение), так и с редкой повторяемостью самого события (на участке поста) или недостаточной частотой наблюдений. Следовательно, для построения модели на этапе предобработки требуется приведение исходных данных к сопоставимому количеству наблюдений с наличием и отсутствием события (балансировка классов). Сочетание методов балансировки классов, подбора на кросс-валидации наиболее оптимальных гиперпараметров и вероятностного порога помогает моделям машинного обучения определять классы целевой переменной в случае сильного дисбаланса с более высокой точностью.

В данной работе была опробована процедура балансировки обучающей выборки SMOTE [Chawla et al., 2002] для разработки метода прогнозирования возникновения ледовых заторов на устьевом участке Печоры с использованием различных моделей машинного обучения, что во многом позволило добиться удовлетворительных результатов определения вероятности возникновения затора.

В первой части статьи дана краткая характеристика заторообразования в устье Печоры, его гидрологической изученности и описаны имеющиеся данные наблюдений за ледовыми явлениями. Вторая часть посвящена используемым материалам – данным метеорологических наблюдений, методам предобработки исходных данных, построению моделей прогноза и анализу полученных результатов. В заключении приведена оценка результатов, сделаны выводы о выявленных особенностях и преимуществах рассматриваемых методов для прогнозирования редких событий, намечены перспективы дальнейших исследований.

Объект исследования. Несмотря на широкое распространение в Северном полушарии на реках, текущих с юга на север [Природные опасности России, 2001], в значительной мере ледовым заторам подвержены устьевые участки рек в арктической зоне. Хотя в целом частота заторов на крупных реках от верховий к устьям уменьшается и весеннее половодье в устьях имеет более плавный ход развития, протяженность заторов в нижнем течении может достигать существенных масштабов, а морфометрические факторы, такие как сложная структура гидрографической сети и снижение уклонов русла также способствуют накоплению льда во время весеннего ледохода [Василенко, Банщикова, 2010; Сумачев и др. 2024]. Для устьев рек, в том числе

и в Арктической зоне, как правило, характерна высокая степень хозяйственного освоения, следовательно, наводнения и другие опасные и неблагоприятные явления заторного генезиса могут приводить к значительным ущербам [Магрицкий и др., 2024]. К подобным объектам относится и устье Печоры, которое было взято в качестве тестового объекта в настоящем исследовании. Как упоминалось ранее, имеющейся информации о ледовых заторах в устье Печоры недостаточно для полного представления о закономерностях их формирования [Магрицкий и др., 2024]. Хотя, согласно результатам периодических исследований [Лупачев, 1979], ледовые заторы в устье Печоры происходят практически каждый год, данные ежегодников свидетельствуют только о менее чем 50% повторяемости заторов, что также объясняется недостаточным пространственным охватом и частотой наблюдений за ледовыми явлениями (53% у села Ермицы и 21% у села Оксина) [Сумачев, Банщикова, 2021]. Ледовые заторы в устье Печоры не всегда приводят к катастрофическим последствиям: хотя вклад заторной составляющей максимальных уровней половодья может быть достаточно высок (до 2,2 м) [Михайлов, 1997], часто превышения критических отметок наблюдались в отсутствие затора или свободный ото льда период [Михайлов, Магрицкий, 2011].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подготовка исходных данных. В исследовании были использованы метеорологические и гидрологические данные. Использованные метеорологические данные были взяты с метеостанции Нарьян-Мар (индекс ВМО 23205) и включали среднесуточную, минимальную и максимальную температуру воздуха, сумму осадков за сутки за 1926–2022 гг. [Архив погоды..., 2024].

Гидрологические данные о наличии или отсутствии ледовых заторов относятся к участку устьевой области Печоры от гидрологического поста Оксина (индекс 70827, 141 км от морского края дельты) до морского гидрологического поста Осколково (индекс 70841, 53 км от устья).

На основе исходных данных были сформированы признаки, или предикторы, определяющие наличие или отсутствие затора (табл. 1). Признаки формировались на один календарный месяц с шагом по времени до семи месяцев назад, а также рассчитаны средние многолетние значения признаков на один месяц вперед. Следует отметить, что признаки в настоящем исследовании не включали гидрологические характеристики, такие как уровень и расход воды, толщину льда и т. п. Это было сделано в силу двух обстоятельств: 1) наличие таких данных было ограничено как по времени, так и по

Таблица 1

Сформированные признаки для каждого месяца

Признак	Единица измерения
Средняя температура	°C
Минимальная температура	°C
Сумма минимальных температур	°C
Максимальная температура	°C
Сумма максимальных температур	°C
Сумма осадков	мм
Максимальное количество осадков	мм
Количество дней с суммой осадков более 1 мм	ед.
Количество дней с суммой осадков более 10 мм	ед.
Разница между максимальной и минимальной температурой	°C
Количество дней со среднесуточной температурой ниже 0°C	ед.
Количество дней со среднесуточной температурой выше 0°C	ед.
Сумма отрицательных температур	°C
Сумма положительных температур	°C
Количество дней с среднесуточной отрицательной температурой и наличием осадков	ед.
Сумма квадратов отрицательных температур	°C ²
Сумма квадратов положительных температур	°C ²
Сумма осадков в дни с отрицательными температурами	мм
Сумма квадратов среднесуточных температур	°C ²
Сумма квадратов суточного количества осадков	мм ²
Количество переходов через 0°C	ед.
Среднее изменение среднесуточных температур	°C
Среднее изменение суточного количества осадков	мм

составу; 2) модель создавалась только с целью проверки алгоритма балансировки имеющихся данных наблюдений, а не для рекомендаций по внедрению в оперативную практику.

Целевая переменная представляла собой закодированное бинарное значение наличия затора в следующем месяце (1 – затор наблюдался, 0 – затор не наблюдался). Отбор признаков, оказывающих влияние на целевую переменную, производился на основе корреляционного анализа с отбрасыванием тех признаков, у которых коэффициент корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена менее 0,15. Итоговый размер сформированного набора данных составляет 1162×61 (1162 события, 60 признаков, 1 целевая переменная).

Основной задачей в настоящей работе являлась разработка прогноза наличия (1) или отсутствия (0) ледового затора на рассматриваемом участке устья Печоры. Исходные данные по целевой переменной имеют выраженный дисбаланс классов: число событий, когда заторы отсутствовали (1141 событие), значительно превышает количество самих заторов (23 события). В таком случае первый класс (также называемый мажоритарным) имеет существенно больший вес, и обучение модели для выявления событий второго класса (миноритарного) практически невозможно. Существуют различные способы решения такой проблемы [Bourel et al., 2021; Chawla et al., 2002], одним из них является балансировка классов: уменьшение числа объектов преобладающего класса (*downsampling*) или, напротив, увеличение числа меньшего (*oversampling*). В нашем случае ввиду небольшого объема исходных данных был выбран второй способ, в ходе выполнения которого в пространстве признаков генерируются новые объекты класса редких событий (в данном случае, ледовых заторов). Эта процедура была основана на алгоритме синтетического увеличения числа миноритарного класса (Synthetic minority over-sampling technique – SMOTE [Chawla et al., 2002]). Суть его заключается в искусственном генерировании случайного события из миноритарного класса в пространстве признаков. С этой целью для каждого из имеющихся событий методом ближайшего соседа выбираются k ближайших событий, анализируются расстояния (в пространстве признаков) до них, после чего каждое из этих расстояний умножается на случайную величину в диапазоне от 0 до 1, чтобы определить положение дополнительных сгенерированных событий. Количество ближайших соседних событий k является одним из параметров оптимизации. Такой подход позволяет генерировать дополнительные события внутри выборки уже имеющихся. Сгенерированные синтетические события добавляются к исходному набору данных, пока соотношение миноритарного и мажоритарного классов

не станет 1:1. Пример балансировки представлен на рис. 1. Процедура *oversampling* (SMOTE) применялась только для части данных, используемой для обучения модели.

Модели. Были опробованы различные алгоритмы машинного обучения, среди которых классификация методом ближайших соседей (*K-Nearest Neighbors – KNN*), логистическая регрессия (*Logistic Regression*), градиентный бустинг (*Catboost*) и многослойный перцептрон (*Multi-Layer perceptron, MLP*). Для построения моделей машинного обучения использовались библиотеки *sklearn* [Pedregosa et al., 2011] и *Catboost* [Catboost..., 2024] языка программирования *Python*, *imblearn* [Imblearn..., 2024] для балансировки классов, *optuna* [Optuna..., 2024] для подбора гиперпараметров моделей. Обучение моделей, анализ и визуализация результатов выполнялись в среде разработки *Jupyter Notebook*. Полученные алгоритмы доступны в публичном репозитории [Github..., 2024].

Для всех моделей на обучение отводилось 80% исходных данных, на тестирование – оставшиеся 20%. Для определения параметров процесса обучения моделей (гиперпараметров моделей) применялась процедура кросс-валидации обучающей выборки также на 80 и 20% (всего пять блоков). В обучающую выборку попало 18 событий с ледовыми заторами, в тестовую выборку пять событий.

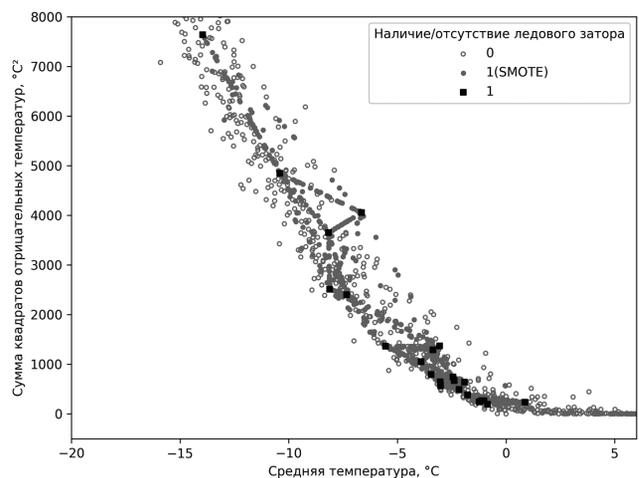


Рис. 1. Пример балансировки набора данных с помощью алгоритма SMOTE в пространстве двух признаков:

0 – отсутствие затора; 1 – заторное событие по данным наблюдений; 1(SMOTE) – искусственно сгенерированные алгоритмом SMOTE события наличия заторов

Fig. 1. Illustration of SMOTE dataset balancing within two-dimensional feature space:
0 – no congestion; 1 – congestion event according to observations;
1(SMOTE) – congestion events artificially generated by the SMOTE algorithm

В зависимости от используемой модели машинного обучения в ходе кросс-валидации определялись следующие гиперпараметры. Для всех моделей, кроме модели градиентного бустинга деревьев решений (Catboost), проводилось предварительное масштабирование данных. Для этого использовались алгоритмы StandardScaler (стандартизация, вычитание выборочного среднего и деление на выборочное стандартное отклонение), RobustScaler (вычитание выборочного медианного значения и деление на выборочный межквартильный интервал), MinMaxScaler (вычитание минимального значения выборки и деление на выборочный размах). В качестве гиперпараметра использовалось количество k ближайших соседей (от 4 до 10), до которых в алгоритме SMOTE оценивалось расстояние, на котором генерировались новые события. Для каждого алгоритма классификации также подбирались значения характерных для них гиперпараметров. Например, для модели KNN также подбиралось число ближайших соседей (1–15), тип определения значимости (весов) соседей: равнозначно (uniform) или в зависимости от расстояния (distance), а также метрика расстояний до них: евклидово (euclidean), манхэттенское (manhattan), минковского (minkowski).

Для модели Logistic Regression подбирались метод (L1 или регуляризация Тихонова L2) и коэффициент регуляризации (0,001–1000). Для модели деревьев решений Catboost подбирались количество деревьев (100–1000), глубина дерева (4–10), минимальный размер выборки для формирования листа (1–100) и скорость обучения (0,001–0,5). Для искусственной нейронной сети MLP подбирался размер скрытого слоя (32–512 нейронов), функция активации (identity, relu, logistic, tanh), скорость обучения (0,0001–0,01), коэффициент регуляризации (0,00001–0,01).

Одним из гиперпараметров моделей был вероятностный порог – это минимальное значение вероятности, при превышении которого объект относится к классу «затор». Пороговое значение также подбиралось на кросс-валидации обучающей выборки с помощью библиотеки Optuna. Слишком высокий порог может привести к игнорированию значимых положительных примеров, в то время как слишком низкий – к увеличению числа ложных срабатываний.

Итоговая последовательность процедур по подбору гиперпараметров, обучению, валидации и тестированию моделей представлена на рис. 2.

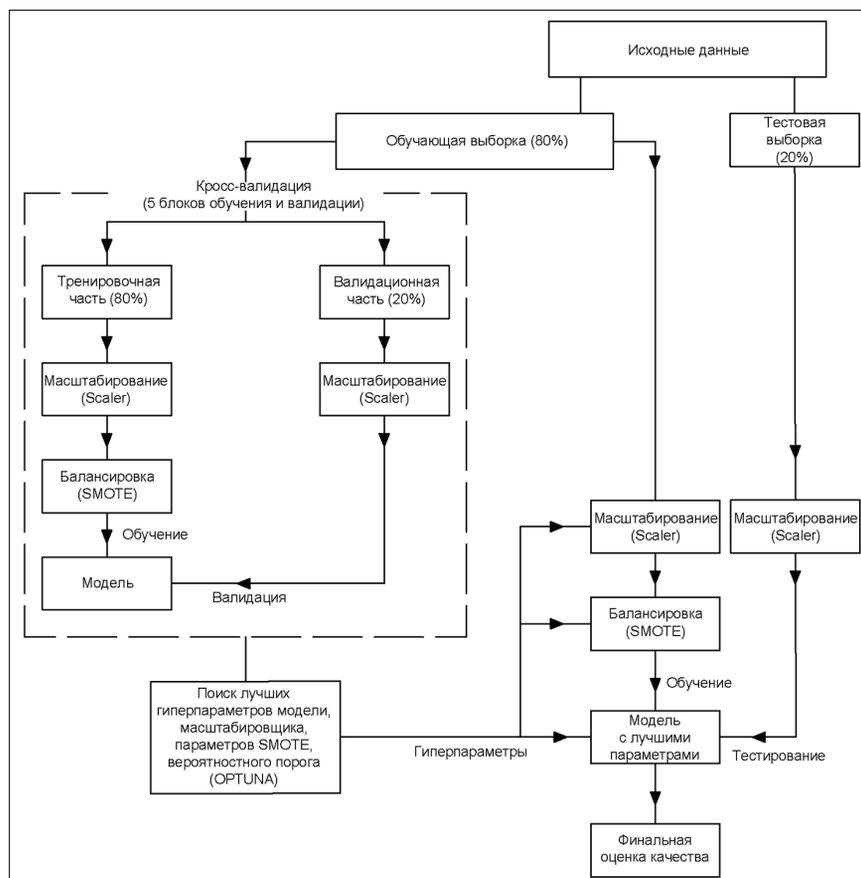


Рис. 2. Принципиальная схема по подбору лучших гиперпараметров, обучению, валидации и тестирования моделей

Fig. 2. Flowchart of hyperparameter optimization, model fit, validation and testing

Метрики оценки качества. Первичной оценкой в задачах классификации является вычисление матрицы ошибок (табл. 2). На ее основе рассчитываются показатели условной вероятности правильных прогнозов событий, которые показывают различные аспекты качества создаваемой модели. Так, по матрице ошибок рассчитывается показатель точности (Precision) (1), определяемый как доля правильных прогнозов среди всех прогнозов наступления события, и показатель полноты определения (Recall) (2), определяемый как отношение правильных прогнозов заторов ко всем наблюдавшимся заторам. Значения обоих показателей определены на отрезке [0, 1], где 0 – наихудший показатель, 1 – наилучший. В свою очередь, точность и полнота могут быть выражены в единой метрике F1-score (3), представляющей собой их среднее гармоническое. Для настоящего исследо-

вании F1-score является наиболее оптимальной метрикой оценки качества, так как в ней совмещаются задачи максимизирования истинных положительных предсказаний (TP) и минимизирования значений ложных положительных срабатываний (FP) и ложных отрицательных предсказаний (FN). Значения F1-score находятся на отрезке от 0 до 1, причем 1 – наилучшее качество классификации, 0 – наихудшее.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (1)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (2)$$

$$F1\text{-score} = 2 \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}, \quad (3)$$

Таблица 2

Матрица ошибок прогноза заторов

		Наблюдения	
		Затор (1)	Нет затора (0)
Прогноз	Затор (1)	Верный прогноз затора (true positive – TP)	Ошибочный прогноз затора (false positive – FP)
	Нет затора (0)	Ошибочный прогноз отсутствия затора (false negative – FN)	Верный прогноз отсутствия затора (true negative – TN)

Оценка важности признаков моделей. Оценка важности признаков выполнена для модели логистической регрессии через анализ коэффициентов перед переменными X . Каждый коэффициент указывает на величину и направление влияния соответствующего признака на вероятность отнесения объекта к одному из классов. Если коэффициент положителен, то увеличение значения признака повышает вероятность отнесения объекта к положительному классу; если отрицателен – вероятность снижается.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Табл. 3 отражает результаты оценки F1-score для четырех моделей: CatBoost, KNN, MLP и логистической регрессии на валидационной (validation) и тестовой (test) выборках. Оценка производилась на различных подходах: 1) модели с параметрами по умолчанию по исходному ряду; 2) применение метода балансировки выборки (SMOTE); 3) использование SMOTE с оптимизацией гиперпараметров и вероятностного порога.

Без применения методов балансировки данных все модели, за исключением MLP и KNN, показали нулевые значения F1-score как на валидационной, так и на тестовой выборке. Это обусловлено сильной несбалансированностью исходного набора данных, в результате чего модели не смогли эффективно обучиться для прогноза редкого класса – наличия затора. MLP и KNN, однако, дали F1-score 0,258 и 0,080 на валидационной выборке соответственно.

Применение метода SMOTE для балансировки выборки улучшило результаты всех моделей, за исключением Catboost, которая продолжила показывать нулевые значения F1-score как на валидационной, так и на тестовой выборках. Результаты по моделям KNN и MLP значительно улучшились после применения SMOTE, F1-score достигла на валидационной выборке 0,333 и 0,258 соответственно, хотя на тестовой выборке KNN показал нулевое значение F1-score, тогда как MLP сохранил значение 0,333. Это указывает на ограниченную обобщающую способность KNN на тестовой выборке при использовании только SMOTE. Результаты по логистической регрессии также улучшились, F1-score достигла 0,250

на валидационной выборке и 0,000 на тестовой, что указывает на сложность обобщения модели с синтетически сбалансированными данными.

Наиболее значительные улучшения были достигнуты при использовании SMOTE в сочетании с оптимизацией гиперпараметров и вероятностного порога. По всем моделям произошел рост показателей: Catboost, ранее показывавший нулевые результаты, достиг F1-score 0,403 на валидационной и 0,286 на тестовой выборке. Хотя результат на тестовой выборке остался сравнительно низким, это указывает на опре-

деленное улучшение способности модели к обобщению после оптимизации. Результаты KNN также улучшились, F1-score вырос до 0,459 на валидации и 0,444 на тесте, что подтверждает положительный эффект от оптимизации. Результаты использования логистической регрессии также улучшились, F1-score принял значение 0,336 на валидационной и 0,444 на тестовой выборке. Значительное улучшение отмечено для MLP: F1-score составил 0,430 на валидации и 0,500 на тесте, что подтверждает пользу от подбора гиперпараметров для обобщающей способности модели.

Таблица 3

Результаты оценки моделей по метрике F1-score на валидационной и тестовой выборке

Модель	С параметрами по умолчанию по исходному ряду		SMOTE		Подбор гиперпараметров + SMOTE + вероятностный порог	
	valid	test	valid	test	valid	test
Catboost	0,000	0,000	0,000	0,000	0,403	0,286
KNN	0,080	0,000	0,333	0,000	0,459	0,444
MLP	0,258	0,333	0,258	0,333	0,430	0,500
Logistic Regression	0,183	0,000	0,250	0,000	0,336	0,444

Таблица 4

Дополнительные метрики оценки качества моделей на тестовой выборке со SMOTE, подбором лучших параметров и вероятностного порога

Модель	Recall	Precision	TN	FP	FN	TP
CatBoost	0,400	0,222	221	7	3	2
KNN	0,400	0,500	226	2	3	2
MLP	0,400	0,667	227	1	3	2
Logistic Regression	0,800	0,308	219	9	1	4

Табл. 4 содержит результаты четырех моделей (Catboost, KNN, MLP, Logistic Regression) по основным метрикам классификации: Recall (полнота), Precision (точность), а также по количеству истинных отрицаний (TN), ложных положительных срабатываний (FP), ложных отрицательных предсказаний (FN) и истинных положительных предсказаний (TP). Эти метрики позволяют оценить качество работы моделей в задаче классификации ледовых заторов.

Модели Catboost, KNN и MLP сумели предсказать каждая по два затора из пяти, представленных в тестовой выборке, однако у них наблюдается разное количество ложноположительных срабатываний (FP). У модели MLP наблюдается наименьшее количество ложноположительных срабатываний на тестовой выборке (FP = 1, Precision = 0,667).

Модель логистической регрессии показывает сбалансированные результаты, достигая высокой полноты (Recall = 0,800), но достаточно низкой точ-

ности (Precision = 0,308). Модель правильно классифицировала 219 примеров без заторов (TN), совершив девять ложных положительных ошибок (FP), и допустила одну ложную отрицательную ошибку (FN). Она правильно распознала четыре из пяти заторов (TP).

График результата подбора наилучшего вероятностного порога на валидационной и тестовой выборках с балансировкой SMOTE и лучшими гиперпараметрами по модели логистической регрессии представлен на рис. 3. Наилучший F1-score на валидационной выборке был достигнут при значении вероятностного порога в 77–79%. Библиотека Optuna подобрала лучший порог в 78% отношения объекта классификации к классу «1». Подбор порога позволяет балансировать между точностью (precision) и полнотой (recall), что особенно важно для миноритарного класса. Лучший порог в 78% также позволяет добиться наилучших результатов и на тестовой выборке.

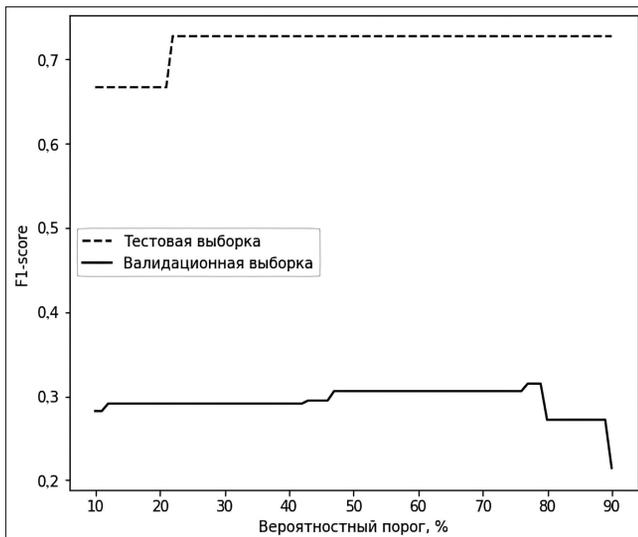


Рис. 3. График зависимости F1-score от вероятностного порога на валидационной и тестовой выборке по модели логистической регрессии со SMOTE и лучшими параметрами

Fig. 3. F1-score dependency from probability threshold on validation and test subsets for logistic regression model with SMOTE preprocessing and best parameter set

Рис. 4 содержит весовые коэффициенты 20 самых важных признаков, полученных с помощью логистической регрессии для задачи прогнозирования ледовых заторов на тестовой выборке со SMOTE, лучшими гиперпараметрами и значением вероятностного порога. Признаки с положительными весовыми коэффициентами влияют на вероятность отношения к классу «1», т. е. вносят большой вклад в наличие ледового затора в следующем месяце. В свою очередь признаки с отрицательными коэффициентами влияют на вероятность отношения к

классу «0», т. е. вносят большой вклад в отсутствие ледового затора в следующем месяце. Наиболее важными являются признаки, определяющие температуру воздуха в текущем и следующем месяцах, а также шесть месяцев назад, т. е. относятся к характеристикам периода ледостава. Также согласно рис. 4 отмечается важность среднего изменения суточного количества осадков шесть месяцев назад, т. е. в период ледостава. Признаки, сформированные на текущий месяц, имеют отрицательные весовые коэффициенты, а за следующий месяц – положительные (см. рис. 4). Признаки, представленные на рис. 3, соответствуют факторам, определяющим наличие ледовых заторов на различных изучаемых объектах [Massie et al., 2003; Wang et al., 2019; Семенова и др., 2020]. Следует отметить, что набор признаков включает не все возможные переменные, в том числе отсутствуют признаки, ответственные за речной сток и состояние ледового покрова, наблюдаемые на гидрологических постах. Это обстоятельство иллюстрирует тот факт, что примененные в исследовании алгоритмы позволяют добиться удовлетворительных результатов прогнозов на используемом материале, а также открывает дополнительные перспективы для продолжения исследований на более обширном материале.

ВЫВОДЫ

В статье продемонстрирована целесообразность использования методов предварительной балансировки данных и оптимизации параметров при работе с несбалансированными выборками. Без применения процедуры SMOTE большинство моделей не смогли справиться с задачей классификации ледовых заторов, показав в основном нулевые значения метрики F1-score.

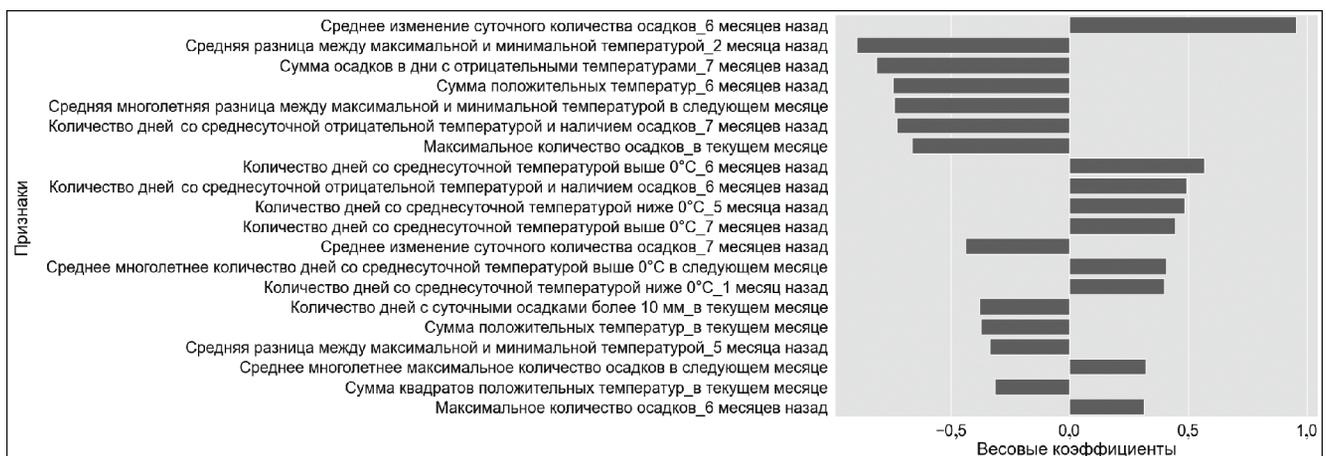


Рис. 4. Весовые коэффициенты признаков модели логистической регрессии на тестовой выборке со SMOTE, лучшими параметрами и вероятностным порогом

Fig. 4. Weight coefficients of logistic regression model features for a test subset with SMOTE preprocessing, best parameter set and probability threshold

Применение SMOTE совместно с оптимизацией гиперпараметров моделей и подбором вероятностного порога выделения события ледового затора значительно улучшило результаты прогнозирования его возникновения с заблаговременностью 1 месяц.

Перспективами развития этой задачи будет являться добавление новых признаков о водности реки, ледовых явлениях, расширения географии поиска событий заторов на весь устьевой участок. Дополнительными перспективами иссле-

дований может быть также применение других методов машинного обучения, таких как LSTM и Transformer.

Использование алгоритма балансировки классов SMOTE важно для задач с несбалансированными данными, так как оно помогает увеличить количество примеров редкого класса за счет создания синтетических образцов и улучшить обучение моделей машинного обучения. Это может быть полезно в задачах классификации и предсказания редких гидрологических явлений.

Благодарность. Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0003 государственного задания ИВП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агафонова С.А., Василенко А.Н., Фролова Н.Л. Факторы образования ледовых заторов на реках бассейна Северной Двины в современных условиях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 2. С. 82–90.
- Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины // Водные ресурсы. 2007. № 2. С. 141–149.
- Бузин В.А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. 203 с.
- Василенко Н.Г., Банищикова Л.С. Оперативная оценка участков образования заторов льда и их параметров // Лед и снег. 2010. № 2(110). С. 61–65.
- Козлов Д.В., Бузин В.А., Фролова Н.Л. и др. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России: монография / под ред. Д.В. Козлова. М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. 2015. 348 с.
- Луначев В.Г. Ледовые заторы на реке Печоре и их прогнозирование // Метеорология и гидрология. 1979. № 4. С. 45–51.
- Магрицкий Д.В., Агафонова С.А., Банищикова Л.С. и др. Гидрологические опасности в устье Печоры // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 2. С. 185–209. DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-2-185-209.
- Малыгин И.В. Методика прогноза образования ледовых заторов на реках на основе теории распознавания образов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 3. С. 43–47.
- Малыгин И.В., Алешин И.М. Прогнозирование заторов льда на р. Лене методами машинного обучения // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 3. С. 18–26. DOI: 10.21455/GPB2022.3-3.
- Методические рекомендации по предотвращению образования ледовых заторов на реках Российской Федерации и борьбе с ними. М.: ФЦ ВНИИ ГОЧС, 2004. 234 с.
- Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В. Новое в исследовании экстремальных гидрологических процессов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2011. № 6. С. 108–109.
- Михайлов В.Н. Заторные явления на реках России // Водные ресурсы. 1997. Т. 24. № 3. С. 345–353.
- Природные опасности России. Т. 5. Гидрометеорологические опасности / под ред. Г.С. Голицына, А.А. Васильева. М.: КРУК, 2001. 480 с.
- Семенова Н.К., Сазонов А.А., Крыленко И.Н. Прогнозирование возможности образования заторов льда с помощью методов машинного обучения // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сб. докладов Междунар. науч. конф. Санкт-Петербург, 23–31 октября 2020 г. СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 358–361.
- Сумачев А.Э., Банищикова Л.С. Ледовый режим реки Печоры в современных климатических условиях и принципы прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода // Успехи современного естествознания. 2021. № 10. С. 75–80. DOI: 10.17513/use.37701.
- Сумачев А.Э., Банищикова Л.С., Грига С.А. Применение методов обучения искусственных нейронных сетей при прогнозировании высших уровней воды на примере рек Двинско-Печорского бассейнового округа // Метеорология и гидрология. 2024. № 4. С. 104–115. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-4-104-115.
- Bourel M., Segura A.M., Crisci C. et al. Machine learning methods for imbalanced data set for prediction of faecal contamination in beach waters, *Water Research*, 2021, vol. 202, DOI: 10.1016/j.watres.2021.117450.
- Chawla N.V., Bowyer K.W., Hall L.O. et al. SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique, *J. Artif. Intell. Res.*, 2002, vol. 16, p. 321–357, DOI: 10.1613/jair.953.
- Graf R., Kolarski T., Zhu S. Predicting ice phenomena in a river using the artificial neural network and extreme gradient boosting, *Resources*, 2022, vol. 11, no. 12, 29 p.
- Guo X., Wang T., Fu H. et al. Ice-jam forecasting during river breakup based on neural network theory, *Journal of Cold Regions Engineering*, 2018, vol. 32, iss. 3, p. 04018010, DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000168.
- Massie D.D., White K.D., Daly S.F. Application of neural networks to predict ice jam occurrence, *Cold Reg. Eng.*, 2002, vol. 35, no. 2, p. 0–122, DOI: 10.1016/s0165-232x(02)00056-3.
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, no. 85, p. 2825–2830.
- Wang T., Guo X., Fu H. et al. Breakup ice jam forecasting based on neural network theory and formation factor, *E-proceedings of the 38th IAHR World Congress*, Pan-

- ama City, September 1–6, 2019, Panama, IAHR, 2019, p. 2488, DOI: 10.3850/38WC092019-0641.
- Wang H., Meng Y., Xu H. et al. Prediction of flood risk levels of urban flooded points through using machine learning with unbalanced data, *J. Hydrol.*, 2024, vol. 630, p. 130742, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.130742.
- Wu Y., Ding Y., Feng J. SMOTE-Boost-based sparse Bayesian model for flood prediction, *J. Wireless Com. Network*, 2020, vol. 78, DOI: 10.1186/s13638-020-01689-2.
- Wu Y., Yukai D., Feng J. Sparse Bayesian flood forecasting model based on SMOTEBoost, *2019 International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, Atlanta, GA, USA, 2019, p. 279–284, DOI: 10.1109/iThings/GreenCom/CPSCom/SmartData.2019.00067.
- Электронные источники
 Архив погоды в Нарьян-Маре. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=23205> (дата обращения 01.06.2024).
- Catboost – высокопроизводительная библиотека с открытым исходным кодом для градиентного бустинга на деревьях решений. URL: <https://catboost.ai/> (дата обращения: 02.08.2024).
- Imblearn: библиотека. URL: <https://imbalanced-learn.org/> (дата обращения 02.08.2024).
- Optuna: фреймворк оптимизации гиперпараметров. URL: <https://optuna.readthedocs.io/> (дата обращения 02.08.2024).
- Sklearn: машинное обучение на Python. URL: <https://scikit-learn.org/stable/> (дата обращения 02.08.2024).
- Github. URL: https://github.com/SergeyIglin/ML_rarehydroevents_with_smote (дата обращения 16.10.2024).

Поступила в редакцию 19.10.2024
 После доработки 15.11.2024
 Принята к публикации 26.11.2024

FORECASTING RARE HYDROLOGICAL EVENTS BY MACHINE LEARNING METHODS: CASE STUDY OF ICE JAMS ON THE PECHORA RIVER

S.M. Iglin¹, V.M. Moreido², K.I. Golovnin³

^{1–3} *Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Hydroinformatics*

¹ *Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: iglin.sm@bk.ru*

² *Senior Scientific Researcher, Head of the Laboratory, Ph.D. in Geography; e-mail: vsevolod.moreido@iwp.ru*

³ *Engineer; e-mail: golovnin98@bk.ru*

Rare hydrological events, as the name suggests, occur quite infrequently, but are often catastrophic for humans. They are also inadequately provided with measurements (the so-called class imbalance). In its turn, this hinders the creation of reliable models for predicting such processes. This is especially evident when constructing models of natural processes using machine learning algorithms, which are particularly sensitive to class-imbalanced samples. The study attempts to overcome the above-mentioned limitations by supplementing a series for model training with artificially generated events. The subject and object of the study were long-term forecasts of ice jams occurring at the mouth of the Pechora River in the Arctic area of the European Russia. Data on ice jams were collected over a long period of observations, and applicable predictors and models were selected. The following machine learning algorithms were used: *k*-nearest neighbors (KNN), logistic regression, gradient boosting (CatBoost), and multilayer perceptron (MLP). As a result all models demonstrated higher quality of modeling after supplementing artificial events to a series. This confirms the prospects of the method of series supplementing for training models of rarely occurring processes.

Keywords: ice jam forecasting, class imbalance, machine learning, class balancing

Acknowledgements. The study was carried out under the state task of the RAS Institute of Water Problems, theme no. FMWZ-2022-0003.

REFERENCES

- Agafonova S.A., Frolova N.L. Specific features of ice regime in rivers of the Northern Dvina Basin], *Water Resources*, 2007, no. 2, p. 123–131.
- Agafonova S.A., Vasilenko A.N., Frolova N.L. Faktory obrazovaniya ledovyh zatorov na rekah bassejna Severnoj Dviny v sovremennyh usloviyah [The present-day factors of ice jam formation on the rivers of the Severnaya Dvina River Basin], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 2, p. 82–90. (In Russian)
- Bourel M., Segura A.M., Crisci C. et al. Machine learning methods for imbalanced data set for prediction of faecal contamination in beach waters, *Water Research*, 2021, vol. 202, DOI: 10.1016/j.watres.2021.117450.
- Buzin V.A. Zatory l'da i zatornye navodneniya na rekah [Ice Jams and Ice Jam Floods on Rivers], St Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2004, 203 p. (In Russian)
- Chawla N.V., Bowyer K.W., Hall L.O. et al. SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique, *J. Artif. Intell. Res.*, 2002, vol. 16, p. 321–357, DOI: 10.1613/jair.953.

- Goroshkova N.I., Zavadskij A.S., Krylenko I.N. et al. Opasnye ledovye javlenija na rekah i vodohranilishhah Rossii: Monografija [Dangerous Ice Phenomena on Rivers and Reservoirs of Russia: A Monography], D.V. Kozlov (ed.), Moscow, RGAU-MSHA im. K.A. Timirjazeva Publ., 2015, 348 p. (In Russian)
- Graf R., Kolarski T., Zhu S. Predicting ice phenomena in a river using the artificial neural network and extreme gradient boosting, *Resources*, 2022, vol. 11, no. 12, 29 p.
- Guo X., Wang T., Fu H. et al. Ice-jam forecasting during river breakup based on neural network theory, *Journal of Cold Regions Engineering*, 2018, vol. 32, iss. 3, p. 04018010, DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000168.
- Lupachev V.G. Ledovye zatory na reke Pechore i ih prognozirovanie [Ice Jams on the Pechora River and Their Forecasting], *Meteorologija i gidrologija*, 1979, no. 4, p. 45–51. (In Russian)
- Magrickij D.V., Agafonova S.A., Bانشhikova L.S. et al. Gidrologicheskie opasnosti v ust'e Pechory [Hydrological hazards at the mouth of the Pechora River], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2024, vol. 70, no. 2, p. 185–209, DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-2-185-209. (In Russian)
- Malygin I.V. Metodika prognoza obrazovanija ledovyh zatorov na rekah na osnove teorii raspoznavanija obrazov [Forecasting of ice clogging in rivers using the theory of image recognition], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 3, p. 43–47. (In Russian)
- Malygin I.V., Aleshin I.M. Prognozirovanie zatorov l'da na r. Lene metodami mashinnogo obuchenija [Forecasting ice jams on the Lena River using machine learning methods], *Geofizicheskie processy i biosfera*, 2022, vol. 21, no. 3, p. 18–26, DOI: 10.21455/GPB2022.3-3. (In Russian)
- Massie D.D., White K.D., Daly S.F. Application of neural networks to predict ice jam occurrence, *Cold Reg. Eng.*, 2002, vol. 35, no. 2, p. 0–122, DOI: 10.1016/s0165-232x(02)00056-3.
- Metodicheskie rekomendacii po predotvrashheniju obrazovanija ledovyh zatorov na rekah Rossijskoj Federacii i bor'be s nimi* [Methodological recommendations for preventing and mitigating ice jams formation on the rivers of the Russian Federation and its counteraction], Moscow, FC VNII GOChS Publ., 2004, 234 p. (In Russian)
- Mihajlov V.N. Zatornye javlenija na rekah Rossii [Ice jam phenomena on the rivers of Russia], *Vodnye resursy*, 1997, vol. 24, no. 3, p. 345–353. (In Russian)
- Mihajlov V.N., Magrickij D.V. Novoe v issledovanii ekstremal'nyh gidrologicheskikh protsessov [New approaches in the investigation of extreme hydrological processes], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2011, no. 6, p. 108–109. (In Russian)
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, no. 85, p. 2825–2830.
- Prirodnye opasnosti Rossii, t. 5, Gidrometeorologicheskie opasnosti* [Natural hazards of Russia, vol. 5, Hydrometeorological hazards], G.S. Golitsyn, A.A. Vasil'ev (eds.), Moscow, KRUK Publ., 2001, 480 p. (In Russian)
- Semenova N.K., Sazonov A.A., Krylenko I.N. [Forecasting the possibility of ice jam formation using machine learning methods], *Chetvertye Vinogradovskie chtenija. Gidrologija ot poznaniya k mirovozzreniju* [Hydrology from understanding to thinking], St Peterburg, 23–31 oktjabrja 2020 g. St Peterburg, Izdatel'stvo VVM Publ., 2020, p. 358–361. (In Russian)
- Sumachev A.Je., Bانشhikova L.S. Ledovyj rezhim reki Pechory v sovremennyh klimaticheskikh uslovijah i principy prognozirovanija vysshego urovnja vody za period vesennego ledohoda [Ice regime of the Pechora River under modern climatic conditions and principles of forecasting the highest water level during the spring ice drift], *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya*, 2021, no. 10, p. 75–80, DOI: 10.17513/use.37701. (In Russian)
- Sumachev A.Je., Bانشhikova L.S., Griga S.A. Primenenie metodov obuchenija iskusstvennyh neyronnyh setej pri prognozirovanii vysshih urovnjev vody na primere rek Dvinsko-Pechorskogo bassejnovogo okruga [Using neural network methods for peak water level prediction: a case study for the Dvina-Pechora basin rivers], *Meteorologija i gidrologija*, 2024, no. 4, p. 104–115, DOI: 10.52002/0130-2906-2024-4-104-115. (In Russian)
- Vasilenko N.G., Bانشhikova L.S. Operativnaja ocenka uchastkov obrazovanija zatorov l'da i ih parametrov [Operational Evaluation of Ice Jams Origin Sites and Their Parameters], *Led i sneg*, 2010, no. 2(110), p. 61–65. (In Russian)
- Wang H., Meng Y., Xu H. et al. Prediction of flood risk levels of urban flooded points through using machine learning with unbalanced data, *J. Hydrol.*, 2024, vol. 630, p. 130742, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.130742.
- Wang T., Guo X., Fu H. et al. Breakup ice jam forecasting based on neural network theory and formation factor, *E-proceedings of the 38th IAHR World Congress*, Panama City, September 1–6, 2019, Panama, IAHR, 2019, p. 2488, DOI: 10.3850/38WC092019-0641.
- Wu Y., Ding Y., Feng J. SMOTE-Boost-based sparse Bayesian model for flood prediction, *J. Wireless Com. Network*, 2020, vol. 78, DOI: 10.1186/s13638-020-01689-2.
- Wu Y., Yukai D., Feng J. Sparse Bayesian flood forecasting model based on SMOTEBoost, *2019 International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, Atlanta, GA, USA, 2019, p. 279–284, DOI: 10.1109/iThings/GreenCom/CPSCom/SmartData.2019.00067.

Web sources

- Arhiv pogody v Narian-Mare [Weather archive in Narian-Mar] (In Russian), URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=23205> (access date 01.06.2024).
- Catboost – high-performance open source library for gradient boosting on decision trees, URL: <https://catboost.ai/> (access date: 02.08.2024).
- Imblearn: library, URL: <https://imbalanced-learn.org/> (access date 02.08.2024).
- Optuna: a hyperparameter optimization framework, URL: <https://optuna.readthedocs.io/> (access date 02.08.2024).
- Sklearn: Machine Learning in Python, URL: <https://scikit-learn.org/stable/> (access date 02.08.2024).
- Github, URL: https://github.com/SergeyIglin/ML_rarehydroevents_with_smote (access date 16.10.2024).

Received 19.10.2024
Revised 15.11.2024
Accepted 26.11.2024

ПРЯМОЛИНЕЙНЫЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫЕ РУСЛА: МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ И ТИПИЗАЦИЯ

Р.С. Чалов¹, Г.Б. Голубцов², А.А. Куракова³

^{1–3}Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева

¹Кафедра гидрологии суши, проф., д-р геогр. наук; e-mail: rschalov@mail.ru

²Мл. науч. сотр.; канд. геогр. наук; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

³Мл. науч. сотр.; канд. геогр. наук; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

Относительно прямолинейные неразветвленные русла, несмотря на наименьшую долю среди русел других морфодинамических типов, что обусловлено неустойчивостью прямолинейного движения потока, в последние десятилетия стали объектами исследования с точки зрения их морфологии, динамики и условий формирования, в том числе на конкретных реках, из-за сложностей, возникающих при решении водохозяйственных и водотранспортных проблем. Несмотря на кажущееся их однообразие и относительно слабую интенсивность русловых переформирований, они характеризуются определенными морфологическими различиями, связанными главным образом с параметрами русел, их водностью и неодинаковыми условиями формирования. Прямолинейные русла могут как образовывать самостоятельный тип и связанные с ними морфологически однородные участки в широкопойменном, адаптированном и врезанном русле, так и встречаться в виде небольших участков («вставок») между смежными излучинами в меандрирующем русле, в пойменно-русловых разветвлениях, в рукавах сопряженных и одиночных разветвлений. Прямолинейные «вставки» являются составной частью сложных сундучных (трапециевидных) излучин, в которых они разделяют верхний вынужденный изгиб русла на подходе к ведущему коренному берегу или уступу высокой, редко затопляемой поймы, и нижерасположенную излучину с верхним крылом возле коренного берега.

С учетом всех факторов составлена полная классификация прямолинейных русел, определены условия их формирования, особенности деформаций и возможности оптимального управления русловыми процессами для обеспечения устойчивости водного пути, гидротехнических сооружений и работы водохозяйственных объектов.

Ключевые слова: русловые процессы, типизация, морфодинамика русел, рукава, излучины, трансформация русел, устойчивость русел

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.7

ВВЕДЕНИЕ

Прямолинейные неразветвленные русла – один из трех основных морфодинамических типов русел, но, в отличие от меандрирующих (извилистых) и разветвленных на рукава, не имеющих широкого распространения на реках. В пределах Северной Евразии (в границах бывшего СССР) [Русловой режим..., 1994] доля прямолинейных русел, образующих морфологически однородные участки, составляет среди рек с широкопойменным руслом ($B_n > 2...3b_p$; здесь B_n – ширина поймы, b_p – ширина русла) 7,4%, среди рек с врезанным руслом – 6,8% от общей длины рек протяженностью более 500 км, нашедших отражение на карте «Русловые процессы на реках СССР» [1990]. Причины этого заключаются в неустойчивости прямолинейного движения потока [Замышляев, 1982, 1983; Чалов, 2011; Сидорчук, 2015], воздействии на него неровностей ведущих

берегов, крупных грядовых макроформ руслового рельефа и других по отношению к потоку факторов, обуславливающих образование его изгиба или разделения на ветви течения [Davis, 1913; Маккавеев, 1971; Чалов, 2011]. Поэтому для закрепления изначальной прямолинейности потока в форме русла необходимы дополнительные условия (расположение вдоль ведущего коренного берега, малый сток руслообразующих наносов, высокая подвижность побочной и осередков, повышенные уклоны русла, заложение русел по линиям геологических структур в области распространения скальных пород), достаточно освещенные в литературе [Жуковский, 1948; Schumm, 1977; Callander, 1969; Parker, 1976; Замышляев, 1982; Иванов, 1989; Чалов, 2011], включающей анализ трансформации прямолинейных русел в извилистое или разветвленное и основные особенности их деформаций. В то же время, ссыла-

ясь на относительно малую встречаемость и неустойчивость прямолинейного движения потока, прямолинейные русла как морфодинамический тип были исключены из типизации русловых процессов ГГИ [Кондратьев и др., 1982], вошедшей в нормативные документы по учету русловых процессов и использованию речных ресурсов. В ней они подменены оценкой руслового рельефа и грядового движения наносов (ленточно-грядовые, побочные, осередковые русла). При этом вне классификационной схемы оказались, например, плесовые, глубокие, на значительном протяжении прямолинейные участки русел, хотя в более ранних работах [Кондратьев и др., 1959; Попов, 1961] были выделены среди четырех типов русел по их переформированиям во времени прямолинейные участки русел, смещающиеся «параллельно самим себе на значительном протяжении» (подробный критический анализ и сопоставление отечественных и зарубежных классификаций русел и типизации русловых процессов дан в работе [Чалов, 2008]).

При кажущемся однообразии прямолинейных неразветвленных русел существуют определенные морфологические различия между ними в зависимости от условий, в которых они формируются на малых, средних и больших реках, при неодинаковом стоке и крупности руслообразующих наносов в широкопойменном и врезанном руслах и их устойчивости, т. е. интенсивности русловых деформаций; образование в них форм русла второго и третьего порядков, выровненности или наличия выступов и мысов ведущих коренных берегов и т. д. Кроме того, наряду с морфологически однородными участками прямолинейности характерна для рукавов различных типов и структурных уровней развития разветвлений русел; небольшим, сравнительно коротким отрезком между смежными излучинами меандрирующих (извилистых рек) и островами разветвленных русел. По существу, прямолинейными являются русла рек с одно- или двусторонними разветвлениями, в которых встречаемость прибрежных протоков и рукавов вдоль одного или обоих берегов составляет в совокупности не более 10–15%, тогда как в основном русле сосредоточен основной расход воды, и его переформирования осуществляются так же, как в прямолинейном неразветвленном русле. Однако такие короткие участки рассматриваются обычно как составные части разветвленного или извилистого меандрирующего русла. Например, на нижней Оби, от устья Иртыша на протяжении 324 км, выделяется морфологически однородный участок, представленный одиночными разветвлениями. Их здесь 15,

занимающих 42,8% длины участка; имеется также параллельно-рукавное разветвление длиной 21 км (6,4%). Остальная часть – прямолинейные участки русла – их 18, каждый длиной в среднем по 9 км.

Наличие таких участков на реках с другими типами русла и в рукавах разветвленных русел существенно увеличивают долю прямолинейных русел, хотя их учет в общей статистике не может сопровождаться снижением доли разветвлений и извилистых русел. Следствием такого отношения к прямолинейным неразветвленным руслам является отражение в классификациях [Линь Чэнькуань, 1963; Проектирование..., 1964; Гришанин, 1972; Ржаницын, 1985; Шэнь Юйчан, Гун Гоюань, 1986] только самого их существования (в отличие от других типов, которые подразделяются на несколько разновидностей или подтипов). Даже в наиболее полной классификации русел МГУ [Чалов, 2008] они показаны лишь отдельно для врезанных, адаптированных и широкопойменных русел, а в последних выделено две их разновидности – с двусторонней поймой или вдоль коренных берегов. Это отражает общую слабую изученность прямолинейных русел. Если о меандрирующих или разветвленных руслах имеется обширная литература, рассматривающая их с позиций морфологии, динамики и гидравлики потока, условий формирования и т. д., то собственно прямолинейным, кроме упомянутой выше статьи В.С. Замышляева [1982], связавшего этот тип русла с неустойчивостью прямолинейного движения потока было посвящено только специальное исследование В.В. Иванова (1989), результаты которого дали импульс к тому, что в последние годы на них стали обращать внимание и выявлять особенности деформаций при изучении русловых процессов на конкретных реках, результаты которых нашли отражение в многочисленных публикациях сотрудников МГУ по Лене, Оби, Иртышу, Волге, Северной Двине, Печоре и др.

Задача настоящей статьи – обосновать полную классификацию прямолинейных неразветвленных русел, как создающих на реках их морфодинамические типы и морфологически однородные участки, так и встречающихся в виде сравнительно коротких отрезков между излучинами и разветвлениями, определяющих тип русла в рукавах разветвлений, показать условия и основные схемы их деформаций с учетом различий геолого-геоморфологической обстановки, гидрологического режима и стока наносов. Последние уже были учтены при выявлении географических закономерностей распространения прямолинейных русел и составлении соответствующей мелкомасштабной карты.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы для анализа условий формирования, морфологии и динамики прямолинейных неразветвленных русел получены при выполнении многолетних исследований русловых процессов на реках Северной Евразии (в пределах бывшего СССР), начиная с 1957 г., ряда зарубежных стран (Китай, Польша, Монголия) и из литературных источников. За последние годы в исследованиях на Лене, Оби, Иртыше, Северной Двине акценты были сделаны на изучение морфодинамики и гидравлики потока прямолинейных русел. Состав и методика русловых исследований подробно описаны во многих публикациях, как региональных по конкретным рекам, так и обобщающих их результаты. При этом широко использовались для ретроспективного анализа речных переформирований карты русел рек (бывшие лотманские), регулярно составляемых на судоходные реки, на некоторых из них начиная с конца XIX в., и зафиксировавших состояние русел на разные временные срезы, космические снимки, топографические карты, аэрофотоснимки. Все это позволило разработать общую морфодинамическую классификацию речных русел и русловых деформаций [Чалов, 2008], которая была существенно уточнена и детализирована применительно к каждому типу русла [Чалов, 2021; Чалов и др., 2023].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена полная классификация относительно прямолинейных неразветвленных русел, включающая (в верхней части рисунка) создающие морфодинамические его типы и морфологически однородные участки на реках (в нижней части рисунка), образующие короткие участки («вставки») между отдельными разветвлениями или смежными излучинами, конфигурацию рукавов разветвлений и пойменных протоков, составляющих пойменную многорукавность. В зависимости от свободных или ограниченных условий развития русловых деформаций прямолинейные русла могут быть, как и другие морфодинамические типы русла, широкопойменными, адаптированными и врезанными. При этом врезанные прямолинейные русла, формирующиеся в условиях распространения скальных грунтов (рис. 2) и дефицита руслообразующих наносов, как правило, являются плесовыми (скопления наносов в виде гряд-макроформ, образующих мелководья – перекаты отсутствуют), в которых изменения отметок дна обуславливаются неровностями коренного ложа вплоть до образования порогов и шивер (подводных скальных выступов, перегораживающих реку до половины и более ширины ее русла).

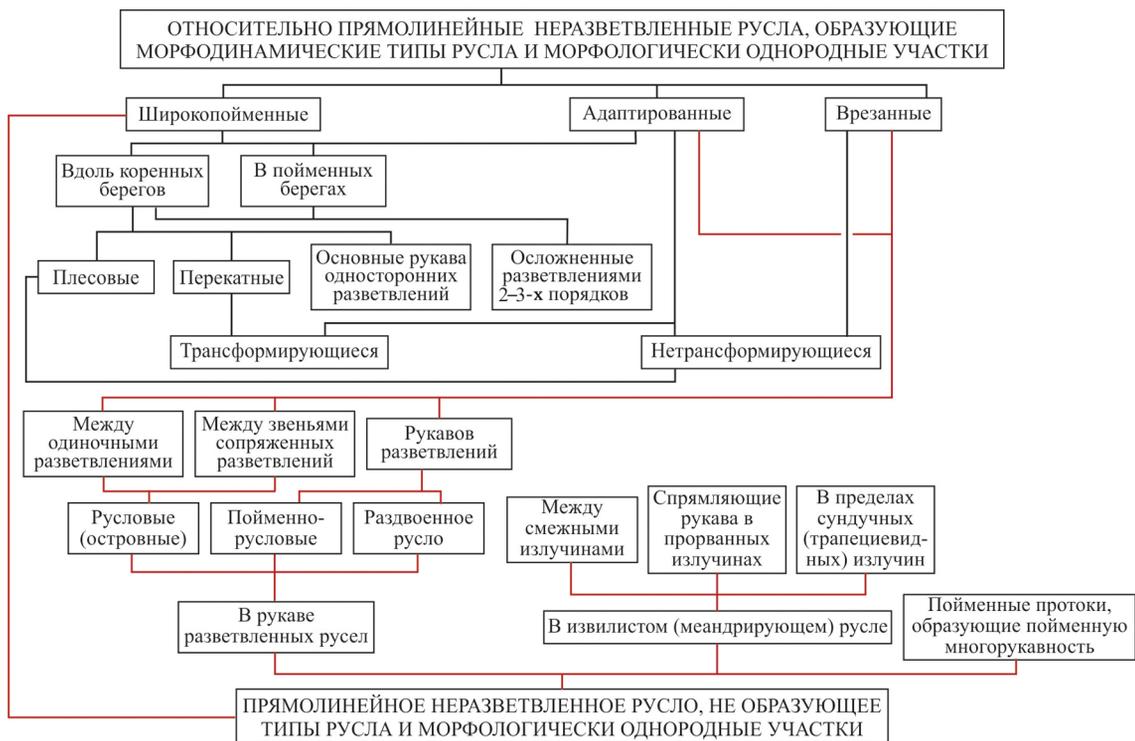


Рис. 1. Классификация относительно прямолинейных неразветвленных русел, образующих морфологически однородные участки и прямолинейных «вставок» в меандрирующих и разветвленных руслах

Fig. 1. Classification of relatively straight, unbranched channels that form morphologically homogeneous sections, and straight “insertions” in meandering and branched channels



Рис. 2. Врезанное прямолинейное русло верхнего Алдана, формирующееся в скальных грунтах (гранитах, гнейсах). Фото Р.С. Чалова

Fig. 2. The incised rectilinear channel of the Upper Aldan River, formed in massive rocks (granites, gneisses). Photo by R.S. Chalov

В областях, сложенных пластичными трудноразмываемыми грунтами, врезанные прямолинейные русла встречаются значительно реже. В обоих случаях они относятся к категории нетрансформирующихся, сохраняющих свою форму и конфигурацию на протяжении геологических отрезков времени, и, с точки зрения русловых процессов, являются практически недеформируемыми. Изменения их береговых линий происходят за счет склоновых процессов, провоцируемых воздействием на берега потока в многоводные фазы водного режима. Вертикальные деформации (врезание) осуществляются благодаря корродирующему эффекту перемещаемых наносов на коренное скальное ложе, а также его биохимическому разрушению [Добровольская, 1980; Чалов, 2008].

Адаптированные прямолинейные русла формируются в узких речных долинах ($b_p > B_n < 3b_p$ на больших, $b_p > B_n < 5-7b_p$ на малых и средних реках [Чалов, 2008]), являются как нетрансформируемыми, если располагаются вдоль ведущего коренного берега при односторонней пойме, или трансформируемыми, преобразующимися, хотя и в течение продолжительного времени, в процессе русловых деформаций в пологие излучины, вершины которых касаются бортов долины (незавершенное меандрирование, по ГГИ [Кондрачев и др., 1982]) или при относительно большой ширине русла (по И.Ф. Карасеву [1975] при

$$\theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda} > 9,5, \lambda = 2g/C^2, C = \frac{1}{n} h^{1/6},$$

где h – глубина русла, λ – коэффициент гидравлических сопротивлений, n – коэффициент шероховатости русла), которая характерна для рек с плотными пластичными грунтами дна, по которым «скольз-

ит» (выражение Н.И. Маккавеева [Маккавеев и др., 1971]) поток, не в состоянии их размывать и углубляться в них.

Основные разновидности широкопойменных прямолинейных неразветвленных русел также определяются их положением относительно ведущего коренного берега, возле него или в пойменных берегах. Наличие коренного берега у реки предполагает возникновение в многоводную фазу режима при затоплении поймы из-за одностороннего перекоса водной поверхности такой структуры потока, при которой донные струи, наиболее насыщенные наносами и перемещающие их во влекомом состоянии, отклоняются в направлении понижения ее отметок, т. е. в сторону затопленной поймы. Это обуславливает аккумуляцию наносов и образование отмелей возле пойменного берега и размыв русла, его углубление и формирование глубоких плесов возле коренного берега [Проектирование судовых ходов..., 1964], но при условии его относительной выровненности (рис. 3Б).

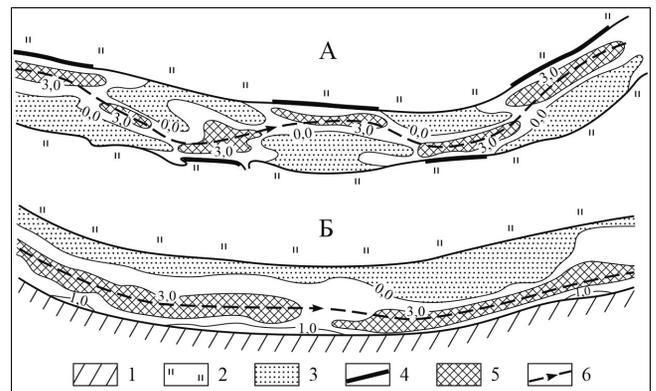


Рис. 3. Разновидности прямолинейного широкопойменного русла: А – перекатного в условиях двусторонней поймы – р. Вычегда; Б – имеющего плесовый характер возле ведущего коренного берега – р. Северная Двина (1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – размываемые берега; 5 – плесовые ложины; 6 – стрежень потока)

Fig. 3. Types of rectilinear wide-floodplain channel: А – riffle within a two-sided floodplain – the Vychegda River; Б – of a reach character near the leading bedrock bank – the Northern Dvina River (1 – bedrock bank; 2 – floodplain; 3 – channel shallows; 4 – eroded banks; 5 – reach hollows; 6 – mainstream)

Изгиб ведущего берега, наличие в нем выступов и мысов (возникающих также при сходе крупных оползней или обвалов) сопровождаются образованием ниже их побочня (отмели), что является потенциальной возможностью формирования излучины или разветвления, если побочень оказывается отделенным от берега побочной протокой. В результате прямолинейное русло трансформируется

в извилистое или разветвленное. На это впервые обратил внимание еще в начале XX в. Н.Н. Жуковский [1948]. На больших и особенно на крупнейших реках, у которых изгибы коренного ведущего берега (стрела прогиба его вогнутости) относительно ширины русла невелики (не более $\frac{1}{4}$), развитие излучины или формирование разветвления не происходит. Но в этом случае при большом стоке наносов русло приобретает перекаточный характер. Рост побочня ниже изгиба коренного берега происходит до тех пор, пока кривизна меженного потока возле него не достигнет критических значений ($l/L \approx 1,6$), причем стрежень потока достигает нередко противоположного пойменного берега, вызывая его размыв. В этом случае побочень отторгается от коренного берега, и поток вновь перемещается к нему, после чего процесс развития извилины повторяется (рис. 4).

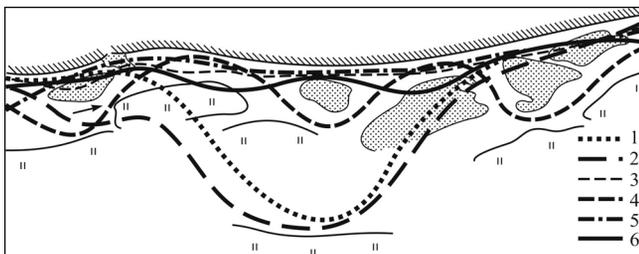


Рис. 4. Переформирования прямолинейного русла левого рукава одностороннего разветвления верхней Оби на участке ниже устья Чарыша на протяжении XX в.: 1 – 1936 г.; 2 – 1960 г.; 3 – 1970 г.; 4 – 1977 г.; 5 – 1991 г.; 6 – 1994 г.

Fig. 4. Reformation of a straight channel of the left arm of one-way branching of the Upper Ob River below the mouth of the Charysh River during the 20th century: 1 – 1936; 2 – 1960; 3 – 1970; 4 – 1977; 5 – 1991; 6 – 1994

Однако само регулярное возвращение потока к коренному берегу приводит к временной стабилизации русла и общему его углублению, вследствие чего это явление получило название «правило ведущего берега», которое широко используется при выправлении русел этого типа на судоходных реках [Проектирование судовых ходов..., 1964]. На реках с относительно устойчивым руслом и выровненными очертаниями коренных берегов это приводит к стабилизации русла в целом и улучшению условий судоходства (так было осуществлено выправление русла нижней Вычегды на ряде участков в 1960-е гг., сказывающееся до настоящего времени). На верхней Оби (ниже устья р. Чарыша), где аналогом прямолинейного русла является левый основной рукав (80–90% стока реки) односторонних разветвлений, проходящий вдоль 100-метрового уступа Предалтайского степного плато, неровного в плане и с регулярно сходящими оползнями. Периодиче-

ское развитие побочней у левого коренного берега обуславливает необходимость своевременного искусственного их отторжения посредством разработки дноуглубительных прорезей в сравнительно небольших объемах. В последние 30–35 лет этого не делалось, и участок реки стал перекастным, превратившись в один из самых затруднительных для содержания водного пути.

Расположение русла возле коренного берега, даже при периодическом развитии побочней, отклонение стрежня потока к пойме и последующее их отторжение обеспечивает направленное в течение исторических и даже геологических отрезков времени смещение русла, хотя и медленно, в сторону коренного берега (параллельно самому себе) и развитие односторонней поймы с параллельно-грядистым рельефом [Чернов, 1983; Чалов, 2011], а на реке с односторонними разветвлениями – ложбинно-островной с ориентировкой гряд (бывших островов) параллельно руслу.

На реках с другими типами русла подход его в процессе переформирования к коренному берегу также приводит к стабилизации русла в этом положении и трансформации меандрирующего или разветвленного (рукава в припойменной части реки мелеют и отмирают) русла в относительно прямолинейное неразветвленное. Так произошло, например, на верхней Оби. Рельеф правобережной поймы выше и ниже г. Барнаула свидетельствует о меандрировании реки в период ее активного формирования. В настоящее время русло здесь или прямолинейное неразветвленное, или с односторонними разветвлениями, в котором маловодные второстепенные протоки проходят вдоль поймы. Для данного участка характерны размывы пойменных берегов и островов со скоростью в среднем 1,5 м/год (при максимуме – 9,2 м/год). На Северной Двине в районе п. Красноборска (ниже слияния с Вычегдой) в конце XIX в. произошло спрямление серии излучин посередине днища долины и в правобережной его части, и с этого времени русло устойчиво располагается вдоль левого коренного берега [Каргаполова, 2006]. Переформирования русла реки здесь заключаются в основном в размыве оголовков и берегов островов со средней скоростью 2,5 м/год, максимальной – 6,1 м/год. На Оби в районе с. Уртама перераспределение стока в верхнем звене сопряженных разветвлений в рукав возле коренного берега, выровненного в плане, привело к превращению этого участка реки в прямолинейное неразветвленное русло [Русловые процессы..., 2001], берега которого размываются относительно слабо: средняя скорость – около 1 м/год, максимальная – не больше 2,9 м/год.

Широкопойменные прямолинейные русла больших рек с двусторонней поймой при достаточном

стоке руслообразующих наносов характеризуются развитием перекатов с побочными в шахматном порядке, но, в отличие от расположенных возле коренных берегов, смещающихся вдоль реки, вследствие чего рисунок меженного русла меняется после каждого половодья (рис. 3А). При повышенной подвижности побочной они не успевают закрепиться растительностью и превратиться в пойму, и русло сохраняет прямолинейность.

На реках с недостаточным стоком наносов, обычно малых, на которых поступление твердого материала из-за размыва берегов и с территории бассейна еще не обеспечивает необходимое его количество для образования грядовых макроформ руслового рельефа, русло является также прямолинейным неразветвленным (рис. 5), а широкая пойма реки нередко является унаследованной, сформировавшейся в иных природных условиях.



Рис. 5. Прямолинейное русло р. Юг в верхнем течении.
Фото Р.С. Чалова

Fig. 5. The straight channel of the Yug River in its upper reaches. Photo by R.S. Chalov

Таким образом, основные рукава односторонних разветвлений при расположении этого типа русла возле коренных берегов (это характерно для больших рек со слабо- и неустойчивым руслом, которые отличаются большой шириной и относительно малыми глубинами) по существу являются разновидностью относительно прямолинейных русел, которые можно квалифицировать как осложненные формированием прибрежных островов, образующих разветвления второго и третьего порядков. Связанные с ними односторонние разветвления отличаются постоянно малой водностью проток и рукавов, расположенных в области преимущественной аккумуляции наносов и создающих периферическую зону русла. Со временем, по мере направленного смещения реки в сторону ведущего берега, они отмирают, острова причленяются к пойме, а разделяющие их рукава превращаются в параллельные руслу ложбины или маловодные пойменные протоки.

Осложнения в морфологию прямолинейных русел (вне зависимости от одно- или двусторонней поймы) вносят также разветвления второго и третьего порядков, существование которых не проявляется в структуре всего потока, сказываясь лишь в прилегающих к создающим их островам. По В.В. Иванову [1989], это соответствует соотношению ширины острова и русла перед разветвлением $B_o < 0,3-0,4b_p$ для островов второго порядка и $B_o < 0,08b_p$ для островов третьего порядка [Чалов, 2011]. Формирование таких разветвлений, не изменяющих прямолинейности русла и не отражающихся в конфигурации противоположных островов берегов (они сохраняют прямолинейные очертания), свидетельствует о превышении критического значения критерия квазиоднородности потока И.Ф. Карасева $\theta = \sqrt{\lambda} b_p / h > 9,5$. Поэтому многие участки прямолинейного широкопойменного русла больших и особенно крупнейших рек (средняя и нижняя Лена, Обь, Иртыш, нижний Амур) нередко характеризуются наличием небольших (элементарных и малых [Голубцов, 2023]) деформаций, не определяющих их режим.

Наряду с прямолинейными руслами, создающими на реках морфологически однородные участки, на реках и в рукавах разветвленных русел существуют относительно короткие прямолинейные «вставки» между смежными излучинами на меандрирующих реках, между звеньями сопряженных разветвлений и одиночными разветвлениями, расположение которых по длине реки составляет вместе с ними морфологически однородные участки. В извилистом русле (рис. 6А) вследствие неравномерного распределения скоростей и возникновения центробежных сил при криволинейности движения потока возникают циркуляционные течения, которые активизируются по мере увеличения кривизны излучин в процессе их развития. Они затухают ниже створа перегиба между соседними излучинами, в результате чего плесовые ложбины возле вогнутых берегов удлиняются, смещаясь на верхнее крыло следующей излучины. Это явление впервые было отмечено еще Л. Фаргом [Fargue, 1908], теоретически обосновано Н.И. Маккавеевым [1955] и М.М. Розовским [1957] и объясняет образование прямолинейных «вставок» между смежными развитыми и большими излучинами.

В разветвлениях русла острова вызывают изгибы потока, вследствие чего русла рукавов обычно представляют собой излучины. Если острова располагаются цепочками вдоль реки, создавая сопряженные разветвления, между их звеньями поток собирается в едином неразветвленном русле, образуя очень короткие прямолинейные «вставки», в которых нередко у противоположных берегов, ниже во-

гнутоści каждого рукава, формируются небольшие прибрежные острова, обычно элементарные, реже малые, протоки за которыми маловодны, в межень часто обсыхают (см. рис. 6Б).

Одиночные разветвления как тип русла, образующие морфологически однородные участки, представляют собой чередование по длине реки островов и прямолинейных отрезков, протяженность которых значительно больше, чем у «вставок» между звеньями сопряженных разветвлений (см. рис. 6В). Поэтому переформирования каждого разветвления происходят независимо друг от друга, во многом определяясь теми деформациями, которые происходят в пределах прямолинейных «вставок». Примером такого морфологически однородного

участка является р. Обь от слияния с р. Иртышом до п. Перегребного, где начинается раздвоенное русло нижней Оби. При протяженности участка 325 км в его пределах находится 14 одиночных разветвлений и 15 прямолинейных отрезков общей протяженностью 163 км (средняя их длина – около 10 км; такая же длина у одиночных разветвлений). Расположение их вдоль правого коренного берега (Белогорского материка) обуславливает плесовый характер и устойчивость прямолинейного русла. Если для разветвлений русла характерны активные русловые деформации (скорости размыва пойменных берегов и островов в среднем достигают 3 м/год при максимуме более 16 м/год), то прямолинейные участки остаются практически неизменными в плане.

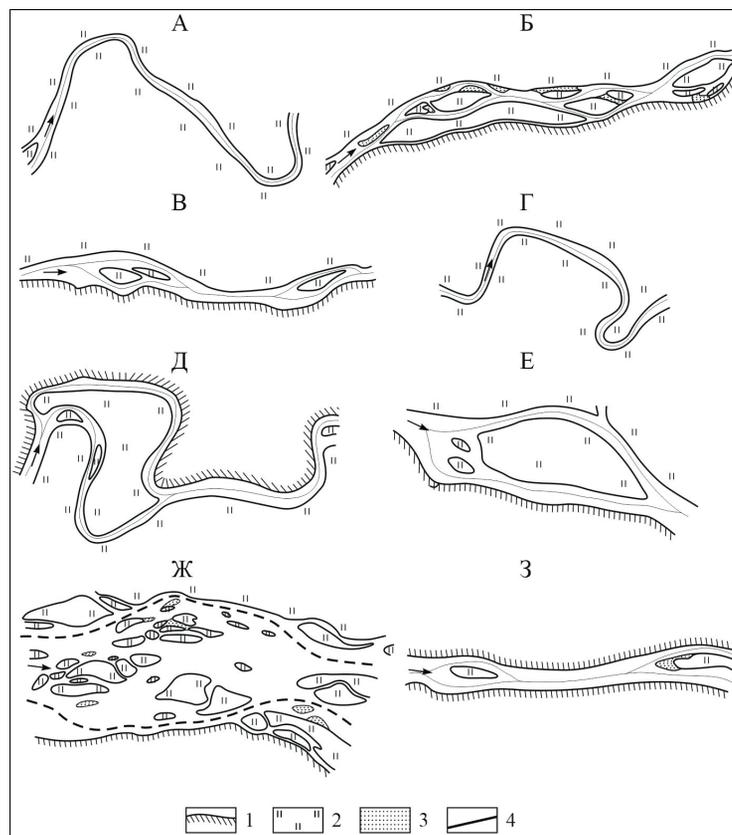


Рис. 6. Основные разновидности прямолинейных русел, не создающих морфологически однородные участки, и рукавов разветвлений: А – между смежными излучинами (нижний Иртыш, ниже г. Тобольска); Б – между звеньями сопряженных разветвлений (р. Обь, Орско-Борское – Гусиное разветвления); В – между островами одиночных разветвлений (р. Обь, ниже слияния с р. Иртышом); Г – на сундучных излучинах (средний Иртыш); Д – пойменно-русловое разветвление с рукавами, расположенными в верхней и нижней частях вдоль коренного берега (средняя Обь); Е – одиночное разветвления у коренного берега, нижняя Обь, ниже слияния с р. Иртышом; Ж – рукав параллельно-рукавных разветвлений врезанного русла (средняя Лена, Сахамское разветвление); 3 – рукава параллельно-рукавных разветвлений врезанного русла (средняя Лена в районе Ленских Столбов): 1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – положение стрежневой зоны потока

Fig. 6. Main types of rectilinear channels that do not create morphologically homogeneous sections, and branching channels: А – between adjacent bends (lower Irtysh River, below Tobolsk); Б – between links of conjugate branchings (the Ob River, Orsko-Borskoe and Gusinoe branchings); В – between islands of single branchings (the Ob River, below the confluence with the Irtysh River); Г – on chest bends (the Middle Irtysh River); Д – floodplain-channel branching with branches located in the upper and lower parts along the native bank (the Middle Ob River); Е – a single branching near the native bank of the Lower Ob River, below the confluence with the Irtysh River; Ж – a branch of a parallel-branch braiding (the Lower Lena River, Sakhamsk branching); 3 – branches of parallel-branch braidings of the incised channel (the Middle Lena River in the area of the Lena Pillars): 1 – bedrock bank; 2 – floodplain; 3 – channel shallows; 4 – mainstream location

Прямолинейные «вставки» являются составной частью сложных сундучных (трапециевидных) излучин, в которых они разделяют верхний вынужденный изгиб русла на подходе его к ведущему берегу, коренному или уступу высокой, редко затопляемой поймы и нижний, у которого верхнее крыло проходит на продолжении последнего (см. рис. 6Г). Образование этих «вставок» и самих сундучных излучин – следствие слива воды с затопленной поймы к верхнему изгибу русла [Чалов, 2011].

Прямолинейность рукавов раздвоенных русел по условиям их формирования подобна прямолинейным неразветвленным широкопойменным руслам. Таковы очень протяженный (десятки километров) прямолинейный участок Большой Оби и менее длинные на Малой и Горной Оби, на которых горизонтальные русловые деформации либо практически отсутствуют, либо наблюдаются локально со скоростями размыва берегов в среднем не более 2 м/год, максимум – не более 4 м/год (в зависимости от размера реки). В рукавах пойменно-русловых разветвлений она проявляется в тех случаях, когда разветвления находятся на перевалах реки от одного коренного борта долины к другому: она характерна для верхней части рукава, расположенной вдоль коренного берега до его отклонения от реки, и нижней части второго рукава, подходящего к противоположному коренному берегу до узла слияния рукавов, т. е. так или иначе связаны с влиянием ведущих коренных берегов (см. рис. 6Д). В одиночных и звеньях сопряженных разветвлений широкопойменных русел прямолинейные рукава, как правило, также проходят вдоль коренных берегов (или уступов надпойменных террас) (см. рис. 6Е). При их отсутствии поток, огибая острова, формирует пологие излучины, т. к. возможная первоначальная прямолинейность рукава быстро трансформируется вследствие возникновения гидравлических явлений, свойственных изгибу потока, возникающему у оголовка острова. Относительно прямолинейные рукава, в том числе осложненные разветвлениями второго порядка, при расположении реки вдоль коренного берега характерны для такой крупнейшей реки, как нижняя Лена (см. рис. 6Ж).

Более распространены прямолинейные рукава в разветвлениях врезанных и адаптированных русел больших и крупнейших рек. В соответствии с очень высокой водностью рек и большой шириной их русел при относительно небольшой глубине [Ржаницын, 1982], в том числе вследствие устойчивости к воздействию потока сложенного скальным или плотным пластичным грунтом дна, в потоке возникает две-три стречневые зоны (критерий И.Ф. Карасева $\theta > 9,5$). Рукава в таких разветвлениях сохраняют относительную прямолинейность из-за

неразмываемости или сложения трудноразмываемыми отложениями берегов. Подобные разветвления с прямолинейными рукавами характерны для врезанных параллельно-рукавных русел средней Лены (см. рис. 6З), Енисея, Иртыша выше г. Омска, Ангары (до создания каскада водохранилищ). На 160-километровом участке средней Лены длина многих островов $L_0 \gg 10B_0$, что во много раз превышает оптимальное соотношение параметров в отношении гидравлических сопротивлений $L_0 \approx 3-4B_0$ [Baker, 1977; Komar, 1983]. При этом на Лене многие острова имеют коренной скальный цоколь, а на Ангаре они были незатопляемыми, поднимаясь над меженным уровнем до 60 м и более [Чалов, Чалов, 2009] (некоторые из них образуют сейчас острова на водохранилищах).

Относительно прямолинейные русла характерны для проток и рукавов, составляющих пойменную многорукавность, особенно на реках с разветвленным руслом, на которых они являются реликтовыми образованиями, связанными с отмиранием рукавов русловых разветвлений и причленением островов к пойме, но продолжающих функционировать при глубоком затоплении поймы и прохождении в эту фазу водного режима руслоформирующего расхода. Пологая извилистость бывших рукавов при сокращении их водности превращается в относительную прямолинейность пойменных ответвлений также из-за малого стока наносов в них, формирующегося только благодаря размыву в них берегов.

ВЫВОДЫ

Относительно прямолинейные, неразветвленные русла, являясь одним из трех основных морфодинамических типов речных русел, имеют незначительное распространение. Образованные ими морфологически однородные участки составляют в среднем всего 7% среди рек Северной Евразии длиной более 500 км. Главным образом это связано с неустойчивостью прямолинейного движения потока. Поэтому в свободных условиях развития русловых деформаций они формируются, если широкопойменное русло располагается вдоль ведущего коренного берега (пойма односторонняя), имеющего выровненные в плане очертания. Наличие такового обеспечивает специфическую структуру потока в многоводную фазу водного режима при затоплении поймы, аккумуляцию наносов в припойменной части русла, плесовый характер русла и направленное смещение его в сторону ведущего берега. При неровностях коренного берега русло становится перекатным благодаря образованию побочной (или осередков) ниже каждого его выступа. Широкопойменное прямолинейное русло (при отсутствии коренных берегов) является обычно слабо- или неустойчивым,

перекатным, с побочными и осередками, смещение и переформирования которых не позволяют им закрепиться растительностью (т. е. превратиться в пойму) и привести к трансформации русла в извилистое или разветвленное. Наличие коренного ведущего берега, плесовый характер русла, смещение и деформируемость побочной и осередков обеспечивают нетрансформируемость прямолинейных русел. В противном случае существование их ограничивается определенным временным интервалом, русло является трансформирующимся, превращающимся в извилистое или разветвленное.

Во врезанных руслах, особенно в скальных грунтах, их прямолинейность определяется геологической структурой и является стабильной, не изменяющейся на протяжении геологических отрезков времени. Этому способствует дефицит руслообразующих наносов для таких условий формирования русел.

Аналогом прямолинейных неразветвленных русел являются основные рукава одно- и реже двусторонних разветвлений, в которых второстепенные прибрежные протоки являются маловодными и вместе с отделяющими их от основного русла

островами образуют периферическую зону, в которой преобладает аккумуляция наносов, даже при их дефиците.

Прямолинейные русла могут иметь рукава разветвлений разного типа – одиночных, сопряженных, параллельно-рукавных, пойменно-русловых, раздвоенного русла и пойменных протоков. Не образуя морфологически однородные участки, они встречаются в виде «вставок» между смежными излучинами, как составная часть сундучных (трапециевидных) излучин, между звеньями сопряженных разветвлений и островами одиночных разветвлений. Во всех подобных случаях русловые деформации происходят взаимосвязанно между формами русла других типов и прямолинейных «вставок».

Закономерности переформирования всех возможных проявлений прямолинейности – от морфологически однородных участков широкопойменных и врезанных рукавов разветвлений разного типа до прямолинейных «вставок» между излучинами и разветвлениями – должны учитываться при разработке схем и проектов регулирования русел при водохозяйственном освоении и водотранспортном использовании рек.

Благодарности. Работа выполнена по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (исходные материалы и русловой анализ), при финансовой поддержке РФФ – проект № 23-17-00065 (разработка классификации, морфология и динамика прямолинейных русел) и № 23-77-01006 (размывы берегов в прямолинейных руслах).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голубцов Г.Б. Формирование, морфология и динамика островов широкопойменных русел больших рек (на примере Оби и Лены): автореф. дис. ... кан. геогр. наук. М.: ИГ РАН 2023. 29 с.
- Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 216 с.
- Добровольская Н.Г. Особенности субаквального выветривания на равнинных и горных реках (на примере Лены и Кара-Бау, Западный Тянь-Шань) // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1980. № 2. С. 71–76.
- Жуковский Н.Н. Обзор основных явлений естественно-го формирования речного русла (выдержки из труда «Об организации и системе землечерпания на транзите рек с подвижным ложем»). В сб. науч. трудов / Волжское землечерпание и его достижения. Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 329–363.
- Замышляев В.И. О плановой устойчивости прямого русла. В сб. науч. трудов / Тр. ГГИ. 1982. Вып. 278. С. 48–55.
- Замышляев В.И. Математическая модель плановых переформирований речных русел // Труды ГГИ. 1983. Вып. 288. С. 53–72.
- Иванов В.В. Условия формирования, гидролого-морфологические зависимости и деформации относительно прямолинейных неразветвленных русел: автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1989. 23 с.
- Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
- Каргаполова И.Н. Реакция русел рек на изменения водности и антропогенное воздействие за последние столетия: автореф. дис. ... кан. геогр. наук. М.: МГУ. 2006. 27 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.Ф., Сницченко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 282 с.
- Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Пиньковский С.И. и др. Русловой процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 372 с.
- Линь Чэнькуань. Классификация типов русел // Вест. Нанкин. ун-та. 1963. № 1. (на кит. языке).
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1971. 116 с.
- Попов И.В. Методические основы исследования руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 208 с.
- Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 36. М.: Транспорт, 1964. 262 с.
- Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 264 с.

- Розовский М.Л.* Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд-во АН УССР, 1957. 188 с.
- Русловой режим рек Северной Евразии / под ред. Р.С. Чалова. М.: Изд-во МГУ, 1994. 316 с.
- Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна / под ред. Р.С. Чалова, Е.М. Плескевича, В.А. Баулы. Новосибирск: Изд-во РИПЭЛ-плюс, 2001. 300 с.
- Русловые процессы на реках СССР. Карта. Масштаб 1:4 000 000 / под ред. Р.С. Чалова. М.: ГУГК СССР, 1990. 4 л.
- Сидорчук А.Ю.* Главные формы речных русел: меандры и разветвления. В сб. науч. труд. / Вопросы географии. Сб. 140. Современная геоморфология. М.: Кодекс, 2015. С. 319–340.
- Чалов Р.С.* Извилистость или разветвленность потока и формирование меандрирующих и разветвленных на рукава речных русел // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 3. С. 3–12.
- Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
- Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: Изд-во КРА-САНД, 2011. 960 с.
- Чалов Р.С., Голубцов Г.Б., Куракова А.А.* Разветвления речных русел, их морфологические проявления и типизация. // Известия РГО. 2023. Т. 155. №3-4. С. 145–162.
- Чалов Р.С., Чалов С.Р.* Морфология скального русла реки Ангары на участках Богучанского и Мотыгинского водохранилищ // География и природные ресурсы. 2009. № 1. С. 103–110.
- Чернов А.В.* Геоморфология пойм равнинных рек. М.: Изд-во МГУ, 1983. 198 с.
- Шэнь Юйчан, Гун Гоюань.* Речная геоморфология. Пекин: Наука, 1986. (на кит. языке).
- Baker V.R.* Stream-channel response to floods with examples from central Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 8, p. 1057–1071.
- Callander R.A.* Instability in river channels, *Field mech.*, 1969, vol. 36, p. 465–480.
- Davis W.M.* Meandering valleys and underfit rivers, *Assoc. Am. Geogr.*, 1913, vol. 3, p. 3–28.
- Fargue L.* *La forme du lit des rivières à fond milife*, Paris, 1908, 187 p.
- Komar P.D.* Shape of streamlined island on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form, *Geology*, 1983, no. 11, p. 651–654.
- Parker G.* On the cause and characteristic scales meandering and braiding rivers, *Field mech.*, 1976, vol. 76, p. 457–480.
- Schumm S.A.* *The fluvial system*, John Wiley and Sons, New York, 1977, 338 p.

Поступила в редакцию 10.05.2024

После доработки 16.09.2024

Принята к публикации 26.11.2024

STRAIGHT-LINE NON-BRANCHING CHANNELS: MORPHOLOGICAL DIVERSITY AND TYPIFICATION

R.S. Chalov¹, G.B. Golubtsov², A.A. Kurakova³

¹⁻³*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹*Department of Land Hydrology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: rschalov@mail.ru*

²*N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru*

³*N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

Relatively straight non-branching channels account for the smallest share among all morphodynamic types of channels, which is due to the instability of the rectilinear flow movement. Recently they have become objects of study from the point of view of their morphology, dynamics and conditions of formation, including on particular rivers, due to the difficulties arising in solving water management and water transportation problems. Despite their apparent uniformity and relatively weak intensity of channel reformations, they are characterized by certain morphological variability associated mainly with the parameters of the channels, their water content, and specific conditions of formation. Rectilinear channels could form an independent type and associated morphologically homogeneous sections in a wide-floodplain, adapted and incised channel. They could also occur in the form of small sections (“insertions”) between adjacent bends in a meandering channel, in floodplain-channel branches, in the branches of conjugated and single branchings. Rectilinear “insertions” are an integral part of complex chest (trapezoidal) bends, in which they separate the upper forced bend of the channel on the approach to the leading bedrock bank or the ledge of a high, rarely flooded floodplain, and the lower bend with an upper wing near the bedrock bank.

Taking into account all factors, a complete classification of rectilinear channels has been elaborated. The conditions of their formation and specific features of their deformations have been defined, as well as possibilities of the optimal management of channel processes to ensure the stability of waterways and hydraulic structures, and the operation of water management facilities.

Keywords: channel processes, typification, morphodynamics of channels, branches, bends, transformation of channels, stability of channels

Acknowledgements. The paper was prepared according to the plan of scientific research of the Department of Land Hydrology and the N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes (source materials and channel analysis) with financial support of the Russian Science Foundation – project no. 23-17-00065 (development of classification, morphology and dynamics of rectilinear channels), no. 23-77-01006 (riverbank erosion in straight channels).

REFERENCES

- Baker V.R. Stream-channel response to floods with examples from central Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 8, p. 1057–1071.
- Callander R.A. Instability in river channels, *Field mech.*, 1969, vol. 36, p. 465–480.
- Chalov R.S., Chalov S.R. The morphology of the rocky channel of the Angara River in its stretches within the Boguchanskoye and Motygin'skoye reservoirs, *Geography and Natural Resources*, 2009, no. 1, p. 47–53.
- Chalov R.S., Golubtsov G.B., Kurakova A.A. Razvetvleniya rechnykh rusel, ikh morfologicheskie proyavleniya i tipizatsiya [Formation of river channel branches, their morphology and typing], *Izvestiya RGO*, 2023, vol. 155, no. 3–4, p. 145–162. (In Russian)
- Chalov R.S. Izvilistost' ili razvetvlennost' potoka i formirovaniye meandriruyushchikh i razvetvlennykh na rukava rechnykh rusel [Sinuous or braiding water flows and formation of meandering and braided river channels], *Vest. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 3, p. 3–12. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, vol. 1, Ruslovye protsessy: faktory, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [Riverbed studies: theory, geography, practice, vol. 1, Riverbed processes: factors, forms of manifestation and conditions of formation of riverbeds], Moscow, LKI Publ., 2008, 608 p. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, vol. 2, Morfodinamika rechnykh rusel* [Riverbed studies: theory, geography, practice, vol. 2, Morphodynamics of riverbeds], Moscow, KRASAND Publ., 2011, 960 p. (In Russian)
- Chernov A.V. *Geomorfologiya poim ravninnykh rek* [Geomorphology of floodplains of lowland rivers], Moscow, MSU Publ., 1983, 198 p. (In Russian)
- Davis W.M. Meandering valleys and underfit rivers, *Assoc. Am. Geogr.*, 1913, vol. 3, p. 3–28.
- Dobrovol'skaya N.G. Osobennosti subakval'nogo vyvetrivaniya na ravninnykh i gornyykh rekakh (na primere Leny i Kara-Bau, zapadnyi Tyan'-Shan') [Specific features of subaqueous weathering on plain and mountain rivers (case studies of Lena and Kara-Bau rivers, western Tien Shan)], *Vest. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 1980, no. 2, p. 71–76. (In Russian)
- Fargue L. *La forme du lit des rivières a fond milife*, Paris, 1908, 187 p.
- Golubtsov G.B. *Formirovaniye, morfologiya i dinamika ostrovov shirokopoimennykh rusel bol'shikh rek (na primere Obi i Leny)* [Formation, morphology and dynamics of islands in wide floodplain channels of large rivers (case studies of the Ob and Lena rivers)], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, IG RAS Publ., 2023, 29 p. (In Russian)
- Grishanin K.V. *Teoriya ruslovogo protsessa* [Riverbed process theory], Moscow, Transport Publ., 1972, 216 p. (In Russian)
- Ivanov V.V. *Usloviya formirovaniya, gidrologo-morfologicheskie zavisimosti i deformatsii odnositel'no pryamolinейnykh nerazvetvlennykh rusel* [Conditions of formation, hydrological and morphological dependencies and deformations of relatively straight unbranched channels], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, MSU Publ., 1989, 23 p. (In Russian)
- Karasev I.F. *Ruslovye protsessy pri perebroske stoka* [Channel processes during runoff transfer], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 288 p. (In Russian)
- Kargapolova I.N. *Reaktsiya rusel rek na izmeneniya vodnosti i antropogennoye vozdeistvie za poslednie stoletiya* [Response of river beds to changes in water content and anthropogenic impact over the past centuries], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, MSU Publ., 2006, 27 p. (In Russian)
- Komar P.D. Shape of streamlined island on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form, *Geology*, 1983, no. 11, p. 651–654.
- Kondrat'ev N.E., Lyapin A.N., Pin'kovskii S.I. i dr. *Ruslovoi protsess* [Riverbed process], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1959, 372 p. (In Russian)
- Kondrat'ev N.E., Popov I.F., Snishchenko B.F. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsessa* [Fundamentals of the hydromorphological theory of the channel process], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 282 p. (In Russian)
- Lin' Chen'kuan'. Klassifikatsiya tipov rusel, *Vest. Nankin. un-ta*, 1963, № 1. (In Chinese)
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [Riverbed and erosion in its basin], Moscow, AN USSR Publ., 1955, 347 p. (In Russian)
- Makkaveev N.I. *Stok i ruslovye protsessy* [Runoff and riverbed processes], Moscow, MSU Publ., 1971, 116 p. (In Russian)
- Parker G. On the cause and characteristic scales meandering and braiding rivers, *Field mech.*, 1976, vol. 76, p. 457–480.
- Popov I.V. *Metodicheskie osnovy issledovaniya ruslovogo protsessa* [Methodological principles of studying the riverbed process], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961, 208 p. (In Russian)
- Proektirovaniye sudovykh khodov na svobodnykh rekakh [Design of shipping lanes on free rivers], tr. TsNIIIEVT, iss. 36. Moscow, Transport Publ., 1964, 262 p. (In Russian)
- Rozovskii M.L. *Dvizhenie vody na povorote otkrytogo rusla* [Movement of water at a turn in an open channel], Kiev, AN USSR Publ., 1957, 188 p. (In Russian)

- Ruslovoi rezhim rek Severnoi Evrazii* [Channel regime of the rivers of Northern Eurasia], R.S. Chalov (ed.), Moscow, MSU Publ., 1994, 316 p. (In Russian)
- Ruslovyie protsessy i vodnye puti na rekakh Obского бассейна* [Channel processes and waterways on the rivers of the Ob River basin], R.S. Chalov, E.M. Pleskevich, V.A. Baula (eds.), Novosibirsk, RIPEL-plyus Publ., 2001, 300 p.
- Ruslovyie protsessy na rekakh SSSR, Karta* [Channel processes on the rivers of the USSR, Map], M1: 4 000 000, R.S. Chalov (ed.), Moscow, GUGK USSR Publ., 1990, 4 p.
- Rzhanitsyn N.A. *Rusloformiruyushchie protsessy rek* [Channel-forming processes of rivers], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 264 p. (In Russian)
- Schumm S.A. *The fluvial system*, John Wiley and Sons, New York, 1977, 338 p.
- Shen' Yuichan, Gun Goyuan'. *Rechnaya geomorfologiya*. Pekin, Nauka Publ., 1986. (In Chinese)
- Sidorchuk A.Yu. [The main forms of river channels: meanders and branches], *Voprosy geografii, pt. 140, Sovremennaya geomorfologiya* [Modern Geomorphology], Moscow, Kodeks Publ., 2015, p. 319–340. (In Russian)
- Zamyshlyayev V.I. [Mathematical model of planned reformation of river channels], *Tr. GGI* [Proceedings of the State Hydrological Institute], 1983, iss. 288, p. 53–72. (In Russian)
- Zamyshlyayev V.I. [On the lateral stability of a straight riverbed], *tr. GGI* [Proceedings of the State Hydrological Institute], 1982, iss. 278, p. 48–55. (In Russian)
- Zhukovskii N.N. [Review of the main phenomena of natural formation of a river bed (excerpts from the work “On the organization and system of dredging in the transit of rivers with a moving bed”), *Volzhskoe zemlecherpanie i ego dostizheniya. Voprosy gidrotekhniki svobodnykh rek* [Volga River dredging and its achievements. Issues of hydraulic engineering of free rivers], Moscow, Rechizdat Publ., 1948, p. 329–363. (In Russian)

Received 10.05.2024

Revised 16.09.2024

Accepted 26.11.2024

УДК 913(71)+94(71)

**РОЛЬ КАНАДЫ В МИРОВОЙ БАНКОВСКОЙ СИСТЕМЕ
(1970-е – НАЧАЛО 2020-х гг.)**

Л.В. Никитин

Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, кафедра всеобщей истории, проф.; Южно-Уральский государственный университет, кафедра международных отношений, политологии и регионоведения, доц.; д-р ист. наук; e-mail: contlab2003@gmail.com

В статье на основе международных и национальных статистических сводок рассматривается изменение роли Канады в мировой банковской системе от начала 1970-х гг. до настоящего времени. При некоторых колебаниях доля страны в глобальных банковских активах на протяжении почти всего изучаемого периода превышала долю в мировом ВВП. В течение многих десятилетий банковскому сообществу Канады удавалось сохранять сильные международные позиции и без существенных потерь в своих рядах преодолевать различные экономические кризисы, в том числе «Великую рецессию» 2008–2009 гг. Подобная стабильность объясняется давними институциональными особенностями канадской банковской системы (например, необходимостью регулярно продлевать действие лицензий), а также достаточно гибким сочетанием рыночной свободы и государственного регулирования непосредственно в рассматриваемый период. В ранговом отношении позиции Канады менялись следующим образом: являясь в 1970 г. шестой по значению державой банковского мира, к середине 1990-х гг. Страна кленового листа опустилась на 12-ю позицию, но затем начала новое восхождение, по итогам которого вернулась в 2020 г. на 6-е место. При этом современные долевыми показателями Канады остаются несколько ниже, чем в 1970 г., но данное явление вполне объяснимо значительным увеличением количества стран, полноценно представленных на мировой банковской арене. Среди городов Канады безусловным лидером банковского дела является Торонто, который еще в конце 1970-х гг. ушел в отрыв от основного конкурента (Монреаля) на фоне сложных политических событий того периода. В настоящее время по суммарным активам местных банков Торонто занимает шестое место в мире. Следующие по значению центры (Монреаль, Леви и до некоторой степени Эдмонтон) также обладают довольно большим и стабильным весом в мировой банковской системе. Сохранение, несмотря на доминирование Торонто, самостоятельной роли этих финансовых узлов придает банковскому сообществу Канады дополнительную устойчивость.

Ключевые слова: Торонто, география банков, мировая финансовая система, ранжирование

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.8

ВВЕДЕНИЕ

Современная Канада по многим показателям является одной из самых успешных и влиятельных стран мира. При сравнительно небольшой численности населения (37 млн чел. по переписи 2021 г., т. е. менее 0,5% от населения всей Земли) Канада формирует около 2,1% глобального ВВП. С 1976 г. Канада входит в состав такого важного для современной политической арены неформального объединения, как «Группа семи» (G7) или «Большая семерка». Сильная и диверсифицированная экономика обеспечивает Канаде заметное экспортное присутствие на рынках энергоносителей, железной руды, золота, пшеницы, различных видов машиностроительной продукции и т. д. Страна кленового

листа очень заметна и в финансовой сфере. Большим международным весом и высокой репутацией в своих отраслях обладают Фондовая биржа Торонто (TSE) и национальная банковская система. Именно о банках Канады – о масштабах их деятельности, позициях на мировой арене, территориальном размещении и некоторых отличительных чертах – и пойдет речь в данной работе.

Стартовой хронологической точкой исследования является 1970 г. Подобный выбор связан прежде всего с тем, что именно с этого времени открывается системный доступ к необходимым статистическим материалам. Кроме этого, начало и середина 1970-х гг. представляют собой важный исторический рубеж. Различные обстоятельства этого

времени (в особенности кризис Бреттон-Вудской системы валютного регулирования и «нефтяной шок» 1973 г.) повлекли за собой большие территориальные сдвиги во всем мировом хозяйстве и, в частности, на финансовых рынках. Пять с лишним десятилетий, отделяющих названную стартовую точку от современности, – это достаточно длинный период наблюдений, позволяющий увидеть базовые тенденции или их развороты, а затем рассмотреть нынешнее положение дел с дифференциацией по городам и провинциям Канады.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу исследования положены прежде всего данные об активах крупнейших банков мира, публикуемые с 1970 г. авторитетным лондонским журналом *The Banker*. В изначальной версии эти ежегодные сводки охватывали 300 корпораций. С 1980 г. подобное глобальное представительство было расширено до 500, а с 1989 г. – до 1000 банков [*The Banker...*, 2024]. Количество канадских банков в составе этой мировой элиты в разные времена варьировало от семи до 13, причем некоторые из них занимали в международной иерархии достаточно высокие места. Магистральная линия расчетов заключалась в определении долевых и ранговых позиций Канады и ее городов в мировой банковской системе, а также в сопоставлении выявленной динамики с вкладом изучаемой страны в глобальный ВВП. Другим важным показателем, который также рассчитывался по материалам *The Banker*, является отношение собственного капитала банков к их активам. Данная пропорция отражает степень надежности канадских кредитных институтов. Для более точного понимания результатов, достигнутых банковским сообществом Канады, проводились сопоставления с двумя очень важными экономическими партнерами названной страны – США и Великобританией.

Кроме этого, изучались особенности распределения банковских сил между городами Канады. В данном случае наряду с глобальными сводками журнала *The Banker* важную роль играли национальные реестры, позволяющие вести мониторинг различных показателей с 1996–1997 гг. [*Office...*, 2024]. Эти материалы, уступающие по хронологической глубине таблицам *The Banker* и не открывающие возможность для прямых трансграничных сопоставлений, вместе с тем имеют свои важные преимущества в силу полного охвата всех банков, зарегистрированных в Канаде.

Основным источником для наблюдений за динамикой ВВП послужили публикации Статистического отдела ООН [*United Nations...*, 2024], в которых необходимые данные, как и в отраслевых сводках *The Banker*, представлены в долларах США и в те-

кущих ценах. Сведения о численности населения канадских провинций (в частности, по итогам переписей 1996 и 2021 гг.) приводятся в соответствии с официальными справками национальной статистической службы [*Statistics...*, 2024].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде чем непосредственно обратиться к названному периоду мониторинга, необходимо сказать несколько слов о предшествующем развитии банковского дела в Канаде. В монографии американских ученых Ч. Каломириса и С. Хабера, посвященной исторической эволюции кредитной отрасли в различных странах, подчеркивается долгосрочная устойчивость канадской банковской системы [*Calomiris, Haber, 2014*]. Авторы связывают это явление с такими институциональными факторами, восходящими еще к изначальному отраслевому законодательству 1871 г., как эффективный парламентский контроль через необходимость регулярного возобновления банковских лицензий, отсутствие (в отличие от практики соседних США) ограничений на создание филиальных сетей и т. д. В результате канадские банки, выросшие до внушительных размеров и отличавшиеся хорошей географической диверсификацией бизнеса, смогли с относительно небольшими потерями преодолеть различные циклические кризисы, в том числе и тяжелейший кризис 1929–1933 гг. [*Calomiris, Haber, 2014*, с. 284, 311–312]. Отметим также и довольно раннее (1967 г.) по сравнению со многими другими странами мира, хотя и более позднее, чем в США (1933–1934 гг.), появление системы государственного страхования банковских вкладов [*Kerlin, 2015*, с. 36–37; *Kyer, 2017*, с. 57–59].

В 1970 г. Канада создавала вполне заметные 2,6% глобального ВВП, но при этом ее доля в активах крупнейших банков мира была еще больше – почти 4,6% (рис. 1). Страна кленового листа с показателем 38,5 млрд долл. занимала в банковском секторе 6-е место. Ведущую пятерку на тот момент составляли США, Япония, Италия, ФРГ и Великобритания¹. В аналогичном рейтинге для городов Канаду представляли два мощных центра. Монреаль, где работали *Royal Bank of Canada (RBC)*, *Bank*

¹ Здесь и далее абсолютные, пропорциональные и ранговые показатели Канады и других стран, а также канадских городов в мировой банковской системе приводятся по результатам расчетов, проведенных автором на основе сводок *The Banker* [*The Banker...*, 2024]. Абсолютные значения, как и в таблицах *The Banker*, указываются в текущих ценах в долларах США. Некоторые важные уточнения для периода от 1996–1997 гг. до настоящего времени опираются на дополнительную серию расчетов с использованием официальной канадской статистики [*Office...*, 2024].

of Montreal (BMO), Banque Canadienne Nationale и другие видные корпорации, при их суммарных активах 19,5 млрд долл. находился на 11-м месте в мире. Всего лишь на две позиции ниже, с очень близким результатом – 19 млрд долл. – располагался Торонто (Canadian Imperial Bank of Commerce (CIBC), Toronto Dominion Bank и др.).

Примерно в это же время на конкуренцию Монреала и Торонто особое внимание обратил выдаю-

щийся американский экономист и историк Ч. Киндлбергер, ставший в начале 1970-х гг. одним из первопроходцев в изучении городов как финансовых центров. Используя ряд количественных параметров (не относящихся, впрочем, к банковскому сектору), Ч. Киндлбергер отметил некоторое преимущество Торонто, однако высказал предположение о том, что в этой паре еще долго не будет явной доминанты [Никитин, 2021, с. 91].

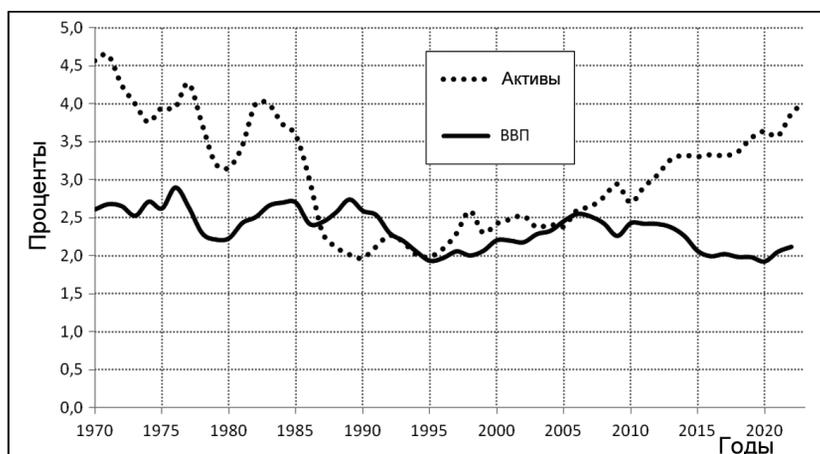


Рис. 1. Доли Канады в мировых банковских активах и ВВП, 1970–2023 гг.

Источник: рассчитано по [The Banker..., 2024; United Nations..., 2024]

Fig. 1. Canada's shares in world banking assets and GDP, 1970–2023.

Source: calculations based on [The Banker..., 2024; United Nations..., 2024]

Между тем на экономические процессы все сильнее влиял мощный политический фактор – рост сепаратистских настроений среди жителей преимущественно франкоязычной провинции Квебек. Начавшийся пересмотр местного лингвистического законодательства и угроза дальнейшей дестабилизации заставляли различные компании полностью или частично переезжать из Монреала и других городов Квебека в более спокойные регионы. Эта тенденция проявилась и в банковской отрасли. В 1976 г., построив первую очередь нового офисного комплекса Royal Bank Plaza в Торонто, именно туда перевел основную часть своих управляющих структур RBC. Также в финансовом районе Торонто, на деловой улице Бей-стрит, с 1977 г. начал работать новый корпоративный центр Bank of Montreal [Kennedy, 2011, с. 169]. Эти банки сохранили в Монреале официальную регистрацию и некоторые важные подразделения, но общее управление бизнесом в обоих случаях осуществлялось уже из новых локаций. Если рассматривать банковскую географию Канады по расположению командных центров, то с указанных дат активы и иные показатели RBC и Bank of Montreal следует включать в ретроспективную статистику Торонто. В результате

отмеченных событий траектории двух городов, ранее являвшиеся очень близкими, решительно разошлись. В 1978 г. Торонто (116 млрд долл.) поднялся в иерархии банковских столиц мира уже на 6-е место, тогда как Монреаль скатился на позиции в шестом, а позднее и в седьмом десятке.

Подобная внутринациональная дивергенция происходила на фоне снижения общего веса Канады в изучаемой отрасли (см. рис. 1). Эта динамика, как и аналогичное уменьшение пропорциональных показателей США и ряда других стран, была в значительной мере задана общим фактором – наблюдавшимся тогда феноменальным подъемом Японии. Мощное наступление финансовых гигантов из Токио и Осаки, опиравшееся на сильную иену и общие достижения национальной экономики, существенно изменило глобальную банковскую географию [Никитин, 2022, с. 52–55]. В 1989 г., когда Япония достигла наивысших долевых результатов, североамериканские страны, наоборот, подходили к своим минимальным отметкам (рис. 2). В этот момент Канада с суммарными активами 363 млрд долл. являлась девятой банковской державой мира, а Торонто (334 млрд долл.) в рейтинге городов находился на 7-м месте.

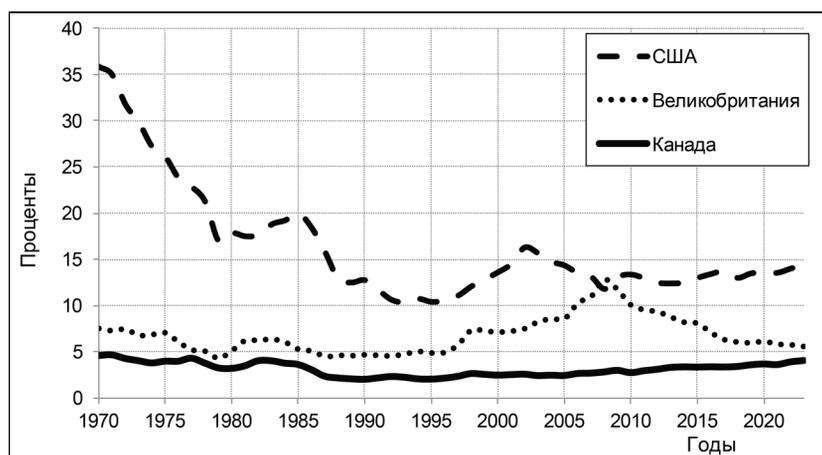


Рис. 2. Доли Канады, США и Великобритании в мировых банковских активах, 1970–2023 гг.

Источник: рассчитано по [The Banker..., 2024]

Fig. 2. Shares of Canada, USA and UK in world banking assets, 1970–2023.

Source: calculations based on [The Banker..., 2024]

Усиление конкуренции со стороны зарубежных (конечно, не только японских) финансовых компаний, а также появление все новых технологических возможностей для расширения бизнеса влекло за собой вопрос о реформировании банковской отрасли. Одной из магистральных линий для целого ряда стран стало постепенное устранение организационных барьеров между различными видами финансовой деятельности. В Канаде подобная тенденция наметилась достаточно рано, еще с 1950–1960-х гг., когда для традиционных коммерческих банков был открыт широкий выход на рынки ипотечных продуктов и потребительского кредитования [Хорошилов, 2019, с. 14]. Но основные события на этом направлении развернулись при правительстве Б. Малруни (1984–1993 гг.), которое, подобно администрации Р. Рейгана в США и правительству М. Тэтчер в Великобритании, занималось многоплановой либерализацией национальной экономики. В частности, при Б. Малруни канадские банки получили возможность предоставлять инвестиционные услуги и владеть страховыми компаниями [Calomiris, Haber, 2014, с. 315–316]. По хронологии выхода на подобные рубежи реформирования и снятия межотраслевых ограничений Канада на несколько лет опередила Соединенные Штаты. Отметим, наконец, и сложившиеся в Канаде достаточно гибкие условия допуска иностранных корпораций на внутренний рынок банковских услуг [Calomiris, Haber, 2014, с. 316–317].

В начале 1990-х гг., когда кабинет Б. Малруни продолжал работу по либерализации национального хозяйства, обозначился разворот базовой тенденции: доля Канады в мировых банковских активах стабилизировалась, а несколько позже стала расти (см. рис. 1, 2). Очень большую роль и на этот раз сыграли события в другой части света. Происхо-

дивший тогда в Японии обвал фондового и строительного рынков нанес также удар по гигантской банковской системе этой страны [Grossman, 2010, с. 278–279; Никитин, 2022, с. 55]. Япония еще долго (до 2002 г.) оставалась мировым банковским лидером, но ее долевые показатели неуклонно снижались, что открывало новые возможности для многочисленных конкурентов.

Впрочем, даже в этих условиях добиться значительных успехов могли только те игроки (на уровне национальных банковских систем или отдельных корпораций), которые и сами обладали рядом сильных характеристик. Именно это уверенно продемонстрировала Канада, которая, соединяя историческую надежность финансовых институтов с либерализацией недавних лет, с середины 1990-х гг. стала постепенно улучшать свои позиции на банковской арене.

К этому же времени относится еще одна очень показательная страница в финансовой истории Канады. В 1998 г. о планах по слиянию бизнеса объявили сразу две пары ведущих банковских групп Торонто: RBC и Bank of Montreal, а также CIBC и Toronto Dominion. Следует подчеркнуть, что такие факторы, как почти повсеместная либерализация отрасли, все более лояльное отношение национальных регуляторов к преодолению антимонопольных барьеров и усиление трансграничной конкуренции вызвали в тот период огромную волну банковских слияний и поглощений в различных географических точках, в том числе и на рынках финансовых сверхдержав – США и Японии [Никитин, 2022, с. 56]. Однако в Канаде правительство Ж. Крестьяна (1993–2003 гг.) заняло противоположную позицию. В Оттаве посчитали, что слияния настолько больших и важных для всей национальной экономики конгломератов (не имевшие аналогов в стране уже

почти 40 лет) будут подавлять механизмы конкуренции и войдут в противоречие с интересами потребителей банковских услуг [Calomiris, Haber, 2014, с. 324]. Обе анонсированные сделки были заблокированы, и Канада, таким образом, сохранила имеющуюся конфигурацию банковской системы. К тому же эти события послужили импульсом для дальнейших законодательных корректировок, направленных, в частности, на усиление защиты потребителей и гармонизацию взаимодействия между различными видами финансовых институтов [Хорошилов, 2019, с. 16].

Сегодня, по прошествии многих лет, есть основания утверждать, что все упомянутые исторические слои (стартовые институциональные особенности, либерализация времен Б. Малруни и последующая дополнительная настройка при Ж. Кретьене) один за другим к началу XXI в. наделили банковскую систему Канады хорошим сочетанием динамизма и надежности. В 2000-е гг. финансовые корпорации рассматриваемой страны продолжали уверенно развиваться, но при этом, по сравнению со многими конкурентами из США и Европы, были не так глубоко вовлечены в популярную тогда субстандартную ипотеку и основанные на ней схемы. Уместно также обратить внимание и на следующее обстоятельство. В начале 2008 г., как показывают расчеты на основе данных The Banker, отношение собственного капитала к активам у канадских банков составляло 4,37%. Это была довольно низкая величина, но она далеко превосходила аналогичные показатели у банковских сообществ Великобритании (3,17%), Франции (3,02%), Швейцарии (2,79%) и некоторых других европейских стран. Правда, по названному параметру более надежными могли показаться банки США (5,85%), но это было, скорее, проявлением их исторического отличия от банков Канады – давней необходимостью поддерживать завышенный уровень собственного капитала из-за привязанности бизнеса к ограниченной территории и возникавших в этих условиях рисков [Calomiris, Haber, 2014, с. 319]. Другой вариант сопоставлений показывает, что Канада избежала такого быстрого, но потенциально опасного наращивания активов, которое наблюдалось, например, в Британии (см. рис. 2).

Хороший запас прочности, исторически сложившаяся репутация, а также ответственные и квалифицированные действия топ-менеджеров помогли канадским банкам с относительно небольшими потерями пройти через мировые финансовые потрясения 2007–2009 гг. Серьезные проблемы возникли только у CIBC, пятого по величине банка страны, но при этом ни он, ни тем более другие кредитно-финансовые гиганты Канады не нуждались в экстренной помощи со стороны правительства за счет

налогоплательщиков [Хорошилов, 2010, с. 71–74; Williams, 2009, с. 44]. Последнее обстоятельство резко отличало Канаду от США и Европы, где для спасения ключевых финансовых институтов потребовались многие миллиарды долларов, фунтов или евро. Устойчивость банковской системы Канады, проявившаяся в кризисные времена, стала предметом особой гордости для высшей политической элиты страны [Хорошилов, 2010, с. 79], а также важной темой для научного изучения, особенно по контрасту с положением дел в Великобритании и США [Calomiris, Haber, 2014, с. 148–149, 256–277, 280–327].

В 2010 г., к моменту завершения «Великой рецессии», Канада по сумме банковских активов (2,58 трлн долл.) занимала 11-е место в мире, а Торонто (2,26 трлн) находился на девятой строке в аналогичной таблице для городов. Несмотря на происходивший подъем долевых показателей (см. рис. 1, 2), эти ранговые позиции были ниже, чем в ранний период наблюдений. Однако здесь важно учесть сдержанность канадских банков в плане наращивания активов в предкризисный период, а также, наоборот, мощную динамику роста, но с большими встроенными рисками, в отдельных европейских странах.

Следующее десятилетие стало для банковских корпораций Канады временем замечательных достижений. Давняя репутация надежных и ответственных игроков, укрепившаяся по итогам событий 2007–2009 гг., позволяла теперь несколько изменить образ действий и приступить к более решительной кредитной экспансии, а также, соответственно, к ускоренному наращиванию активов в целом. На рис. 2 видно, насколько канадская траектория разошлась не только с британской (там последствия кризиса конца 2000-х гг. оказались особенно тяжелыми), но отчасти и с американской. В прошлом банковские системы Канады и США, при естественном различии в масштабах, демонстрировали некоторое сходство по динамике и ее разворотам, что, в свою очередь, можно объяснить высоким уровнем общей экономической интеграции двух стран (или, точнее, сильной зависимостью относительно небольшой Канады от ситуации на гигантском внутреннем рынке США). В 2010-е гг. показатели США оставались довольно стабильными, тогда как доля Канады в мировых банковских активах уверенно выросла с 2,7 до 3,6%.

Но, пожалуй, самое важное из трансграничных наблюдений возникает в связи с начавшимся тогда же феноменальным усилением китайских банков, которое напоминало совершенный на 30–40 лет раньше прорыв Японии. При этом для Канады последствия двух исторических вызовов с другого бе-

рега Тихого океана существенно различались. Если в 1970–1980-е гг. японский фактор сыграл значительную роль в снижении долевых показателей Канады, то в 2010-е гг. сопоставимый по силе фактор КНР не смог перекрыть новейший подъем банковского сектора, развернувшийся в Стране кленового листа.

Увеличивая масштабы деятельности, канадские банки в то же время успешно продвигались по пути технологического прогресса. Как показано в фундаментальном исследовании Е.Е. Хорошилова, в 2010-е гг. они выдвинулись на передовые позиции в использовании искусственного интеллекта, а также включились в работу с технологиями распределенного реестра и криптовалютами [Хорошилов, 2019, с. 71–141].

В этой связи можно также заметить, что большим энтузиастом использования цифровых денег уже достаточно давно является видный канадский финансист М. Карни, который возглавлял в 2008–2013 гг. центральный банк своей страны. Не менее значительным и довольно необычным представляется другой факт – состоявшееся в 2013 г. по инициативе британского правительства Д. Кэмерона назначение М. Карни на аналогичный пост в Лондоне. Приглашение высокопоставленного администратора из заморского Королевства Содружества (а фактически из другого суверенного государства) было связано с отличной репутацией канадской банковской системы и намерением использовать опыт бывшего доминиона для стабилизации собственной финансовой машины. В итоге работа канадца М. Карни на посту управляющего Банком Англии (2013–2020 гг.) также оказалась успешной и эффективной [Павлова, 2022].

Приведенные наблюдения об общем развитии канадской банковской системы и ее международных позициях позволяют теперь сделать следующий шаг и дополнительно рассмотреть ситуацию на уровне отдельных городов и провинций страны, параллельно используя глобальные данные журнала *The Banker* и материалы профильного канадского ведомства [Office..., 2024].

Сочетание двух статистических массивов дает возможность еще раз оценить финансовое величие Торонто. Крупнейший город Канады с конца 1970-х гг. является также доминирующим банковским узлом, устойчиво контролирующим почти 90% активов. Из числа преобладающей в современной Канаде «Большой шестерки» кредитных корпораций в этом городе располагаются пять – Toronto-Dominion, RBC, Scotiabank, ВМО и СИБС. По состоянию на 2023 г. с активами, приближавшимися к 5,4 трлн долл., Торонто занимал 6-е место среди банковских столиц мира, уступая лишь Пекину, Парижу, Токио, Нью-Йорку и Лондону. Банковские корпорации Торонто обла-

дают большими офисными сетями в своей стране и за рубежом, причем не только на хорошо освоенных канадскими финансистами рынках США и Великобритании, но также в целом ряде стран Азии, Латинской Америки и континентальной Европы. Особенно важными центрами зарубежной деятельности для банков Торонто являются, вслед за Нью-Йорком и Лондоном, Гонконг, Сингапур, Токио и Пекин. В свою очередь, Торонто уже давно используется как основная точка входа на канадский рынок для финансовых групп из других стран. В настоящее время наиболее крупными канадскими подразделениями с базой в Торонто обладают такие зарубежные банки, как индийский ICICI, китайский ICBC, а также Citigroup и American Express из Соединенных Штатов [Office..., 2024].

Штаб-квартиры банков и других корпораций (например, канадского страхового гиганта Manulife) вместе с уже упоминавшейся фондовой биржей TSE делают улицу Бей-стрит и весь финансовый район Торонто соизмеримыми по значению и узнаваемости, например, с пространством вокруг Уолл-стрит и центральным Манхэттеном в Нью-Йорке, а также с Сити и Канэри-Уорф в Лондоне.

Отметим в этой же связи и другие аспекты глобального влияния Торонто, ранее затрагивавшиеся в научной литературе, например, его роль как важного узла авиаперевозок [Слука, 2005, с. 96–97], а также ярко выраженное в этом огромном городе разнообразие «интеллектуальных индустрий» и его способность «занять верхние позиции в рейтинге по привлечению талантов со всего мира» [Florida, 2010, с. 91].

Монреаль, являвшийся лидером национальной банковской системы на этапе ее становления в XIX в., постепенно сдавал свои исторические позиции. Сначала он перешел к примерному паритету с Торонто, а затем безнадежно отстал от этого могущественного конкурента из англоязычной части Канады в результате, подчеркнем еще раз, активизации квебекского сепаратизма в 1960–1970-е гг. После фактического переезда в Торонто ключевых корпораций RBC и ВМО Монреаль все же сохранил некоторое финансовое значение и остался центром управления для National Bank of Canada, входящего в «Большую шестерку», и для довольно крупного Laurentian Bank.

Также в провинции Квебек находится город Леви, где еще в начале XX в. видный предприниматель А. Дежарден создал несколько «народных касс» и заложил основы для огромной и относительно централизованной сети кредитных союзов. Ориентация на небогатых клиентов и распыленная структура собственности не стали препятствием для превращения Desjardins Group в большой меж-

региональный бизнес, сопоставимый по масштабам с ведущими классическими банками [Хорошилов, 2019, с. 24–25]. В результате сравнительно небольшой Леви и огромный Монреаль, являющийся вторым по численности населения городом Канады, оказались довольно близкими величинами в банковском секторе (при умеренном преимуществе Монреаля, которое наблюдается с конца 2000-х гг.). К настоящему времени Монреаль и Леви с показателями свыше 300 млрд долл. занимают 2-е и 3-е места в своей стране, что соответствует немного варьирующим позициям в седьмом десятке в мировой банковской иерархии.

Следующим по значению банковским центром является расположенный в западной части страны Эдмонтон (провинция Альберта). Этот город, широко известный как «нефтяная столица» Канады, в 2010-е гг. заметно продвинулся и в кредитном секторе благодаря банку Canadian Western. Названная корпорация обладает плотной филиальной сетью в трех соседних провинциях (Альберте, Британской Колумбии и Саскачеване), которая, впрочем, явно уступает общенациональным и международным сетям крупнейших банков из Торонто. Устойчивое 4-е место на национальном банковском поле с активами около 30 млрд долл. обеспечивает Эдмонтону лишь скромные позиции в третьей сотне мирового рейтинга.

Вопреки давним ожиданиям, еще менее заметной в банковском секторе является Британская Колумбия – самая западная и самая динамичная из канадских провинций. Правда, в Ванкувере, крупнейшем городе Британской Колумбии, базируется общая для всей Канады администрация британского финансового гиганта HSBC. Эта группа, как ни удивительно, по своим оборотам в Стране кленового листа далеко превосходит все упоминавшиеся иностранные корпорации, ведущие основные дела через Торонто [Office..., 2024]. Однако в том, что касается бизнеса именно канадских банков (конечно, приоритетный интерес вызывают компании с центрами управления и консолидации прибылей, находящимися внутри страны), Ванкувер, Калгари и другие западные города заметно отстают от Эдмонта и тем более от исторических финансовых узлов, расположенных в Онтарио и Квебеке.

Степень разрыва между городами центральных (Квебек, Онтарио) и западных провинций (Альберта, Британская Колумбия) становится особенно очевидной при сопоставлении банковских показателей с демографическим фундаментом (табл.). Однако столь же важно подчеркнуть, что эта диспропорция является, с одной стороны, очень резкой, а с другой – почти неизменной на протяжении четверти века.

Таблица

Доли крупнейших провинций Канады в общей численности населения страны и активах банковских корпораций в 1996 и 2021 гг., %

Провинция	Население		Активы	
	1996 г.	2021 г.	1996 г.	2021 г.
Альберта	9,4	11,5	0,2	0,5
Британская Колумбия	12,9	13,5	0	0,3
Квебек	24,8	23,0	13,8	10,2
Онтарио	37,3	38,5	86,1	88,8

Источник: рассчитано по [Office..., 2024; Statistics..., 2024; The Banker..., 2024].

Подобное наблюдение подтверждается не только малой подвижностью долевого показателя по провинциям, но и некоторыми другими обстоятельствами. В частности, очень важно то, что доля Торонто в активах всех банков страны, хотя и является крайне высокой, практически не растет: она составляла 86,1% в 1997 г. и 88,2% в 2023 г., слабо меняясь между этими датами. Мало подвержен колебаниям и другой важный показатель – коэффициент вариации (стандартный способ измерения разброса значений в числовом ряду; в данном случае такой ряд образуют величины активов для каждого из 13 канадских городов, обладавших собственными банками). Расчеты показывают, что значение этого коэффициента, составлявшее в 1997 г. 296%, к 2023 г. выросло лишь до 303%. Аналогичная картина стабильности выявляется и с помощью корреляционных замеров.

Словом, на банковском пространстве Канады доминирование Торонто сочетается с сохранением ограниченной, но устойчивой роли других городов. Аналогичным образом распределяются и важные преимущества (в виде создания квалифицированных рабочих мест и увеличения налоговых поступлений), проистекающие из наличия в структуре той или иной локальной экономики крупных финансовых корпораций. К общей стабильности национальной банковской системы добавляется, таким образом, еще один важный аспект.

Несмотря на некоторое снижение доли собственного капитала, наблюдавшееся у канадских банков на рубеже 2010–2020-х гг., они проявили свойственную им устойчивость и на фоне пандемии коронавируса в 2020–2021 гг., и в 2023 г., когда произошла серия громких банкротств среди кредитных корпораций в соседних США. Эти новейшие обстоятельства дают дополнительные основания для того, чтобы теперь, при подведении итогов, оценивать развитие банковской системы Канады преимущественно в положительном ключе.

ВЫВОДЫ

Канада занимает видное место в мировой кредитно-финансовой системе. На эту страну в начале 2020-х гг. приходилось около 4% глобальных банковских активов, тогда как ее доля в мировом ВВП составляла 2,1%, а в численности населения – менее 0,5%. Канада удерживает 6-е место в мире по суммарным активам национального банковского сообщества, опережая такие крупные страны, как Германия или Италия. Также на 6-м месте в транснациональной иерархии банковских центров с середины 2010-х гг. находится Торонто.

Наряду с этими сильными и высокими позициями, обращает на себя внимание удивительная надежность канадских банков, которые в целом благополучно преодолевали различные кризисы, включая глобальные финансовые потрясения 2007–2009 гг. Этот феномен был тесно связан с давними институциональными особенностями кредитного сектора в Канаде, главным образом, с изначально существовавшей возможностью развивать большие филиальные сети и создавать эффективно работавшие корпорации общенационального масштаба, а также с необходимостью регулярного возобновления лицензий и, соответственно, с довольно строгими надзорными требованиями. Постепенно в отрасли сложилось близкое к оптимальному сочетание рыночной свободы и государственного регулирования. Либерализация банковского дела, проводившаяся на протяжении ряда десятилетий, устранила многие избыточные ограничения и привела к еще

более мощному росту ведущих корпораций, однако барьеры для дальнейших слияний, поставленные правительством Канады в конце 1990-х гг., позволили не допустить монополизации и сохранить конкурентные механизмы. Перед кризисом 2007–2009 гг. канадские банки избежали такого наращивания рискованных активов, которое наблюдалось в США и тем более в Великобритании, а после кризиса, пользуясь высокой репутацией, смогли усилить свои позиции на мировой арене. Все это вместе взятое позволяет предполагать, что Канада и в дальнейшем сможет оставаться одним из лидеров глобальной банковской системы.

Внутри страны еще со второй половины 1970-х гг. установилось доминирование банковских сил Торонто. Следующими по значению узлами являются Монреаль и Леви, многократно уступающие лидеру, но все же уверенно входящие в первую сотню крупнейших банковских центров мира (сам же Торонто с 2009 г. неизменно представлен в первой десятке). Среди городов, расположенных в успешных и динамичных западных провинциях Канады, существенным весом на международной банковской арене обладает лишь Эдмонтон, при этом далеко отставший от трех предыдущих центров. Однако эти диспропорции остаются почти неизменными как минимум со второй половины 1990-х гг. Торонто является очень мощной, но при этом и не усиливающейся доминантой, в тени которой остается возможность для сохранения некоторых других финансовых узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Никитин Л.В. Чарльз Киндлбергер (1910–2003) и начало исследований по истории мировых и национальных финансовых центров // Вестник Пермского университета. История. 2021. № 2(53). С. 86–96. DOI: 10.17072/2219-3111-2021-2-86-96.
- Никитин Л.В. Финансовые бури на Тихом океане: соперничество США и Японии в банковской сфере (1970–2020 годы) // Вестник Пермского университета. История. 2022. № 4(59). С. 51–61. DOI: 10.17072/2219-3111-2022-4-51-61.
- Слука Н.А. Градоцентрическая модель мирового хозяйства. М.: Пресс-Соло, 2005. 168 с.
- Хорошилов Е.Е. Новые технологии в финансовом секторе: опыт Канады. М.: Весь мир, 2019. 224 с.
- Хорошилов Е.Е. Финансовый сектор Канады и мировой экономический кризис // США и Канада: экономика, политика, культура. 2010. № 7(487). С. 67–82.
- Calomiris C.W., Haber S.H. *Fragile by Design: The Political Origins of Banking Crises and Scarce Credit*, Princeton, Princeton University Press, 2014, 584 p.
- Florida R. *The Great Reset: How New Ways of Living and Working Drive Post-Crush Prosperity*, New York, Harper, 2010, 235 p.
- Grossman R.S. *Unsettled Account: the Evolution of Banking in the Industrialized World since 1800*, Princeton, Princeton University Press, 2010, 408 p.
- Kennedy C. *Evolution of Great World Cities: Urban Wealth and Economic Growth*, Toronto, University of Toronto Press, 2011, 252 p.
- Kerlin J. Development of Deposit Insurance Systems in the World, *Journal of Management and Financial Sciences*, 2015, no. 22, p. 33–43.
- Kyer C.I. *From Next Best to World Class. The People and Events That Have Shaped the Canada Deposit Insurance Corporation*, Ottawa, CDIC, 2017, 297 p.
- Williams R.A. Exogenous Shocks in Subsystem Adjustment and Policy Change: The Credit Crunch Canadian Banking Regulation, *Journal of Public Policy*, 2009, no. 1, p. 29–53.
- Электронные источники
Павлова О.Ю. Банк Англии под руководством Марка Карни (2013–2020 гг.): в поисках новой стабильности // Российский экономический интернет-журнал. 2022. № 2. URL: https://www.e-rej.ru/publications/196/?PAGEN_1=2 (дата обращения 15.10.2023).

- Office of the Superintendent of Financial Institutions. Financial Data for Banks. URL: <https://www.osfi-bsif.gc.ca/en/data-forms/financial-data/financial-data-banks> (дата обращения 04.02.2024).
- Statistics Canada. Census of Population. URL: <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/index-eng.cfm?MM=1> (дата обращения 04.02.2024).
- The Banker Database. Top 300/500/1000 World Banks, 1970–2023. URL: <https://thebanker.com> (дата обращения 03.04.2024).
- United Nations Statistical Division. National Accounts. URL: <https://unstats.un.org/unsd/snaama> (дата обращения 11.02.2024).

Поступила в редакцию 15.03.2024

После доработки 23.08.2024

Принята к публикации 26.11.2024

CANADA'S ROLE IN THE GLOBAL BANKING SYSTEM (1970s – EARLY 2020s)

L.V. Nikitin

*South Ural State Humanitarian Pedagogical University, Department of World History, Professor;
South Ural State University, Department of International Relations, Political Science and Regional Studies,
Associate Professor; D.Sc. in History; e-mail: contlab2003@gmail.com*

On the basis of international and national statistical reports the article examines how Canada's role in the global banking system has changed since the early 1970s until now. Throughout almost the entire period under study the country's share in world banking assets, despite some fluctuations, exceeded its share in the world GDP. For many decades, the Canadian banking community managed to maintain a strong international position and overcome various economic crises, including the Great Recession of 2008–2009, without significant losses. The stability could be explained by the long-standing institutional features of the Canadian banking system (for example, practice of regular license renewal), as well as a fairly flexible combination of market freedom and government regulations during the period under review. Canada's position in the rankings has changed as follows: being the sixth largest power in the global banking in 1970, the country went down to 12th position by the mid-1990s, but then began a new ascent, and returned to sixth place in 2020. Canada's current share remains somewhat lower than in 1970, which could be explained by a significant increase in the number of countries operating at the global banking arena. Toronto is the undisputed leader in banking among Canadian cities; back in the late 1970s it got away from its main competitor (Montreal) against the challenging political events of that period. Currently, Toronto ranks sixth in the world in terms of the total assets of local banks. The next most important centers (Montreal, Levis and to some extent Edmonton) also enjoy a fairly great and stable prestige within the global banking system. Despite the dominance of Toronto, the continued independent role of these financial hubs gives additional stability to Canada's banking community.

Keywords: Toronto, geography of banks, global financial system, ranking

REFERENCES

- Calomiris C.W., Haber S.H. *Fragile by Design: The Political Origins of Banking Crises and Scarce Credit*, Princeton, Princeton University Press, 2014, 584 p.
- Florida R. *The Great Reset: How New Ways of Living and Working Drive Post-Crush Prosperity*, New York, Harper, 2010, 235 p.
- Grossman R.S. *Unsettled Account: the Evolution of Banking in the Industrialized World since 1800*, Princeton, Princeton University Press, 2010, 408 p.
- Kennedy C. *Evolution of Great World Cities: Urban Wealth and Economic Growth*, Toronto, University of Toronto Press, 2011, 252 p.
- Kerlin J. Development of Deposit Insurance Systems in the World, *Journal of Management and Financial Sciences*, 2015, no. 22, p. 33–43.
- Khoroshilov E.E. Finansovyi sektor Kanady i mirovoi ekonomicheskii krizis [Canada's Financial Sector and World Economic Crisis], *USA & Canada: Economics, Politics, Culture*, 2010, no. 7(487), p. 67–82. (In Russian)
- Khoroshilov E.E. *Novye tekhnologii v finansovom sektore: opyt Kanady* [New Technologies in Canadian Financial Sector], Moscow, Ves Mir, 2019, 224 p. (In Russian)
- Kyer C.I. *From Next Best to World Class. The People and Events That Have Shaped the Canada Deposit Insurance Corporation*, Ottawa, CDIC, 2017, 297 p.
- Nikitin L.V. Charl'z Kindlberger (1910–2003) i nachalo issledovaniy po istorii mirovykh i natsional'nykh finansovykh tsentrov [Charles P. Kindleberger (1910–2003) and the Beginning of Studies on the History of Global and National Financial Centres], *Vestnik Permskogo Universiteta. Istoriya*, 2021, no. 2(53), p. 86–96. DOI: 10.17072/2219-3111-2021-2-86-96. (In Russian)
- Nikitin L.V. Finansovye buri na Tikhom okeane: sopernichestvo SShA i Yaponii v bankovskoi sfere (1970–2020 gody) [Financial Storms in the Pacific: the USA-Japan Competition in the Banking Sector (1970–2020)], *Vestn. Permskogo Un-ta, Istoriya*, 2022, no. 4(59), p. 51–61, DOI: 10.17072/2219-3111-2022-4-51-61. (In Russian)

- Sluka N.A. *Gradotsentricheskaya model' mirovogo khozyaistva* [City-centric Model of the World Economy], Moscow, Press-Solo Publ., 2005, 168 p. (In Russian)
- Williams R.A. Exogenous Shocks in Subsystem Adjustment and Policy Change: The Credit Crunch Canadian Banking Regulation, *Journal of Public Policy*, 2009, no. 1, p. 29–53.
- Web sources*
- Office of the Superintendent of Financial Institutions. Financial Data for Banks, URL: <https://www.osfi-bsif.gc.ca/en/data-forms/financial-data/financial-data-banks> (accessed 04.02.2024).
- Pavlova O.Yu. Bank Anglii pod rukovodstvom Marka Kar-ni (2013–2020 gg.): v poiskakh novoi stabil'nosti [The Bank of England under Mark Carney (2013–2020): Searching for New Stability], *Russian Economic On-line Journal*, 2022, no. 2, URL: https://www.e-rej.ru/publications/196/?PAGEN_1=2 (accessed 15.10.2023). (In Russian)
- Statistics Canada. Census of Population, URL: <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/index-eng.cfm?MM=1> (accessed 04.02.2024).
- The Banker Database. Top 300/500/1000 World Banks, 1970–2023, URL: <https://thebanker.com> (accessed 03.04.2024).
- United Nations Statistical Division. National Accounts, URL: <https://unstats.un.org/unsd/snaama> (accessed 11.02.2024).

Received 15.03.2024

Revised 23.08.2024

Accepted 26.11.2024

ДОХОДЫ ЖИТЕЛЕЙ ЕВРОПЕЙСКИХ СТОЛИЦ И РАССЕЛЕНИЕ ИММИГРАНТОВ

Д.П. Шатило

Центр междисциплинарных исследований, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: dariabit@yandex.ru

Статья посвящена изучению взаимосвязи расселения иммигрантов и доходов жителей крупных европейских столиц на примере Лондона, Мадрида и Берлина в последние 30 лет. Города выбраны по важности иммиграционных процессов, доступности порайонных статистических материалов и роли в своих странах. Эти города привлекали большое количество иммигрантов, особенно в последние 30 лет (а Лондон раньше из-за притока выходцев из бывших колоний). На примере стоимости жилья и распределения доходов показано социально-этническое расслоение. В результате исследования составлены типологии районов городов по доле иммигрантов, уровню доходов и ценам на жилье, отличающихся большой мозаичностью и неоднородностью территорий. По четырем европейским столицам было показано, что гипотеза зависимости между микрогеографией доходов и мигрантов подтверждается не всегда. Самая сложная картина – в Лондоне. В Берлине и Мадриде видны сектора локализации мигрантов, но там (не говоря о Москве) труднее выявить их связь с расслоением по доходам. Одной из наиболее примечательных характеристик исследуемых городов можно назвать растущее число иммигрантов и их долю в населении, которая может достигать 15–25%. Этот факт уже сам по себе становится значимым элементом социального расслоения. В то же время иммиграция в каждом городе обладает своими особенностями и разнообразием. Различия между группами иммигрантов во многом определяют степень их изоляции или интеграции в социальное пространство города. Лондон притягивает всех, как богатых, так и малоимущих. В Берлине еще заметны следы бывшего раздела города. В Мадриде наблюдается концентрация латиноамериканцев, близких по культуре. А в Москве приток иммигрантов зачастую провоцирует нарастание культурной дистанции между ними и москвичами. Большая доля иммигрантов, их слабая интеграция в принимающее общество, межэтнические конфликты приводят к уменьшению толерантности и усилению социальных и этнических контрастов.

Ключевые слова: стоимость жилья, Лондон, Берлин, Мадрид, Москва, социальная дифференциация

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.9

ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящего исследования заключается в анализе взаимосвязи расселения иммигрантов и доходов жителей крупных европейских столиц (Лондона, Берлина, Мадрида и Москвы). Видя в доле иммигрантов и имущественных показателях – доходах населения и стоимости жилой недвижимости – ключевые моменты внутригородского социального и этнического расслоения территорий выбранных столиц, было решено попытаться выявить основные особенности каждой из них и общие черты. Научную проблему можно свести к интеграции иммигрантов в принимающее общество. Первая задача приезжего – это все же крыша над головой, а далее следует трудоустройство, получение доходов и др.

В отсутствии качественной статистической базы по иммигрантам приходится искать творческий подход к изучению территориальной структуры мигрантов через некоторые гипотезы и взаимосвязи. Поэтому интерес также представляет и распределение стоимости жилья – исходная гипотеза о том, что зоны низких доходов и дешевого жилья совпадают

с местами концентрации иммигрантов (однако это далеко не всегда так). Поскольку социальная дифференциация – сложное явление и широкая категория, и в настоящем исследовании изучается сразу несколько объектов, а само материальное благополучие включает в себя разные характеристики. Чаще всего это денежные доходы: зарплаты, пенсии, стипендии, пособия, доходы от бизнеса, личного имущества и др. [Alexander, 2007; Bailey et al., 2017]. При этом сведения собираются по-разному: в одних городах есть порайонные данные о средних доходах, в других – о медианных, которые, как правило, более низкие. Кроме того, данные о доходах могут собираться по всем жителям или домохозяйствам с учетом или без учета прожиточного минимума, а также только по занятым [Burgers, Musterd, 2002; Musterd, 2005]. Статистика по районам для Москвы есть только о зарплате по месту работы: в отличие от других столиц, предпринимательские и иные доходы здесь не учтены, зато добавлены данные о зарплатке занятых в столице, но живущих за ее пределами. Кроме того, трудно синхронизировать массив

данных по изучаемым столицам и притом добиться их максимальной актуальности. В настоящем исследовании абсолютные показатели использованы с «оговорками», о которых поговорим при исследовании конкретных городов, представляется интересным именно рассмотрение территориальной структуры иммигрантов и взаимосвязь с распределением доходов. Образ Москвы постоянно незримо присутствует при рассмотрении столиц, но данных для ее полноценного исследования недостаточно, однако совсем не рассматривать ее при сравнении столиц не считается, по мнению автора, уместным, т. к. социальные процессы и в ней протекают неоднородно. Кроме того, опыт западноевропейских столиц может быть применен к Москве для разработки более качественной миграционной политики, например.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматривая доходы жителей западноевропейских столиц и расселение иммигрантов нужно также говорить о социальном расслоении. Это ключевая проблема, влияющая на процессы в городе. В научных работах считается, что социальное неравенство в европейских городах ниже, чем, например, в городах США, но все же оно постоянно растет [Кельман, 2014; Bailey et al., 2017; Алов, 2021]. Для исследования социального неравенства и территориальной структуры города учеными создавались соответствующие модели, начиная с Чикагской школы. Из пространственных моделей городов выделяют концентрическую модель Э. Берджесса, секторную модель Х. Хойта, многоядерную или модель множественных центров Ч. Харриса и Э. Ульмана.

Нередко зарубежные исследователи сводят анализ к построению математических моделей, иногда рассматривая города «как точки на карте». Исследований на эту тему много, но географического и территориального подхода практически не найти, еще реже встречается сравнение нескольких городов. Дифференциация городского пространства подразумевает, по мнению зарубежных ученых, сегрегацию и концентрацию. Этническое и социальное территориальное неравенство – абсолютно разные понятия. Показано, что социальное неравенство неточное и может считаться более грубым аспектом для изучения этнической сегрегации [Шатило, 2018]. Существуют различные объяснения концентрации и сегрегации, например этнокультурные, поведенческие, территориальные. Также изучаются предпринятые активные усилия принимающего социума по более интенсивной ассимиляции и интеграции [Савоскул, 2015].

Среди ученых, занимающихся социальной и этнической дифференциацией Москвы, можно вы-

делять работы отечественных географов [Капранов, 2008; Мкртчян, 2009; Мкртчян, Флоринская, 2016; Зайончковская и др., 2012; Зубаревич, 2019; Тревиш, 2017; Слука, 2009]. Внимание часто акцентируется на общегородских данных без учета внутригородской территориальной структуры. Интересны работы О.И. Вендиной по Москве, потому что именно здесь наблюдаются серьезные недостатки порайонных данных о числе и доле иммигрантов [Вендина и др., 2019]. Вопросы сегрегации в городах рассмотрены в работах по Мадриду и Берлину [Kemper, 1998; Fujita, 2012; Grzegorzczuk, 2013; Lelo et al., 2021].

Рынок жилой недвижимости на примере Москвы изучен в работах А.Г. Махровой [Махрова, 2014], А.А. Попова [Попов, 2007], В.Р. Битюковой [Битюкова и др., 2006; Bityukova et al., 2016] и др.

Во введении отмечено, что доходы определяются по-разному, и это делает их не вполне сопоставимыми между разными изучаемыми городами, заставляя искать другие индикаторы расслоения. Вот почему (среди прочего) предприняты трудоемкие расчеты цен на жилье по сайтам риелторских фирм. Они выполнялись долго, поэтапно, но всюду доведены, как минимум, до 2024 г. и отражают динамику за последние 10–15 лет в исследуемых городах [Шатило, 2024].

Доход и трудоустройство – одни из важных причин прибытия мигрантов. Важно посмотреть, как они связаны между собой, поэтому статья посвящена их сопряженному анализу, уточняя географию социальных болезней городов и адаптации горожан к их среде [Massey, Fischer, 2000; Friedrichs et al., 2003; Häussermann, Naila, 2005; Friedrichs, Triemer, 2008].

Из-за разного учета доходов сравнивать их можно лишь внутри стран. Оправдать использование довольно давних данных по доходам можно их детальностью, приведением их к сравнимому виду, а также атипичностью начала 2020-х гг. из-за пандемии и смежных эффектов, отсутствием порайонной дробной более новой статистики. Важно, что проблема социально-этнического расслоения остается актуальной, а ситуация меняется не очень быстро.

Цены на жилье собирались и обрабатывались автором по определенному алгоритму (для более точного анализа, чтобы исключить повторы предложений о продаже/аренде и спекулятивные объявления) с 2008 г. Сравнялось «типичное жилье» – это квартиры или дома с двумя спальнями, т. е. трехкомнатные, потому что именно эти объекты пользуются наибольшим спросом, в т. ч. среди иммигрантов. Материалы по иммигрантам использованы из официальных городских или страновых статистических баз данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Лондон. Статистика фиксирует по регионам страны доходы домохозяйств и персональные. В 2022 г. из 50 районов Лондона и окрестных графств с самыми высокими доходами без учета расходов на жилье 47 находились в Лондоне, включая Вестминстер, Кенсингтон и Челси, Уондсворт и Камден [ONS, 2023; Информационный государственный портал, 2024].

Доходы во Внутреннем Лондоне выше, чем во Внешнем. Через центр с севера на юг со смещением к западу следует полоса высоких доходов, похожая на полосу дорогого жилья. Налицо обратная зависимость между доходом и притоком мигрантов (рис. 1). Почти везде, где медианный доход высок, их приток мал, и наоборот. Получается, что связь миграции с доходом здесь теснее, чем с ценой на жилье.

Недвижимость – главная слагаемая финансовых активов, и Лондон – чемпион страны по ее стоимости.

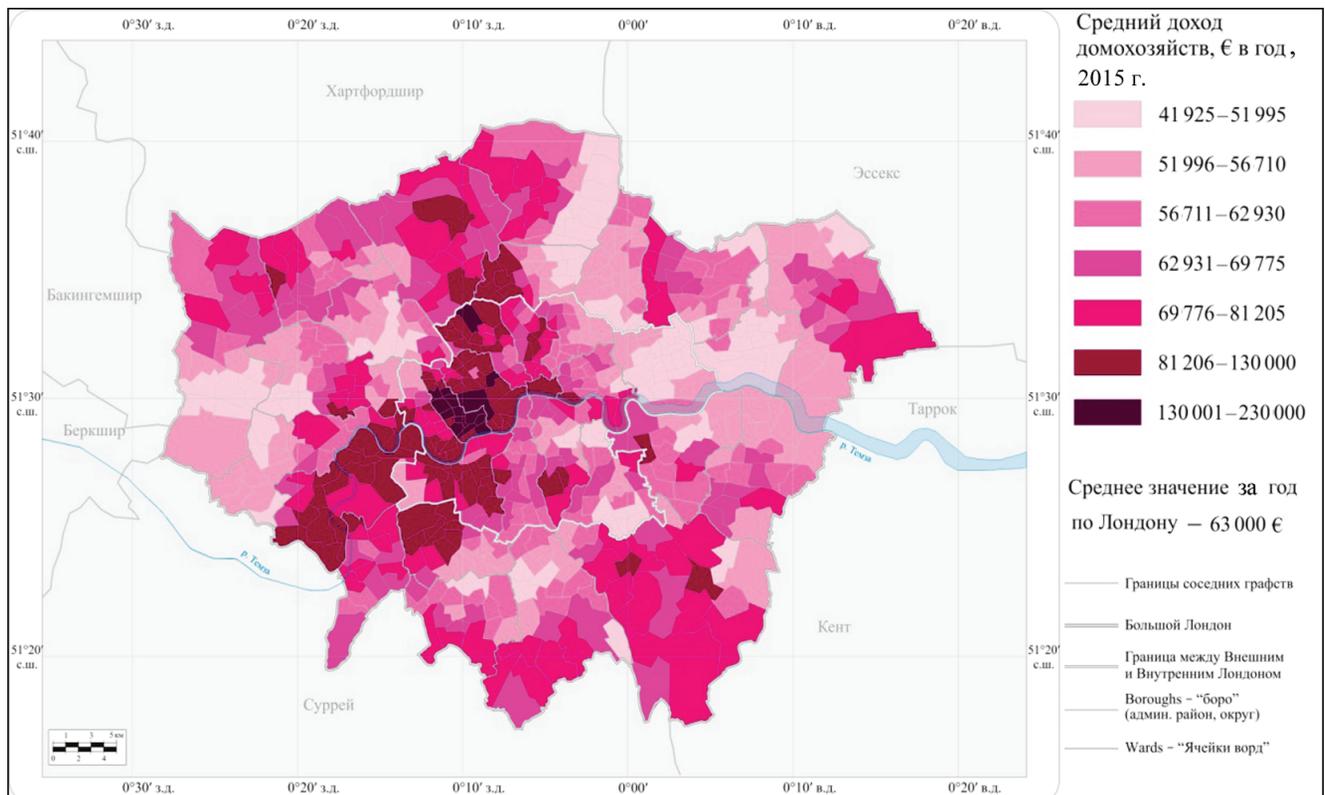


Рис. 1. Средний доход домохозяйств по кварталам (Wards) Лондона (с учетом прожиточного минимума), € в год, 2015 г. *Источник:* [CACI Ltd, 2016; ONS, 2023]

Fig. 1. Average household income by ward (Wards) in London, € per year, 2015. *Source:* [CACI Ltd, 2016; ONS, 2023]

Для сравнения уровней расслоения районов города и регионов страны рассчитан коэффициент Джини. В Лондоне по доходам без учета цен он составил 0,078, на 0,042 пункта больше, чем по регионам Великобритании, и еще выше с учетом прожиточного минимума (ПМ).

Все это подтверждает два *методических вывода*:

1. При анализе неравенства важен размер территориальной ячейки. Так, по кварталам поляризация доходов лондонцев выше, чем по округам-боро. Доходы с учетом цен (ПМ) дают более достоверные результаты в столичных городах, где жизнь дороже.

2. Сравнение социальной поляризации внутри города и по регионам страны не вполне корректно

из-за разной структуры расходов: в городе важнее траты на жилье.

Если же сравнить расслоение по доходам в Москве и в Лондоне, то в Лондоне оно будет меньше, но это не спасло его от беспорядков в 2011 г. Они начались в Тоттенхэме, где у 15% домохозяйств доход ниже 16,9 тыс. евро, 50% медианного. Но рядом их доля еще выше: 16–18%.

Составим *типологию районов Лондона по факторам социального расслоения*: доле мигрантов, среднему доходу, цене жилья и его аренды. Главный признак – доля мигрантов. По остальным выделены подтипы, отразившие мозаичную картину расслоения (табл. 1). В районах первого типа мигрантов бо-

лее 50%. Судя по индексу благополучия, депривированные ареалы находятся там, где меньше всего британцев европеоидной расы (англ. white). Ареалы второго типа разбросаны, но в основном по оси север – юг. «Цветные» жители здесь обычно образова-

ны, соседствуют с британцами европеоидной расы.

Третий тип (мигрантов мало, этнических кварталов почти нет) – это периферия с разным жильем и разным достатком проживающих. Мигранты чаще «старые» – пакистанцы, индийцы.

Таблица 1

Типология районов Лондона по доле иммигрантов, уровню доходов и ценам на жилье

Тип по доле иммигрантов	Подтип	Районы	Комментарии
1. С максимальной долей мигрантов (50–70%)	1.1. Низкие доходы, умеренная цена жилья и его аренды	Брент, Хэринги, Илинг, Ньюхэм	«Свежие» мигранты, пакистанцы, бангладешцы, мулаты (Хэринги)
	1.2. Средние доходы и цены	Хэрни, Хэрроу, Ламбет	Адаптированные мигранты (особенно индусы)
	1.3. Высокие доходы, высокие цены	Вестминстер, Тауэр Хэмлетс	В «дорогом» центре мигранты разные, многим «неуютно»
2. Со средней долей мигрантов (30–50%)	2.1. Низкие доходы, средняя цена аренды и разные цены продажи	Инфилд, Хаунслоу, Уолтхэм Форест	Периферия с разным жильем, мигранты из Южной Азии, черные африканцы
	2.2. Средние доходы, цены жилья и его аренды	Люишем, Мертон, Барнет, Саутварк	Британцы европеоидной расы (англ. white), южные азиаты, китайцы, афрокарибцы
	2.3. Средние доход и цена продажи, дорогая аренда	Хаммерсмит и Фулхэм, Ислингтон	Много выходцев из Африки и Карибов
	2.4. Средний доход, дешевая аренда и контрастные цены на жилье	Рэдбридж, Кройдон	Периферия с разной застройкой, выходцы из Южной Азии
	2.5. Высокий доход, дорогие аренда и недвижимость	Кэмден, Сити, Вандсворт, Кенсингтон и Челси	Престижные места, «убежища опальных олигархов»
3. С минимальной долей мигрантов (7–30%)	3.1. Невысокие доходы, дешевая аренда, дорогая недвижимость	Баркинг и Дагенхэм, Бексли	«Зона регенерации», много индусов, пакистанцев
	3.2. Дешевая аренда, разные доходы и цены на жилье	Бромли, Гринвич, Хаверинг, Саттон, Хилингдон	Самые дальние районы с разным составом жителей
	3.3. Высокие доходы, средняя аренда и дорогое жилье	Кингстон на Темзе, Ричмонд	Заметна доля потомков от смешанных браков

Источник: составлено автором.

Вся типология вновь показывает сложность и мозаичность городской ткани. На уровне ячеек «ворд»¹ выясняется, что районы с низкими доходами и ценой на жилье или его аренда возникают не просто при высокой доле мигрантов, а при их низкой адаптивности, особенно если страна происхождения очень бедна. Наименее обеспеченные иммигранты селятся кучно, в ареалах плотной застройки, часто снимая небольшую квартиру на многих жильцов [Patricia, 1998; Patterns..., 2005; Clark, 2009; Peach, 2009; Poulsen, 2011; The London Index of Deprivation, 2008].

¹ Основные районы Лондона (боро), которых 33, включают 624 квартала (word – ворд).

Связь расселения групп мигрантов с доходами и ценой на жилье не всегда очевидна. Одно из исключений – коренные африканцы: их расселение тяготеет к срединным частям восточного сектора, где минимальны доходы и невысоки цены. А другие люди европеоидного происхождения (не британцы европеоидной расы) – к той субмеридиональной полосе через центр, что видна на картах доходов и цен на жилье, но с тем отличием, что даже ближайšie к центру кварталы округа Брент отличает дешевизна жилья (т. е. в целом округ Брент довольно дешевый и в нем почти нет «цветного» населения).

Мадрид. Из-за нехватки статистических данных можно начать с размера домохозяйств, в среднем

состоящего из 2,52 чел. Он связан со многими факторами: жильем, районом, доходом, связями и т. д.

Почти половина «одиночек» приходится на район Центр и близкие кварталы в районах Саламанка, Чамбери. Отчасти это следствие старения. География расселения семейных пар равномернее. Обилие малых семей в центральных районах само по себе не делает их благополучными, а там, где много семей из пяти и более человек, соци-

альные показатели бывают выше. Это связано с системой социальной поддержки [Barómetro de inmigración, 2016; INE, 2016–2024; El País, 2016–2024]. Важна и застройка – в Центре меньше жилой площади.

На уровне кварталов разрыв сильнее, достигая 6,4 раз. Картина, в общем, та же, что и в Лондоне, но мозаичнее (рис. 2). В центральных районах контрастные кварталы соседствуют.

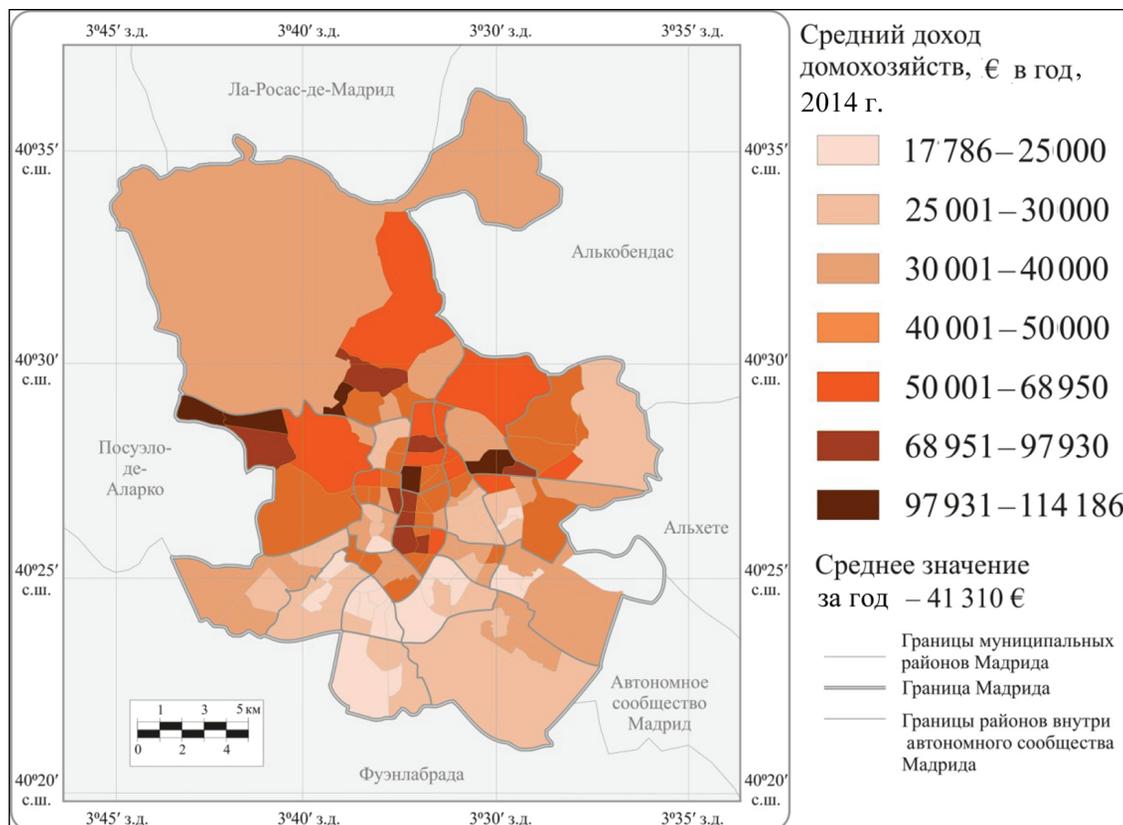


Рис. 2. Средний доход домохозяйств по кварталам Мадрида, € в год, 2014 г.

Источник: составлено автором по [INE, 2017]

Fig. 2. Average household income by neighborhood in Madrid, € per year, in 2014.

Source: [INE, 2017]

Типов районов (табл. 2) тоже три, но градации выбраны именно для Мадрида. «Мигрантский» первый тип включает подтипы с низкими или средними доходами и ценами.

Тип районов со средней долей мигрантов в населении района разделился на большее число подтипов. Предприятия из промышленного пригорода с территорий южных окраин выводили еще дальше в пригороды или вовсе закрывали, строя на их месте жилые кварталы с 6–8-этажными домами, где архитектура разная: от модернизма до неоготики и неомудехара (это влияет на стоимость жилья и престижность района). Есть разнородные районы, где парки, памятники и дорогие кварталы сменяются на юге районов мигрантскими. В Викальваро (2.3)

находится крупное месторождение сепиолита, портящее имидж [El País, 2023]. На месте цементного завода Валдеривас, закрытого в 1998 г., выстроен одноименный жилой массив. На западе (Латина) были трущобы, теперь это более уютный спальный район. Недостает медицинских центров, школ и ДОУ, общественного транспорта. Жители жалуются на экологию: в 2 км к востоку, за чертой Мадрида, дымит мусоросжигательный завод [INE, 2024].

Третий тип (мигрантов мало) включает север, восток и часть центра. Барахас известен как район престижных клиник, бизнес-центров, элитных кварталов, не уступающих центральному и западному, здесь расположен международный аэропорт Мадрид-Барахас.

Таблица 2

Типология районов Мадрида по доле мигрантов, доходам и ценам на жилье

Тип по доле иммигрантов	Подтип	Районы	Комментарии
1. С максимальной долей (25–30%)	1.1. Низкие доходы, средняя цена на жилье	Усера. Вильяверде, Карабанчель	Многоэтажные районы к югу от центра, исторически привлекавшие мигрантов. Традиционно здесь низкие социальные показатели
	1.2. Средние доходы, средняя цена на жилье	Тетуан, Центр	Неоднородные районы с сочетанием малоэтажной, средне- и многоэтажной застройки. Неплохо развита деловая инфраструктура, имидж значительно лучше, чем у подтипа 1.1
2. Со средней долей (20–25%)	2.1. Высокие доходы и цены на жилье	Чамартин, Чамбери	Чамартин – дорогой среднеэтажный район с несколькими жилыми небоскребами, Чамбери – реконструированный промышленный. Много уникальных исторических объектов
	2.2. Средние доходы и цены на жилье	Сьюдад Линеаль Аргансуэла	Сьюдад Линеаль в средней категории из-за соседства бедных и дорогих кварталов с высокими доходами, ценами на жилье. Район Аргансуэла отличается редевелопмент промзон
	2.3. Низкие доходы и средняя цена на жилье	Викальваро Латина	Большая часть Викальваро – промзона. Есть как малоэтажная застройка, так и здания до 10 этажей. Трущобные зоны района Латина в большинстве реконструированы
	2.4. Низкие доходы и низкие цены на жилье	Вилья де Вальекас Пуэнте де Вальекас	Районы периферии с ощутимой нехваткой социальной инфраструктуры. Есть нарекания на плохую экологическую ситуацию
3. С минимальной долей (10–20%)	3.1. Высокие доходы и цены на жилье	Барахас	В районе расположены бизнес-центры и важные объекты здравоохранения
		Монклоа-Аравака Саламанка	Элитные жилые районы, окруженные парками и лесными зонами
	3.2. Средние доходы и цены на жилье	Мораталас, Ретиро, Орталеса, Фуэнкарраль-Эль-Пардо	Обширные районы к северу от центра, в основном зеленые и многоэтажные
	3.3. Низкие доходы и цены на жилье	Сан Блас-Канильехас	Район многоэтажек, старые фабрики, в т.ч. действующие, новые промышленные объекты

Источник: составлено автором.

Таким образом, территория Мадрида четко делится как по географическому принципу (дорогой престижный центр, где концентрация иммигрантов объясняется их работой в семьях, богатый коттеджный запад, промышленный многоэтажный восток и частично юг), так и по доходам, ценам на жилье. Но их взаимосвязь заметна не везде. Ареалы с высокой долей иностранцев окружают центр, тяготея к юго-западному сектору. Они часто селятся компактно, несмотря на обилие культурно близких латиноамериканцев.

Берлин. Статистическое бюро Берлин-Бранденбург и Департамент сената приводят сведения по доходам лишь в разрезе округов, там, где много безработных, а в центре – небогатых студентов. С 2015 г. Департамент сената публикует сведения о чистом медианном доходе, а не о среднем (рис. 3).

В шести округах он ниже среднего городского, а самый низкий – в Нойкельне. Самый высокий медианный доход отмечен в Штеглиц-Целендорфе на юго-западе. Картина практически та же, что и по средним доходам.

В целом жилье дороже там, где выше доходы (Шарлоттенбург-Вильмерсдорф и др.). Но зачастую люди с достатком живут и в округах со средней стоимостью жилья. Этому способствует специфика берлинского рынка жилья, рассмотренная выше. Где же? Об этом статистика умалчивает.

Типологию районов Берлина по доле мигрантов, доходам и стоимости жилой недвижимости содержит табл. 3.

Первый тип: Нойкельн, непрестижный в Западном Берлине округ у стены, заселяли турки и арабы.

В районе Гропиусштадт 90% социального жилья, но с начала XX в. много зданий в стиле модерн из Списка Всемирного наследия [Sen, Goldberg, 1994; Van Kempen, Şule Özüekren, 1998; Häussermann, Kapphan, 2002]. Это влияет на общественный образ района и

отчасти на стоимость жилья. Фридрихсхайн-Кройцберг был депрессивным промышленным районом, он проходит стадию джентрификации, но уровень доходов снижает обилие студентов [Статистический портал..., 2023; Статистическое бюро..., 2024].

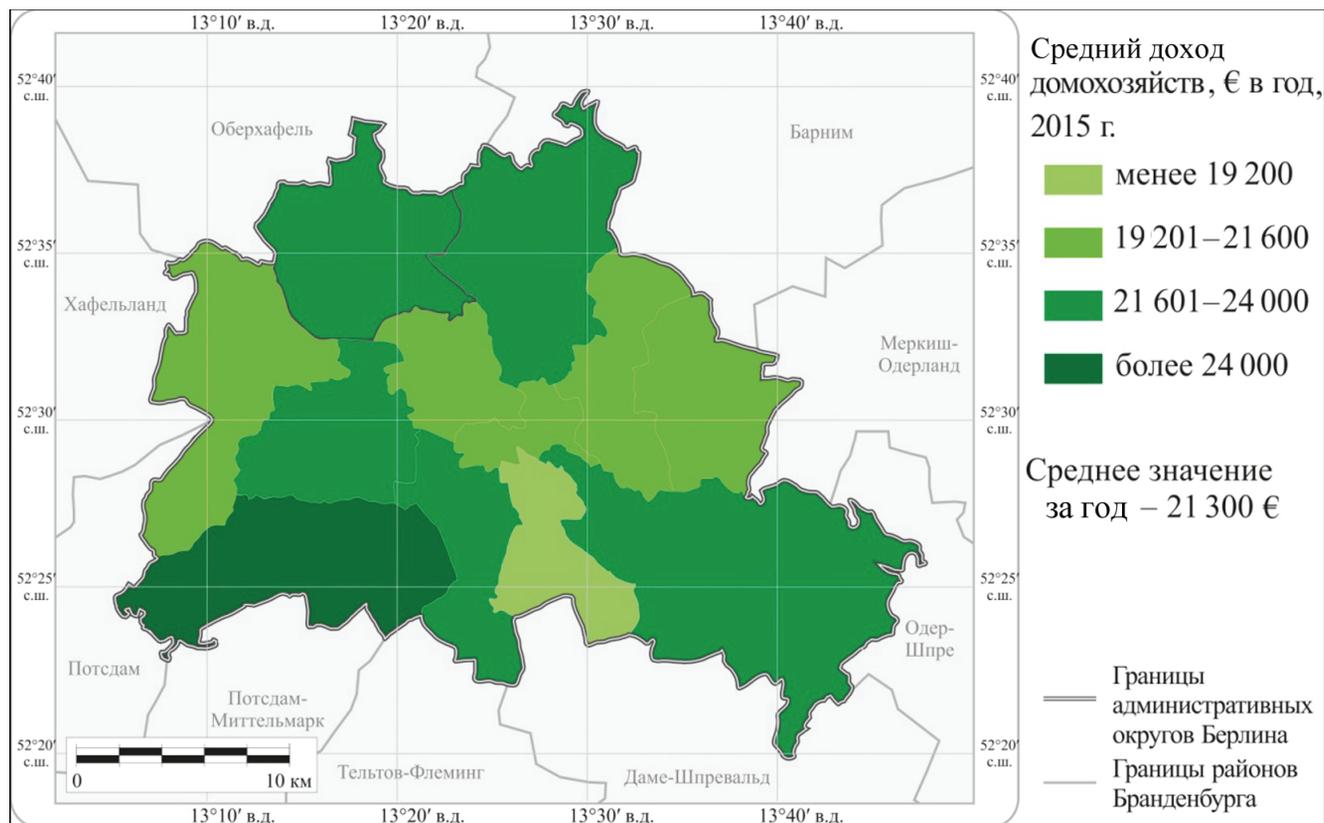


Рис. 3. Чистый медианный доход домохозяйств Берлина (после вычета налогов), € в год, 2015 г.

Источник: [Департамент..., 2016]

Fig. 3. Net median household income in Berlin, € per year, 2015. Source: [Department..., 2016]

Второй тип характерен для западной части города. В 1960–1980-х гг. там строили жилые комплексы. Антипод – Шарлоттенбург-Вильмерсдорф имеет дорогое жилье. Историческая застройка чередуется с многоэтажками. Здесь расположен берлинский чайнатаун («Азиатаун»).

Третий тип (мигрантов мало, из бывших стран социалистического содружества) – восточный, где исторически территории массово застраивались многоквартирным жильем.

Итак, в Берлине особенно ярко проступает деление восток – запад. Лаконичная типология его округов в этой связи закономерна. Концентрация выходцев из исламских стран наблюдается в районах с низкими доходами – это центр города, у бывшей стены. С западной ее стороны центр был дешевле и «собирал» мигрантов. На востоке доля выходцев из исламских стран меньше, преоблада-

ют выходцы из соцстран. Это сочетается с относительной бедностью и дешевизной жилья: цены в панельных домах времен ГДР умеренные даже для Берлина. В престижных районах Западного Берлина население богаче, жилье дороже, а мигрантов больше из стран ЕС.

Территориальная сегрегация в Берлине отдельных групп не слишком зависит от их доходов и цен на жилье, поскольку берлинские цены доступнее лондонских, если не считать районов исторической застройки, которых после войны осталось мало. Как уже говорилось, Берлин до недавнего времени отличался от многих столиц меньшей остротой этносоциальных проблем. Но там, где кучно живут выходцы из Турции, давно возникали проблемы интеграции, незнания немецкого языка, который не хотят учить дети, поскольку общаются в основном с земляками, и т. д.

Таблица 3

Типология районов Берлина по доле иммигрантов, уровню доходов и ценам на недвижимость

Тип по доле мигрантов	Подтип	Округа	Комментарии
1. С максимальной долей мигрантов (35–45%)	1.1. Низкие доходы, дешевое жилье	Нойкельн	Жилье в районе у стены после ее возведения дешево, его стали занимать турки и арабы. С тех пор имидж радикально не улучшился, мигрантов по-прежнему очень много
	1.2. Низкие доходы, средние цены на жилье	Митте, Фридрихсхайн-Кройцберг	В этих районах много кварталов с повышенной долей мигрантов, особенно турецкого, ливанского, палестинского и боснийского происхождения. Много и студентов со скромными доходами. В совокупности это определяет их низкий средний уровень доходов и возможности снять жилье
2. Со средней долей мигрантов (20–35%)	2.1. Высокие доходы, дешевое жилье	Райниккендорф	Много коттеджных домов для небольших семей, дешевых при наличии парков и озер, что вызвано близостью аэропорта Тегель
	2.2. Высокие доходы, средние цены на жилье	Шпандау, Штеглиц-Целендорф, Темпельхоф-Шенеберг	Шпандау – периферия, где преобладают выходцы из Ливана, постсоветских стран, как и в Темпельхоф-Шенеберг. В округе Штеглиц-Целендорф состав мигрантов сложнее: США, Иран и др.
	2.3. Высокие доходы, дорогое жилье	Шарлоттенбург-Вильмерсдорф	В округе много кварталов с исторической застройкой и зелеными насаждениями. Среди мигрантов преобладают европейцы (французы, англичане, итальянцы), состоятельные выходцы с Ближнего Востока
3. С минимальной долей мигрантов (7–20%)	3.1. Низкие доходы, дешевое жилье	Лихтенберг	В Лихтенберге цена связана с застройкой (высотные жилые дома). Преобладают русские, казахи, вьетнамцы
	3.2. Средние доходы, средние цены на жилье	Марцан-Хеллерсдорф, Трептов-Кепеник	В Марцан-Хеллерсдорф больше всего выходцев из постсоветских стран (России, Казахстана) и Вьетнама. В Трептов-Кепеник много зелени и воды, округ малонаселенный
	3.3. Высокие доходы, среднее по цене жилье	Панков	Панков – густонаселенный район с низкой долей мигрантов (чаще всего русских) и престижными медицинскими учреждениями

Примечание. Составлено автором.

Этносоциальное расслоение в избранных столицах. Необходимо честно признать, что с Москвой все сложнее из-за нехватки данных о мигрантах и доходах. Перепись 2021 г. не отличается по качеству от других переписей, материалы о заработной плате и расселению иммигрантов сложно назвать качественными. Данные о заработной плате собираются не по месту жительства, а по месту занятости. По данным Росстата, отрыв Москвы по среднедушевым доходам от уровня РФ нарастал: с 1,6 раза в 1990 г. до 3,3 в 2000 г. В 2021 г. поменялась методология сбора информации, но в целом на целях настоящего исследования это мало отразилось [Росстат, 2024]. В Подмосковье доходы отставали от столичных и средних по России. К 2016 г. в Москве разрыв сократился до двукратного, а в области

доход превзошел средний по стране на четверть. Данные о зарплате, часто используемые вместо дохода, которого нет в статистике по муниципальным единицам, отражают те же тренды².

Сама дифференциация, естественно, есть, поэтому можно посмотреть ее хотя бы на примере распределения стоимости жилья. Москва начала привлекать иммигрантов значительно позже других, выбранных для сравнения городов. В основном преобладают миграционные потоки из стран бывшего СНГ, а особенно из стран Средней Азии. Возраст иммиграции в Москву обусловил меньшее

² Контрасты по зарплате скромнее, отчасти из-за ее учета по месту работы, а не жительства. Между тем в Москве трудятся миллионы работников из других регионов и стран, получая меньше москвичей.

количество иммигрантов по сравнению с другими исследуемыми городами. Даже учитывая экспертные оценки и заниженные официальные данные о доле иммигрантов в столице, их доля и абсолютное число существенно ниже, чем в остальных рассматриваемых городах.

Для Москвы характерно большое количество внутренних мигрантов (в частности из северокавказских республик), создающих основную социальную напряженность, потому что их уровень урбанизации, а также социально-этнические и культурные особенности значительно отличаются от московских.

Особенностью Москвы можно назвать и увеличенный слой малоимущего населения, который также негативно сказывается на социальной обстановке в определенных районах города и влияет на стоимость жилья. Именно для Москвы в большей мере подтвердилась исходная гипотеза: районы с более доступным жильем притягивают не только иммигрантов, но и малообеспеченных горожан.

Выявлен и свойственный Москве в последние лет двадцать тренд выбора иммигрантами менее комфортных жилищных условий в пользу географической близости к работе (но не всегда). Они селятся если и не в самых центральных районах города (которые в Москве слишком дорогие), то в районах, близких к центру, например в пределах Садового и Третьего транспортного кольца, а также в районах, прилегающих к ним. При этом часто многие двух- и трехкомнатные квартиры может делить большое число мигрантов, которые работают в сфере обслуживания населения.

Итак, не пытаясь повторить ту же схему анализа для Москвы, перейдем сразу к сравнению городов, привлекая московские данные там, где это возможно и сравнительно надежно (проверено во многих работах).

По четырем европейским столицам было видно, что гипотеза зависимости между микрогеографией доходов и мигрантов подтверждается не всегда. Самая сложная картина – в Лондоне. В Берлине и Мадриде видны сектора локализации мигрантов, но там (не говоря о Москве) труднее выявить их связь с расслоением по доходам. Отсутствие явных корреляций по крупным административно-территориальным единицам (районам или округам) можно объяснить тремя группами причин.

1. Дифференциация по уровню доходов меньше, чем по доле мигрантов. А город – не дискретное пространство, в нем ежедневно перемещаются массы людей, в том числе ради заработка, что отчасти выравнивает доходы этнических групп [Шагило, 2018].

2. Расчет по разному числу ячеек чисто статистически может не дать достоверных результатов. Обычно более подробное деление как бы усиливает

контрасты, но не всегда переход к нему возможен. И не всегда эффект именно такой (табл. 4).

3. Во всех городах велась борьба с сегрегацией³ (по-своему, на разных этапах, с разным размахом и успехом). Оценить ее вклад в решение проблемы на фоне действия прочих факторов сложно даже в отдельно взятой столице.

Коэффициент соответствия территориальных структур (Салаи) доле иностранцев в доходах и населении в Мадриде втрое ниже общеиспанского [Cassiers, Kesteloot, 2012; INE, 2020]. Их сопряжение вообще-то более очевидно в Москве. Но углубленный анализ по Берлину и Лондону показывает, что оно зависит от уровня адаптации мигрантов. В Лондоне тесная взаимосвязь с заработком отмечена среди британцев европеоидной расы, смешанных рас (метисов) и китайцев, а самые многочисленные иноэтнические группы отличает низкий уровень соответствия. Именно здесь выявлены наибольшие различия между их долей в доходах и в населении.

Доходы часто выше там, где дороже жилье, ближе к центру или к зеленым тихим зонам. А в итоге в Лондоне и Берлине богачи тяготеют к окраинам, в Мадриде, Москве – к центру и западу. Этническое обособление, расселение мигрантов в бедных районах, их компактные ареалы (чайнатауны, «маленькие Индии» и т. п.) заметнее на микроуровне. Однако, как показывает пример Лондона, очаги низких доходов и дешевого жилья формируются не просто при обилии мигрантов, а при их низкой адаптивности, особенно если очень бедна страна исхода.

Качество учета мигрантов везде имеет изъяны, а программы обустройства и контроля малоэффективны [Socio-Economic Segregation..., 2015]. По сути, ни одна из стратегий ассимиляции, интеграции или адаптации мигрантов (последняя, кстати, может выражаться в их изоляции – спонтанной, негласной, но порой не встречающей противодействия властей) не привела к большим успехам. Между тем острота проблемы нарастает, как и число иммигрантов.

Видимо, можно говорить о роли экономической модели развития страны и города в этих процессах и отношении к ним. Так, Берлин, сохранивший многие промышленные объекты, и мировой центр сервисно-информационной эконо-

³ В Париже закон обязывал коммуны строить социальное жилье, Лондон выполнял масштабные программы реконструкции проблемных ареалов (Доклендс, район стадиона Уэмбли к Олимпиаде-2012). В Берлине реанимировали зону Берлинской стены. В Мадриде и Москве пока много строят. В испанской столице поздняя джентрификация сочетается с социальным выравниванием (авангардный район Чуэка), а в Москве десегрегирующую роль долго играло распределение бесплатного жилья по строгим нормам.

мики – Лондон по-разному подходят к решению сходных проблем. Что касается волнений на этносоциальной почве (разделить «почвы» непросто), то они возникают не в местах концентрации мигрантов, а в бедных, депривированных, резко контрастирующих с богатыми по уровню жизни, образования и т. д., впрочем, этнокультурной подоплеку это не исключает.

Итак, на социально-этническое расслоение в столицах влияют разные факторы и мотивы. Поскольку жилье – первая забота «свежего» мигранта, анализ цен на него обнажает как их проблемы, так и социальные городские. Вторая забота, заработок, менее универсальна и не касается иждивенцев се-

мьи, клана или государства, обеспеченных рантье. По мере социального развития типичного иммигранта роль «этничности» в его жизни убывает, что отражается на занятии, доходе, уровне жизни и месте проживания.

Уровень доходов и цен на жилье обычно повышен в центре (кроме Берлина) и в престижных зеленых кварталах дальше от него. Но зависимость неодинакова для разных этнических групп и связана с адаптацией мигрантов. Так, в Лондоне выявлена тесная связь между доходом района и долей представителей европеоидной расы, но также метисов и китайцев. У самых многочисленных групп мигрантов соответствие наименьшее.

Таблица 4

Дифференциация доходов по районам изучаемых столиц

Показатели	Лондон	Мадрид	Берлин	Москва
Число районов	33	21	196	125
Коэффициент Салаи	0,46	0,19	0,34	0,17
Коэффициент Джини	0,078	0,315	0,13	0,21**
Максимальный медианный доход, тыс. евро	33,1	32,3*	23,0	Нет данных
Минимальный медианный доход тыс. евро	10,8	19,1*	16,8	Нет данных
Макс/мин, раз	3,3	1,7	1,375	Нет данных

Примечание. * Средний доход. ** Заработная плата в Москве по данным Росстата [2023]. *Источник:* рассчитано автором.

Сегрегация вообще виднее на микроуровне, и выявляемое при этом этническое обособление во всех городах зависит от доходов, занятости, цен на жилье. Обилие мигрантов, их слабая интеграция, волнения на фоне кризиса приводят к тому, что европейцам все сложнее проявлять толерантность. Это относится и к России.

Внутригородская структура иммигрантов в городах тоже очень разная. Социальная дифференциация внутригородских территорий зависит от исторического развития города, его роли в стране, численности и доли иммигрантов, их социального уровня, занятости, доходов, волн иммиграции, миграционной политики каждой конкретной страны, учета иммигрантов и многих других факторов.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ территориального распределения доходов жителей и расселение иммигрантов в европейских столицах в более или менее сопоставимых границах показывает, что социально-территориальная поляризация опережала здесь процессы выравнивания социальной дифференциации и адаптации иммигрантов. Рассматривая сегрегацию иммигрантов как вид социальной, мы исходили из того, что факторы последней, включая цены

на жилье и доходы, способствуют формированию в изучаемых городах этнических ареалов и зависят от числа, доли, состава мигрантов. Цена на жилье становится важным фактором социального расслоения (оно же этническое, в том числе в сознании миллионов людей).

1. В каждой стране есть своя специфика учета иммигрантов (собираательно-условное понятие в данном исследовании), иностранцев (не-граждан) или этнических меньшинств.

2. Главной особенностью изучаемых городов можно назвать увеличение числа и процента иммигрантов, а также то, что увеличение этого процента до 15–25% само по себе становится фактором социального разделения: по доходам, по уровню цен, культуре, образованию и др. В то же время иммиграция везде специфична и гетерогенна.

3. Различия между группами мигрантов во многом определяют уровень их обособления или интеграции в социальный организм города.

Лондон привлекает всех, богатых и бедных. В Берлине все еще видны последствия раздела города.

Для Мадрида типична концентрация культурно близких латиноамериканцев.

В Москве приток мигрантов, напротив, сопровождало нарастание культурной дистанции между ними

и москвичами [Шатило, 2018, Вендина и др., 2019]. Кроме того, на социальное напряжение в Москве также влияет большое число именно внутренних мигрантов, которые имеют социальную и некую культурную дистанцию с горожанами [Шатило, 2024].

Основной итог: уникальных черт в рассматриваемых городах больше, чем общих. И важно отметить, что ни в одной стране пока не найдена эффективная модель интеграции иммигрантов и

их адаптации к жизни в принимающем обществе, существуют только способы некоторого откладывания проблемы, как это видно на примере Берлина. При этом ситуация усугубляется. Значительный приток новых иностранных иммигрантов замещает прежних, тех, которые уже сумели адаптироваться, концентрируясь в тех районах, где и так много иммигрантов, воспроизводя снова и снова социальные риски.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алов И.Н. Эволюция концепций пространственной сегрегации в городах США. Региональные исследования // Смол. гуманитарный ун-т. 2021. № 1. С. 107–117. DOI: 10.5922/1994-5280-2021-1-9.
- Битюкова В.Р., Махрова А.Г., Соколова Е.П. Экологическая ситуация как фактор дифференциации цен на жилье в г. Москве // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2006. № 6. С. 34–41.
- Вендина О.И., Панин А.Н., Тикунов В.С. Социальное пространство Москвы: особенности и структура // Известия РАН. Серия географическая. 2019. № 6. С. 115–122.
- Зайончковская Ж.А., Карачурина Л.Б., Мкртчян Н.В. и др. Женщины-мигранты из стран СНГ в России / под ред. Е.В. Тюрюканова. М.: МАКС Пресс, 2012. 119 с.
- Зубаревич Н.В. Стратегия пространственного развития: приоритеты и инструменты // Вопросы экономики. 2019. № 1. С. 135–145.
- Капралов А.В. Социально-экономические проблемы расселения иммигрантов в Парижской агломерации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: Геогр. 2008. № 6. С. 54–59.
- Кельман Ю.Ф. Географический анализ этнокультурного разнообразия населения США // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 5. С. 22–30.
- Махрова А.Г. Особенности стадийного развития Московской агломерации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 4. С. 10–16.
- Мкртчян Н.В., Флоринская Ю.Ф. Социально-экономические эффекты трудовой миграции из малых городов России // Вопросы экономики. 2016. № 4. С. 103–123. DOI: 10.32609/0042-8736-2016-4-103a123.
- Попов А.А. Территориальная дифференциация качества городской среды в Москве // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2007. № 4. С. 29–36.
- Савоскул М.С. Территориальные системы международных миграций населения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 6. С. 11–18.
- Слука Н.А. Геодемографические феномены глобальных городов. Смоленск: Ойкумена, 2009. 317 с.
- Трейвиш А.И. Схемы осредненных регионов России: попытка моделирования «снизу» // Известия РАН. Серия географическая. 2017. № 6. С. 5–18.
- Шатило Д.П. Социальная дифференциация городских территорий (на примере стоимости жилья и расселения иммигрантов) в крупных столицах Европы: автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М., 2018. 28 с.
- Шатило Д.П. Социальная дифференциация внутригородских территорий европейских столиц: монография / Институт научной информации по общественным наукам РАН. М.: Директ-Медиа, 2024. 148 с.
- Alexander M. *Cities and labour immigration: Comparing policy responses in Amsterdam, Paris, Rome and Tel Aviv*, Aldershot, Ashgate, 2007, 256 p.
- Bailey N., Gent van W., Musterd S. Remaking Urban Segregation: Processes of Income. Sorting and Neighbourhood Change, *Population Space and Place*, 2017, vol. 23(3), p. 1–16.
- Barómetro de inmigración de la comunidad de Madrid, Comunidad de Madrid, 2016, 37 p.
- Burgers J., Musterd S. Understanding Urban Inequality. A model based on existing theories and an empirical illustration, *International Journal of Urban and Regional Research*, 2002, vol. 26, no. 2, p. 403–413.
- Cassiers T., Kesteloot C. Socio-spatial Inequalities and Social Cohesion in European Cities, *Urban Studies*, 2012, vol. 49(9), p. 1909–1924.
- Clark W. Changing residential preferences across income, education, and age: Findings from the multi-city study of urban inequality, *Urban Affairs Review*, 2009, no. 44(3), p. 334–355.
- Friedrichs J., Galster G., Musterd S. Neighbourhood effects on social opportunities: The European and American research and policy context, *Housing Studies*, 2003, no. 18(6), p. 797–806.
- Friedrichs J., Triemer S. *Gespaltene Städte? Soziale und ethnische Segregation in deutschen Großstädten*, Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2008, 181 p.
- Fujita K. Residential Segregation in Comparative Perspective: Making Sense of Contextual Diversity, *Cities and Society*, T. Maloutas (ed.), Routledge, 2012, 346 p.
- Grzegorzczak A. Social and ethnic segregation in the Paris metropolitan area at the beginning of the 21st century, *Miscellanea Geographica. Regional studies on development (MGRSD)*, 2013, vol. 17, no. 2, p. 20–29.
- Häussermann H., Haila A. The European city: a conceptual framework and a normative project, *Cities of Europe: Changing Contexts, Local Arrangements and the Challenge to Urban Cohesion*, Y. Kazepov (ed.), Oxford, Blackwell, 2005, p. 43–65.
- Häussermann H., Kapphann A. Berlin: Von der geteilten zur gespalteten Stadt? *Sozialräumlicher Wandel seit 1990*, Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2002, 292 p.
- Kemper F.J. Restructuring of Housing and Ethnic Segregation: Recent Developments in Berlin, *Urban Studies*, 1998, vol. 35, no. 10, p. 1765–1789.
- Massey D.S., Fischer J.M. How Segregation Concentrates Poverty, *Ethnic and Racial Studies*, 2000, no. 23, p. 670–691.

- Musterd S.* Social and ethnic segregation in Europe: levels, causes and effects, *Journal of Urban Affairs*, 2005, no. 27, p. 331–348.
- Patricia O.D.* Black Africans in Great Britain: Spatial Concentration and Segregation, *Urban Studies*, 1998, vol. 35, no. 10, p. 1703–1724.
- Patterns of ethnic segregation in London*, DMAG Briefing 2005, London, 2005, 38 p.
- Peach C.* Slippery segregation: discovering or manufacturing ghettos? *Journal of Ethnic and Migration Studies*, 2009, no. 35, p. 1381–1395.
- Poulsen M.* Using local statistics and neighbourhood classifications to portray ethnic residential segregation: A London example, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2011, vol. 38, p. 636–658.
- Sen F., Goldberg A.* *Turken in Deutschland: Leben zwischen zwei Kulturen*, München: Beck, 1994, 144 p.
- Socio-Economic Segregation in European Capital Cities: East Meets West*, T. Tammaru, S. Marcinczak, M. Van Ham, S. Musterd (eds.), London, Routledge, 2015, 414 p.
- Bityukova V., Savoskul M., Kirillov P. et al.* Transformation of environmental problems in Moscow: sociological dimension, *Geography, Environment, Sustainability*, 2016, no. 4, p. 74–87.
- Van Kempen R., Şule Özüekren A.* Ethnic segregation in cities: new forms and explanations in a dynamic world, *Urban studies*, 1998, no. 35 (10), p. 1631–1656.
- Электронные ресурсы*
 Департамент Сената по вопросам городского развития и жилищного строительства Berlin.de. URL: www.berlin.de (дата обращения 07.03.2023).
 Информационный государственный портал Великобритании. URL: <https://www.gov.uk/> (дата обращения 18.01.2024).
- Мкртчян Н.В.* Миграционная мобильность в России: оценки и проблемы анализа // SPERO. 2009. № 11. С. 149–164. URL: http://spero.socpol.ru/docs/N11_2009_08.pdf (дата обращения 10.06.2018).
- Росстат – Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения 27.02.2024).
- Статистический портал Германии (Statistik-Portal in Deutschland). URL: <http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/> (дата обращения 05.01.2023).
- Статистическое бюро Берлин-Бранденбург. URL: <http://www.statistik-berlin-brandenburg.de/> (дата обращения 17.02.2024).
- CACI Ltd. 2016. URL: <https://www.caci.co.uk> Marketing and Information solutions in the United Kingdom. Маркетинговые и информационные разработки в Великобритании (дата обращения 15.12.2023).
- El País – испанская ежедневная газета. URL: <https://elpais.com/> (дата обращения 12.02.2024).
- INE – Instituto Nacional de Estadística, National Statistics Institute – Национальный институт статистики Испании. URL: www.ine.es (дата обращения 26.02.2024).
- Lelo K., Monni S., Tomassi F.* Le sette Rome: La capitale delle disuguaglianze raccontata in 29 mappe, Collana, Saggine, 2021, 352, 136 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/352679745_Le_sette_Rome_La_capitale_delle_disuguaglianze_raccontata_in_29_mappe (дата обращения 07.03.2023).
- ONS (Office for National Statistics) – Национальная статистическая служба Великобритании. URL: www.ons.gov.uk/ (дата обращения 08.03.2023).
- The London Index of Deprivation: An alternative to the IMD2000. Greater London Authority, London, 2008. 45 p.

Поступила в редакцию 01.03.2024
 После доработки 16.08.2024
 Принята к публикации 26.11.2024

INCOMES OF RESIDENTS IN WEST EUROPEAN CAPITALS AND THE IMMIGRANTS' SETTLEMENT PATTERN

D.P. Shatilo

Center for Interdisciplinary Research, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: shatilo@inion.ru

The article studies the relationship between the immigrants' settlement and the incomes in large European capitals using the examples of London, Madrid and Berlin. Cities were selected based on the importance of the immigration processes, the availability of regional statistical materials and their role in the countries. These cities have attracted large numbers of immigrants, especially in the last 30 years (and earlier in the case of London due to the influx of people from former colonies). The example of housing costs and income distribution shows the socio-ethnic stratification. As a result of the study, cities' districts were classified based on the immigrants' percentage, income levels and housing prices, which demonstrated a high degree of territorial mosaic and heterogeneity. For four European capitals, it was shown that a hypothesis of close relationship between the income and migrants microgeography is not always confirmed. The most complicated picture is in London. In Berlin and Madrid, migrant localization sectors are visible, but (not to mention Moscow) it is more difficult to identify their connection with income stratification. A most notable characteristic of the cities studied is the growing immigrants' numbers and their share in total population, which can reach up to 15–25%. This fact in itself becomes a significant element of social differentiation. At the same time, immigration in each city has its own characteristics and diversity. Differences between immigrant groups largely determine a degree to which they are isolated or integrated into the city's social space. London attracts everyone, both rich and poor. Traces

of the city's former partition are still visible in Berlin. In Madrid, there is a concentration of Latin Americans who are culturally similar. And in Moscow, the influx of immigrants often provokes an increase in the cultural distance between them and the locals. A large number and proportion of immigrants, their poor integration into the host society, and inter-ethnic conflicts result in lower tolerance and increasing social and ethnic contrasts.

Keywords: housing prices, London, Berlin, Madrid, Moscow, social differentiation

REFERENCES

- Alexander M. *Cities and labour immigration: Comparing policy responses in Amsterdam, Paris, Rome and Tel Aviv*, Aldershot, Ashgate, 2007, 256 p.
- Alov I.N. Evolyutsiya kontseptsii prostranstvennoy segregatsii v gorodakh SSHA [Evolution of concepts of spatial segregation in US cities], *Regional studies*, Smol. humanitarian University, 2021, no. 1, p. 107–117, DOI: 10.5922/1994-5280-2021-1-9. (In Russian)
- Bailey N., Gent van W., Musterd S. Remaking Urban Segregation: Processes of Income. Sorting and Neighbourhood Change, *Population Space and Place*, 2017, vol. 23(3), p. 1–16.
- Barómetro de inmigración de la comunidad de Madrid, Comunidad de Madrid, 2016, 37 p.
- Bitjukova V.R., Makhrova A.G., Sokolova E.P. Ekologicheskaya situatsiya kak faktor differentsiatsii tsen na zhil'ye v g. Moskve [State of the environment as a factor of apartment price differentiation in Moscow], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geography*, 2006, no. 6, p. 34–41. (In Russian)
- Burgers J., Musterd S. Understanding Urban Inequality. A model based on existing theories and an empirical illustration, *International Journal of Urban and Regional Research*, 2002, vol. 26, no. 2, p. 403–413.
- Cassiers T., Kesteloot C. Socio-spatial Inequalities and Social Cohesion in European Cities, *Urban Studies*, 2012, vol. 49(9), p. 1909–1924.
- Clark W. Changing residential preferences across income, education, and age: Findings from the multi-city study of urban inequality, *Urban Affairs Review*, 2009, no. 44(3), p. 334–355.
- Friedrichs J., Galster G., Musterd S. Neighbourhood effects on social opportunities: The European and American research and policy context, *Housing Studies*, 2003, no. 18 (6), p. 797–806.
- Friedrichs J., Triemer S. *Gespaltene Städte? Soziale und ethnische Segregation in deutschen Großstädten*, Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2008, 181 p.
- Fujita K. Residential Segregation in Comparative Perspective: Making Sense of Contextual Diversity, T. Maloutas (ed.), *Cities and Society*, Routledge, 2012, 346 p.
- Grzegorzczak A. Social and ethnic segregation in the Paris metropolitan area at the beginning of the 21st century, *Miscellanea Geographica. Regional studies on development* (MGRSD), 2013, vol. 17, no. 2, p. 20–29.
- Häussermann H., Haila A. The European city: a conceptual framework and a normative project, Y. Kazepov (ed.), *Cities of Europe: Changing Contexts, Local Arrangements and the Challenge to Urban Cohesion*, Oxford, Blackwell, 2005, p. 43–65.
- Häussermann H., Kapphann A. *Berlin: Von der geteilten zur gespaltenen Stadt? Sozialräumlicher Wandel seit 1990*, Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2002, 292 p.
- Kapralov A.V. Sotsial'no-ekonomicheskiye problemy rasseleniya immigrantov v Parizhskoy aglomeratsii [Socio-economic problems of immigrant distribution within the Paris agglomeration], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2008, no. 6, p. 54–59. (In Russian)
- Kelman Yu.F. Geograficheskiy analiz etnokul'turnogo raznoobraziya naseleniya SSHA [Geographical analysis of ethnocultural diversity of the US population], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, no. 5, 2014, p. 22–30. (In Russian)
- Kemper F.J. Restructuring of Housing and Ethnic Segregation: Recent Developments in Berlin, *Urban Studies*, 1998, vol. 35, no. 10, p. 1765–1789.
- Makhrova A.G. Osobennosti stadial'nogo razvitiya Moskovskoy aglomeratsii [Specific features of stadial development of the Moscow agglomeration], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 4, p. 10–16. (In Russian)
- Massey D.S., Fischer J.M. How Segregation Concentrates Poverty, *Ethnic and Racial Studies*, 2000, no. 23, p. 670–691.
- Mkrtychyan N.V., Florinskaya Yu.F. Sotsial'no-ekonomicheskiye efekty trudovoy migratsii iz malyykh gorodov Rossii [Socio-economic effects of labor migration from small towns of Russia], *Voprosy Ekonomiki*, 2016, no. 4, p. 103–123, DOI: 10.32609/0042-8736-2016-4-103a123. (In Russian)
- Musterd S. Social and ethnic segregation in Europe: levels, causes and effects, *Journal of Urban Affairs*, 2005, no. 27, p. 331–348.
- Patricia O.D. Black Africans in Great Britain: Spatial Concentration and Segregation, *Urban Studies*, 1998, vol. 35, no. 10, p. 1703–1724.
- Patterns of ethnic segregation in London*, DMAG Briefing 2005, London, 2005, 38 p.
- Peach C. Slippery segregation: discovering or manufacturing ghettos? *Journal of Ethnic and Migration Studies*, 2009, no. 35, p. 1381–1395.
- Popov A.A. Territorial'naya differentsiatsiya kachestva gorodskoy sredy v Moskve [Territorial differentiation of the quality of urban environment in Moscow], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2007, no. 4, p. 29–36. (In Russian)
- Poulsen M. Using local statistics and neighbourhood classifications to portray ethnic residential segregation: A London example, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2011, vol. 38, p. 636–658.
- Savoskul M.S. Territorial'nyye sistemy mezhduarodnykh migratsiy naseleniya [Territorial systems of the international migrations of population], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2015, no. 6, p. 11–18. (In Russian)
- Sen F. Goldberg A. *Turken in Deutschland: Leben zwischen zwei Kulturen*, München, Beck, 1994, 144 p.
- Shatilo D.P. Sotsial'naya differentsiatsiya gorodskih territorij (na primere stoimosti zhiliya i rasseleniya immigrantov) v krupnykh stolitsah Evropy [Social differentiation of urban territories (on the example of housing costs and settlement of immigrants) in large European capitals]

- ban areas (using the example of housing costs and immigrant settlement) in major European capitals], Extended Abstract of Ph.D. Thesis, Moscow, 2018, 28 p.
- Shatilo D.P. *Sotsialnaya differentsiatsiya vnutrigorodskih territorij evropejskih stolits* [Social differentiation of intra-city territories of European capitals], Institute of Scientific Information on Social Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Direct-Media Publ., 2024, 148 p. (In Russian)
- Sluka N.A. *Geodemograficheskiye fenomeny global'nykh gorodov* [Geodemographic phenomena of global cities], Smolensk, Oikumena Publ., 2009, 317 p. (In Russian)
- Socio-Economic Segregation in European Capital Cities: East Meets West*, T. Tammaru, S. Marcinczak, M. Ham van, S. Musterd (eds.), London, Routledge, 2015, 414 p.
- Transformation of environmental problems in moscow: sociological dimension, V. Bityukova, M. Savoskul, P. Kirillov, N. Koldobskaya (eds.), *Geography, Environment, Sustainability*, 2016, no. 4, p. 74–87.
- Treivish A.I. Skhemy osrednennykh regionov Rossii: popytka modelirovaniya “snizu” [Schemes of averaged regions of Russia: an attempt to model “from below”], *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2017, no. 6, p. 5–18. (In Russian)
- Van Kempen R., Şule Özüekren A. Ethnic segregation in cities: new forms and explanations in a dynamic world, *Urban Studies*, 1998, no. 35(10), p. 1631–1656.
- Vendina O.I., Pain E.A. *Mnogoetnichnyy gorod. Problemy i perspektivy upravleniya kul'turnym raznoobraziyem v krupneyshikh gorodakh* [Multi-ethnic city. Problems and prospects for managing cultural diversity in major cities], Moscow, Sektor Publ., 2018, 184 p. (In Russian)
- Zayonchkovskaya Zh.A., Karachurina L.B., Mkrtychyan N.V. et al. *Zhenshchiny-migranty iz stran SNG v Rossii* [Women migrants from the CIS countries in Russia], E.V. Tyuryukanova (ed.), Moscow, MAKS Press Publ., 2012, 119 p. (In Russian)
- Zubarevich N.V. Strategiya prostranstvennogo razvitiya: prioritety i instrumenty [Spatial development strategy: priorities and instruments], *Voprosy Ekonomiki*, 2019, no. 1, p. 135–145. (In Russian)
- Web sources*
- Berlin.de Das offizielle Hauptstadtportal Berlin.de, URL: www.berlin.de (accessed 07.03.2023).
- CACI Ltd, URL: <https://www.caci.co.uk> Marketing and Information solutions in the United Kingdom (accessed 15.12.2023).
- El País, URL: <https://elpais.com/> (accessed 12.02.2024).
- GOV.UK, URL: <https://www.gov.uk/> (accessed 18.01.2024).
- INE – Instituto Nacional de Estadística, National Statistics Institute, URL: www.ine.es (accessed 26.02.2024).
- Lelo K., Monni S., Tomassi F. Le sette Rome: La capitale delle disuguaglianze raccontata in 29 mappe, Collana, Saggine, 2021, 352, 136 p., URL: https://www.researchgate.net/publication/352679745_Le_sette_Rome_La_capitale_delle_disuguaglianze_raccontata_in_29_mappe (accessed 07.03.2023).
- Mkrtychyan N.V. Migratsionnaya mobil'nost' v Rossii: otsenki i problemy analiza [Migration mobility in Russia: assessments and problems of analysis], *SPEPO*, 2009, no. 11, p. 149–164, URL: http://spero.socpol.ru/docs/N11_2009_08.pdf (accessed 06/10/2018). (In Russian)
- ONS (Office for National Statistics), URL: www.ons.gov.uk/ (accessed 08.03.2023).
- Rosstat – Federal State Statistics Service of the Russian Federation, URL: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 27.02.2024).
- Statistik Berlin – Brandenburg, URL: <http://www.statistik-berlin-brandenburg.de/> (accessed 17.02.2024).
- Statistik-Portal in Deutschland. URL: <http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/> (accessed 05.01.2023).
- The London Index of Deprivation: An alternative to the IMD2000. Greater London Authority, London, 2008, 45 p.

Received 01.03.2024

Revised 16.08.2024

Accepted 26.11.2024

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДНОГО СТОКА МАЛОЙ ГОРОДСКОЙ РЕКИ СЕТУНИ (МОСКВА)

И.С. Денисова¹, О.Д. Лошков², М.А. Самохин³, С.Р. Чалов⁴

^{1–4} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра гидрологии суши

¹ Институт водных проблем РАН

¹ Инженер; аспирант; e-mail: ira.denisova@icloud.com

² Студент; e-mail: ollo107@mail.ru

³ Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: gidromiha@mail.ru

⁴ Проф., д-р геогр. наук; e-mail: srchalov@geogr.msu.ru

Рост московского мегаполиса определил глубокие изменения гидрологических процессов рек, расположенных в черте города. В статье на основе данных мониторинга на реке Сетуни, осуществлявшегося на сети станций в бассейне в 2019–2024 гг., проводится оценка формирования речного стока в условиях урбанизации. Распространение непроницаемых поверхностей (от 25 до почти 40% водосборов разных постов), влияние промышленных и коммунальных стоков объясняет формирование особого типа водного режима, который характеризуется определяющей ролью летних дождевых паводков по сравнению с половодьем, их большим количеством (до 29 в год) и малым временем бассейнового добега. С применением модели расчленения стока GrWat выявлено, что двукратное увеличение плотности жилых районов и непроницаемых территорий вниз по течению реки не влияет на соотношение источников питания реки. Свойствами формирующегося водного режима являются размытие сезонной структуры гидрографа и трансформация грунтовой составляющей стока в техногенно преобразованную, отличающуюся большим по сравнению с естественными условиями объемом стока. В разные годы на разных станциях она определяет от 50 до 75% годового стока, объем весеннего половодья – от 3,8 до 16,7%, а дождевого стока – от 20 до 33,3%. По сравнению со второй половиной XX в., увеличение больше чем на 15% (на 30 км²) площади селитебных территорий, зимние оттепели, в том числе вызванные региональными климатическими изменениями, определили двукратное снижение водности весеннего половодья и почти десятикратный рост повторяемости паводков. Все это приводит к ежегодным наводнениям в долине реки и ущербам инфраструктуре города, что определяет актуальность результатов мониторинга для городского хозяйства.

Ключевые слова: городская гидрология, урбанизированные территории, GrWat, паводки, экстремальные дожди

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.10

ВВЕДЕНИЕ

Московская агломерация характеризуется плотной застройкой, что приводит к значительной трансформации водного баланса. Формирование стока на урбанизированных территориях изучено не столь систематически, как на водосборах с ненарушенными условиями его формирования [Болгов и др., 2020]. В условиях городского острова тепла наблюдается изменение интенсивности и продолжительности осадков [Бруслова и др., 2019; Стулов, 1993; Ярынич и др., 2023; Varentsov et al., 2018], проявляющееся в их росте по сравнению с прилегающими к городу территориями. Увеличивается повторяемость экстремальных осадков, составляющая более 50 мм в сутки. К началу XXI в. отмечались изменения режима р. Москвы, годовой сток которой вырос почти на 10% по сравнению с нормой, а в летне-осенний период – на 27% [Коронкевич и др., 2019].

Отмечалось, что 1% роста площади урбанизированных ландшафтов на современном этапе приводит к аналогичному увеличению стока, а 1% роста водонепроницаемых территорий в составе урбанизированных ландшафтов – к увеличению стока на 2–3%. Объем весеннего половодья вырос менее чем на 10% при снижении доли вклада в годовой сток в 1,4 раза [Коронкевич, Мельник, 2015].

Указанные изменения в значительной мере коснулись и малых рек Московского региона. Многие из них в последние десятилетия характеризовались крайне негативной экологической обстановкой. Увеличение стока талых и ливневых вод послужило причиной активизации эрозионных процессов на водосборе, повышения стока наносов [Цыпленков и др., 2021]. На качество воды существенное воздействие оказывает поверхностный смыл с автодорог [Цыпленков и др., 2021], отличающихся высоким

уровнем накопления токсичных веществ [Власов и др., 2022]. В то же время информация по малым рекам Москвы крайне ограничена в условиях полного отсутствия здесь станций государственной гидрологической сети. Созданная силами сотрудников географического факультета МГУ система гидролого-геохимического мониторинга, функционирующая в бассейне крупнейшего притока Москвы – р. Сетуни с 2019 г. [Касимов и др., 2023], позволила получить основу для изучения малой городской реки, расположенной целиком в пределах Московской агломерации [Sokolov et al., 2021; Tereshina et al., 2020]. Именно анализ накопленных массивов данных для характеристики современных особенностей формирования речного стока стал целью настоящей работы. В ней решались задачи анализа землепользования на разных участках водосбора р. Сетуни и их влияния на речной сток; исследование источников питания р. Сетуни в разные годы путем реализации модели GrWat; определение степени трансформации речного стока р. Сетуни в начале XXI в.

всем верхнем и среднем течении. Ее длина составляет 38 км, а площадь водосбора – 190 км². Река протекает через городские районы Солнцево, Ново-Переделкино, частично в Одинцовском районе Московской области, пересекает МКАД в районе Сколковского шоссе, затем Аминьевское шоссе, Минскую улицу и впадает в р. Москву ниже Бережковского моста. Основные притоки Сетуни – р. Сетунька (в верховьях), Навершка и Раменка (в нижнем течении). Притоки р. Сетунь зарегулированы системой прудов, в некоторых случаях они в значительной мере канализированы (например, сток р. Навершки).

Значительная часть площади водосбора р. Сетуни находится на урбанизированных территориях. Для пространственного анализа водосбора Сетуни (рис. 1) были использованы данные OpenStreetMap [OpenStreetMap, 2024] для оценки землепользования и типов земельного покрова. Выделялось девять категорий: 1) природные заказники; 2) земли под застройку (заброшенная территория, которая ранее использовалась, или незастроенная территория, которую планируется застраивать); 3) кладбища; 4) строительные площадки; 5) промышленные зоны; 6) свалки; 7) водоемы; 8) жилые зоны; 9) лесные массивы. Помимо этого, были проанализированы доли водонепроницаемых поверхностей в бассейне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Физико-географические характеристики бассейна р. Сетуни. Сетунь является крупнейшим правым притоком Москвы-реки в черте столицы и во

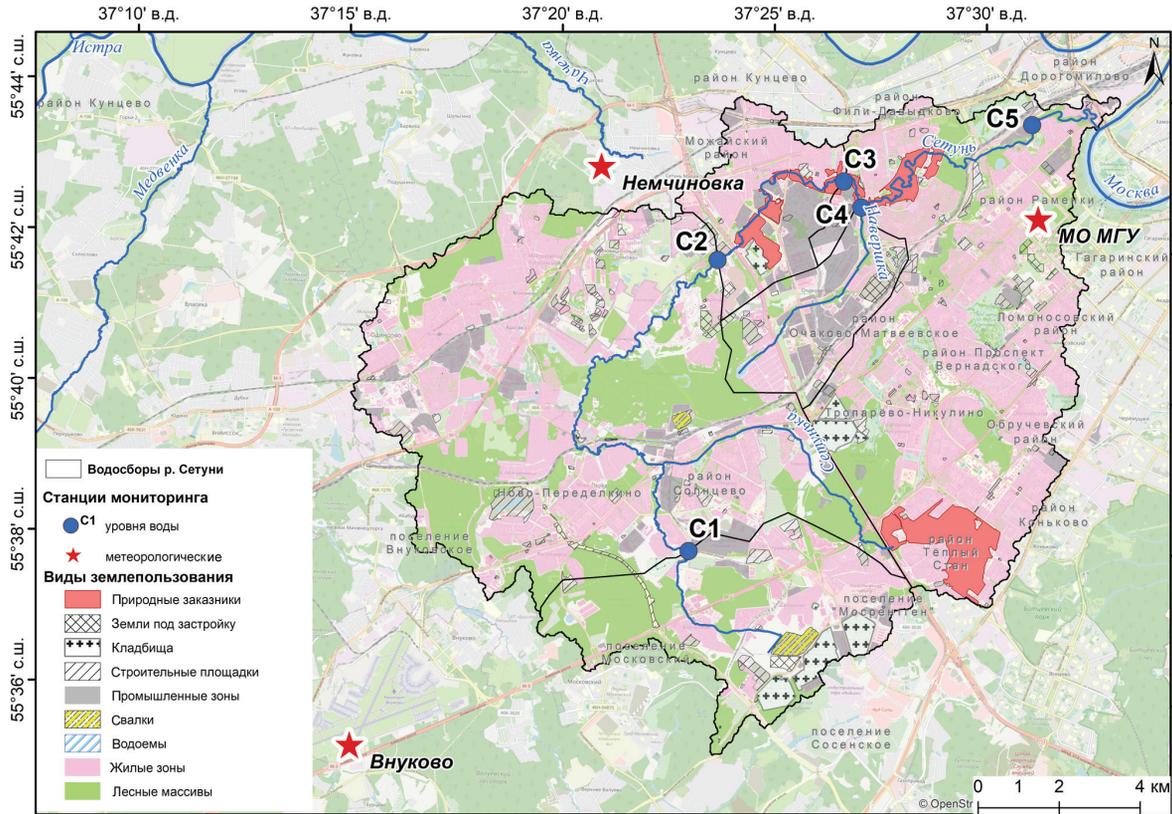


Рис. 1. Станции мониторинга и типы землепользования в бассейне р. Сетуни

Fig. 1. Gauging stations and land use types within the Setun River basin

Мониторинговые данные. Данные на сети станций мониторинга были получены с помощью автоматизированных датчиков уровня воды НОВО U20L, Solinst Levellogger 5 Junior и Keller DCX-22-ECO с дискретностью записи 30 мин, начиная с 14 ноября 2019 г. (табл. 1). Всего в статье задействована информация по пяти постам, четыре из которых расположены на р. Сетуни (С1, С2, С3 и С5) и один (С4) – на р. Навершка, протекающей в одной из наиболее урбанизированных частей водосбора. С учетом различных факторов, в первую очередь вандализма, из-за которого были утрачены некоторые датчики, продолжительность записи на разных

постах отличается. По станциям С1 и С4 ряды не покрывают целиком ни один полный год из всех лет мониторинга.

Логгеры фиксируют суммарное давление воды и атмосферы. Для расчета уровня воды над логгером производилась барометрическая компенсация (1):

$$h = (P_{\text{logger}} - P_0) \cdot 0,0101972, \quad (1)$$

где h – уровень воды над логгером (м), P_{logger} – суммарное давление воды и атмосферы (гПа), P_0 – величина атмосферного давления (гПа) на метеостанции. Компенсация проводилась по данным ближайших метеостанций: для постов выше МКАД была выбрана метеостанция Внуково, ниже МКАД – Балчуг.

Таблица 1

Описание автоматизированной сети гидрологических станций

Станция	Река	Координаты, с. ш., в. д.	Площадь водосбора, км ²	Длина реки до устья, км	Периоды измерений, даты
С1	Сетуни	55.63208, 37.38753	23,64	32	14.12.2019 – 28.02.2020
С2	Сетуни	55.69654, 37.39623	99,59	17	14.12.2019 – 05.03.2022
С3	Сетуни	55.71449, 37.44519	112,01	12	14.11.2019 – 26.06.2020 24.11.2020 по н.в.
С4	Навершка	55.70948, 37.45264	11,2	0,1	24.11.2020 – 12.07.2021 30.09.2021 – 11.04.2022
С5	Сетуни	55.72790, 37.51862	180,14	2	14.11.2019 по н.в.

На всех постах эпизодически, в разные фазы водного режима, измерялись расходы воды методом «скорость – площадь» при помощи измерителя скорости потока ИСП-1М. Эти измерения позволили получить зависимости $Q = f(H)$ и перейти к расходам воды за весь период мониторинга с шагом 30 мин.

Уровни воды, записанные логгерами, были пересчитаны в расходы воды для всех станций мониторинга. За основу были взяты фактические измерения расходов воды, которые в дальнейшем позволили выявить взаимосвязь между уровнями (H , м) и расходами воды (Q , м³/с) (2–6):

$$Q_{C1} = 2,026H - 0,299, \quad (2)$$

$$Q_{C2} = 3,218H - 1,930, \quad (3)$$

$$Q_{C3} = 5,274H - 4,058, \quad (4)$$

$$Q_{C4} = 2,887H - 1,603, \quad (5)$$

$$Q_{C5} = \begin{cases} 8,935H^2 - 4,056H, & \text{если } H < 1,07 \\ 15H - 10,15, & \text{если } H > 1,07 \end{cases}, \quad (6)$$

где Q – расход воды (м³/с), H – уровень воды над самой глубокой точкой створа (м).

Для собранных рядов была проведена обработка при помощи фильтра Савитцки–Голея [Kong et al., 2022; Savitzky, Golay, 1964], реализованного в пакете *phenofit* языка программирования *R*, для удаления выбросов и сглаживания рядов (удаление

краткосрочных и слабоинтенсивных колебаний расходов воды). Использование весов позволяет определять значимость конкретной величины расхода для дальнейшего сглаживания: веса изменяются от 0 до 1, где 0 – это полное игнорирование значений. Для распределения весов по временным рядам с помощью ПО STATISTICA был определен размах (без выбросов) изменения расходов за единицу времени (30 мин). Значениям, выходящим за данный диапазон, присваивались веса, равные 0,2. Если встречалось три значения расхода с весом 0, то это определялось как выброс, вес которого становился равным 0.

Для станций и лет, где имелся достаточно продолжительный круглогодичный ряд измерений (например, С2 – 2021, С3 – 2021–2023, С5 – 2020–2023 гг.), проводилось выделение фаз водного режима путем реализации алгоритма автоматизированного расчленения гидрографа GrWat, определяющего подземную составляющую стока, весеннее половодье, паводки (дождевые и оттепельные). В основу модели заложен подход, предложенный Б.И. Куделиным [Рец и др., 2022]: во время подъема уровня речные воды создают подпор связанным с ними грунтовыми водам, подземное питание резко уменьшается и на пике половодья принимается равным 0. На спаде половодья воды из водоносных слоев вновь начинают поступать в русло, подземное питание

восстанавливается. При этом учитывалось, что в условиях города подземная составляющая стока сочетается в себе воды, поступающие в русловую сеть как из подземных горизонтов, так и различных утечек из водопроводных и канализационных систем, и вследствие технического перераспределения воды (полив улиц, топление снега, мойки машин и др.).

Задача была реализована с использованием языка программирования R с программным пакетом *GrWat* [Samsonov, 2024], при этом расход воды был получен на основе обработки данных логгеров, а также метеорологических данных, содержащих суточное количество осадков (в мм) и температуры (в °C), полученных с метеостанций МГУ, Немчиновки и Внуково методом кригинга.

В программе все данные были приведены к ежедневным наблюдениям, которые затем были разделены на водохозяйственные годы. Каждый год отсчитывается с начала половодья в текущем календарном году до начала половодья в следующем году. Выходные файлы содержат информацию о расчетном грунтовом стоке, быстром стоке талой составляющей, быстром стоке дождевых и оттепельных паводков, а также о характеристиках водного режима [Чинова и др., 2021; Рец и др., 2022]. Данный метод основан на предположении, что реакция базисного стока на осадки или снеготаяние возникает гораздо медленнее по сравнению с быстрым стоком. Основным калибровочным параметром модели является параметр интенсивности спада/подъема расхода воды за счет базисной составляющей, что соответствует концепции кривых спада базисного стока. Начало и конец оттепельных и дождевых паводков в период зимней и летней межени определяется в модели по резкому градиенту изменения расхода воды, отделение паводка происходит по линейной интерполяции. Интенсивность спада/подъема расхода воды за счет базисной составляющей варьировала (*grad1*) от 1,5 до 26% сут⁻¹, тот же параметр для периода спада половодья (*grad2*) составил от 0,5 до 2% сут⁻¹; количество дней с начала половодья, за которое проходит основная волна половодья, составило 5–30 дней; количество дней с даты максимального расхода, когда действует *grad2*, после этого переходит на *grad1* – от 5 до 20 дней; максимально допустимое повышение базисной составляющей по сравнению с межнным значением (после спада половодья) составило 150%.

Массивы данных за период 2019–2024 гг. сравнивались с данными функционировавшего в 1979–1988 гг. гидрологического поста «Сложные эфиры», которые представляют собой ряд среднесуточных расходов воды с пропусками (полностью отсутствуют 1982 и 1986 гг. и несколько дат: 01.03.1981,

01.03.1985, 08.06.1985, 05.06.1988). Пост был расположен в непосредственной близости от поста С5 мониторинговой сети МГУ (рис. 1) на бесприоточном участке. Для сравнения ряды данных 2019–2024 гг. приводились к суточным данным путем осреднения значений, полученных в 8:00 и 20:00 часов за каждый день периода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геопространственный анализ бассейна Сетуни показал существенные отличия типов землепользования в разных частях водосбора (табл. 2). Плотность жилых районов увеличивается вниз по течению – относительная доля жилых районов на всем водосборе составляет 29,1% на станции С5, тогда как на водосборе С1 ее значение составляет 14,8%. Это приводит к значительному увеличению доли непроницаемых зон – от 24,5% на станции С1 до 37,8% на станции С5.

В некоторых районах высока концентрация промышленных зон. Так, водосбор р. Навершки (С4) целиком расположен на территории промышленных зон Очаково, Южное Очаково, Северное Очаково со множеством заводов, фабрик, ТЭЦ и т. д. Более 23% площади водосбора Навершки занимают промышленные зоны, а для остальных бассейнов их значение колеблется от 5 до 7%. В среднем на анализируемых водосборах доля территорий, покрытых растительностью, составляет примерно 22–26% от общей площади, в бассейнах малых притоков Сетуни, расположенных в нижней части водосбора в пределах МКАД, она еще меньше (так, в бассейне Навершки, станция С4, она падает до 13%). В водосборах С3–С5 имеются природные заказники, но их площади незначительны.

Дождевые и оттепельные паводки, наблюдавшиеся на р. Сетуни в 2020–2023 гг. (табл. 3), имели в основном малую продолжительность – обычно только 1–2 часа. Максимальные годовые расходы воды в нижнем створе С5 в разные годы варьировали от 11,2 до 18,36 м³/с и всегда были приурочены к дождевым паводкам, при этом наибольшие значения наблюдались в 2020 и 2023 гг. при выпадении экстремальных дождевых осадков. Высота пиков была охарактеризована отношением измеренного максимального расхода к минимальному, максимальные значения которого во все годы наблюдались в створе С3 и достигали максимума здесь в 2021 г. (34,9). Снижение внутригодовой неравномерности стока при переходе от створа С3 к С5 определяется ростом водосбора и вкладом в водность притока р. Сетуни – р. Раменки, в наибольшей степени зарегулированной (именно здесь расположены основные пруды бассейна).

Типы землепользования на водосборах р. Сетуни в 2024 г.

Тип землепользования	Общая площадь, км ²	Доля общей площади бассейна Сетуни, %	Площадь, км ² (%)*				
			C1	C2	C3	C4	C5
Природные заказники	5,7	3,0	0	0	1,3 (1,2)	0,004 (0,03)	5,7 (3,2)
Земли под застройку	1,3	0,7	0,2 (0,7)	0,4 (0,4)	0,5 (0,5)	0,5 (4,5)	1,2 (0,7)
Кладбища	3,4	1,8	1,1 (4,7)	1,2 (1,2)	1,7 (1,5)	0	2,6 (1,4)
Строительные площадки	6	3,2	0,9 (3,7)	3,3 (3,3)	3,5 (3,2)	0,4 (3,9)	5,7 (3,1)
Промышленные зоны	13,3	7,0	1,3 (5,6)	5,4 (5,4)	8 (7,1)	2,7 (23,8)	12,6 (7)
Свалки	0,6	0,3	0,5 (2)	0,6 (0,6)	0,6 (0,6)	0	0,6 (0,4)
Водоемы	0,01	0,01	0	0	0	0	0,01 (0,01)
Жилые зоны	55	29,5	3,5 (14,8)	24,8 (24,9)	28,4 (25,4)	1,7 (14,7)	52,3 (29,1)
Лесные массивы	44,2	23,3	6,3 (26,7)	25,3 (25,4)	26,9 (24)	1,5 (13,4)	40,5 (22,5)
Проницаемые покрытия, %	–	–	26,7	25,4	24	13,4	22,5
Непроницаемые покрытия, %	–	–	24,6	32,6	33,9	29,5	37,9

Примечание. * В скобках указан процент от площади водосбора.

Описательные статистики водного режима р. Сетуни, основанные на высокочастотных данных

Тип землепользования	Общая площадь, км ²	Доля общей площади бассейна Сетуни, %	Площадь, км ² (%)*				
			C1	C2	C3	C4	C5
Природные заказники	5,7	3,0	0	0	1,3 (1,2)	0,004 (0,03)	5,7 (3,2)
Земли под застройку	1,3	0,7	0,2 (0,7)	0,4 (0,4)	0,5 (0,5)	0,5 (4,5)	1,2 (0,7)
Кладбища	3,4	1,8	1,1 (4,7)	1,2 (1,2)	1,7 (1,5)	0	2,6 (1,4)
Строительные площадки	6	3,2	0,9 (3,7)	3,3 (3,3)	3,5 (3,2)	0,4 (3,9)	5,7 (3,1)
Промышленные зоны	13,3	7,0	1,3 (5,6)	5,4 (5,4)	8 (7,1)	2,7 (23,8)	12,6 (7)
Свалки	0,6	0,3	0,5 (2)	0,6 (0,6)	0,6 (0,6)	0	0,6 (0,4)
Водоемы	0,01	0,01	0	0	0	0	0,01 (0,01)
Жилые зоны	55	29,5	3,5 (14,8)	24,8 (24,9)	28,4 (25,4)	1,7 (14,7)	52,3 (29,1)
Лесные массивы	44,2	23,3	6,3 (26,7)	25,3 (25,4)	26,9 (24)	1,5 (13,4)	40,5 (22,5)
Проницаемые покрытия, %	–	–	26,7	25,4	24	13,4	22,5
Непроницаемые покрытия, %	–	–	24,6	32,6	33,9	29,5	37,9

Примечание. * В скобках указан процент от площади водосбора.

Количество паводков в 2020–2023 гг. менялось на разных постах в разные годы от 19 до 40 в год, из них число оттепельных составляло от 4 до 18, дождевых – от 16 до 29 (табл. 3), т. е. количество

дождевых паводков почти в 2–3 раза превышает количество оттепельных паводков. Число их в отдельные годы снижается вниз по течению р. Сетуни (например, от 29 до 22 между постами C3

и С5 в 2021 г.), в другие – увеличивается (в 2022 и 2023 гг. – от 17 до 23 и от 15 до 21 соответственно). Подобные изменения связаны с неравномерным выпадением осадков в пределах бассейна, что было подробно рассмотрено на примере режима выпадения осадков мая 2020 г. и июня 2021 г. с использованием радарных данных и модели COSMO [Чалов и др., 2023]. Высокий процент водонепроницаемых поверхностей в нижнем течении (до 40%) способствует ускорению поверхностного стока и резкому увеличению пиков дождевых паводков (отношение максимальных расходов воды к среднегодовым в замыкающем створе обычно почти в 1,5–2 раза выше, чем на вышерасположенных постах).

Расчленение гидрографов (рис. 2) показало, что ведущую роль в формировании годового стока Сетуни в настоящее время играет подземная составляющая, определяющая в среднем от 50 до 75% годового объема. Столь высокие ее значения объясняются сильной зарегулированностью стока и большим объемом поступления вод из различных городских систем (водоотведение, сточные воды, ливневая сеть), за счет утечек из водопроводных и канализационных систем, вследствие технического перераспределения воды (полив улиц, топление снега, мойки машин и др.). Другой чертой питания реки является боль-

шая роль летних дождевых паводков по сравнению с половодьем – во время прохождения половодья расходы воды ниже, чем в периоды дождевых паводков (табл. 4). Объем весеннего половодья менялся в разные годы на разных постах от 3,8 до 16,7% от годового стока, а объем дождевого стока – от 20 до 33,3%. В 2020 г. после практически отсутствующего весеннего половодья (3,8% от годового стока) за счет прохождения экстремальных паводков 29–31 мая доля дождевых паводков была максимальна (25% на нижнем посту С5). Если снижение доли половодья и увеличение роли дождевых паводков в целом характерно для бассейна Верхней Волги и Московского региона и объясняется климатическими причинами [Болгов и др., 2020], то количество дождевых и оттепельных паводков в Москве значительно выше региональных характеристик – на реках Верхней Волги в среднем отмечается только 7–10 паводков в год, из которых 6–8 дождевых [Горбаренко и др., 2021]. При этом необходимо отметить, что наблюдающееся размытие сезонной структуры гидрографа и неоднозначность выделения отдельных фаз водного режима определяют ограничения в применении модели GrWat для условий городских рек и необходимость уточнения для них самих методик расчленения гидрографа.

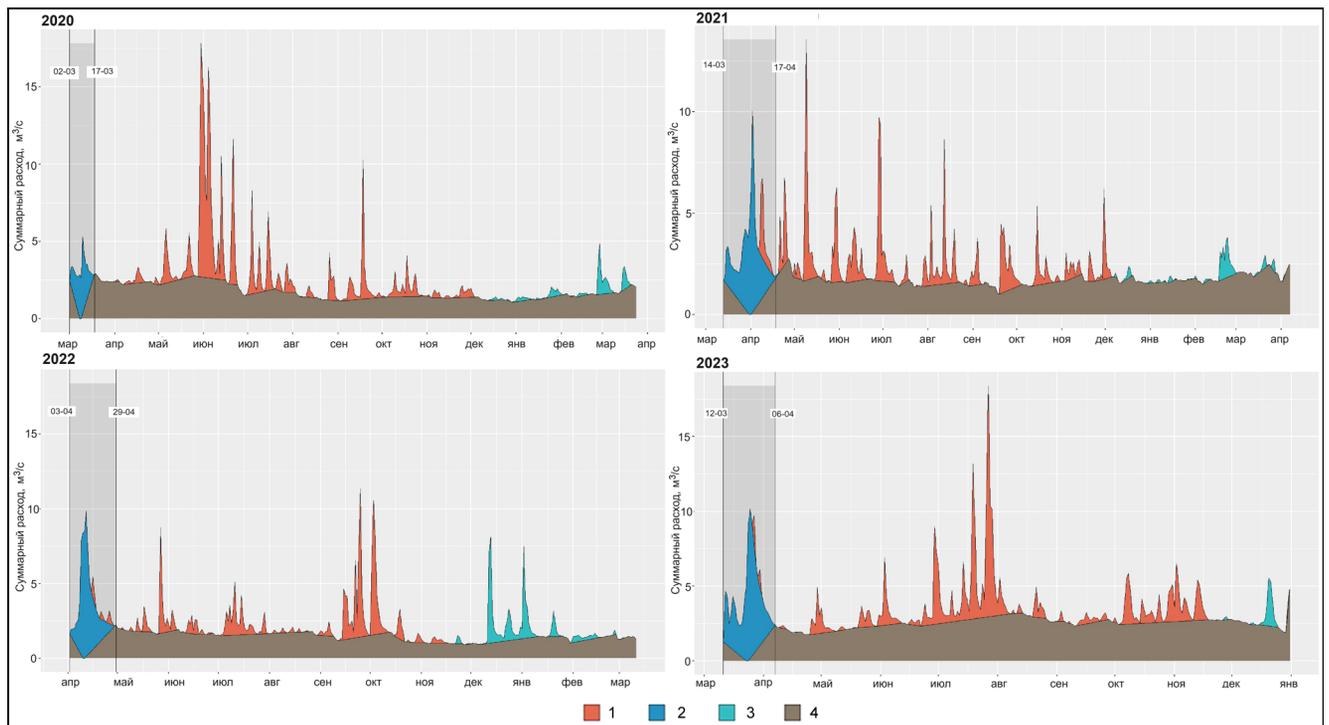


Рис. 2. Результаты расчленения гидрографа р. Сетуни у нижнего поста С5 в 2020–2023 гг. Доли стока: 1 – дождевого; 2 – половодного; 3 – оттепельного; 4 – подземного. Первая дата – начало весеннего половодья, вторая дата – окончание весеннего половодья

Fig. 2. Hydrograph separation of the Setun River for the S5 gauge station in 2020–2023: 1 – rain runoff; 2 – spring flood runoff; 3 – thaw runoff; 4 – underground runoff. The first date – beginning of the spring flood, the second date – the end of spring flood

Источники питания р. Сетуни в 2020–2023 гг. (на основе модели GrWat)

Характеристика	2020	2021			2022		2023		
	C5	C2	C3	C5	C3	C5	C3	C5	
Дата начала половодья	02.03	15.03	14.03	14.03	03.04	03.04	12.03	12.03	
Дата конца половодья	17.03	12.04	14.04	17.04	21.04	29.04	08.04	06.04	
Средний расход за водохозяйственный год, м ³ /с	2,45	1,09	1,04	2,34	1,23	2,19	1,11	3,39	
Максимальный расход за водохозяйственный год, м ³ /с	17,84	4,85	7,32	13,56	5,35	11,35	5,51	18,4	
Средний расход подземной составляющей стока за водохозяйственный год, м ³ /с	1,68	0,71	0,56	1,6	0,63	1,39	0,7	2,35	
Объем годового стока, км ³	0,008	0,003	0,003	0,008	0,004	0,006	0,003	0,0089	
Объем подземного стока	км ³	0,006	0,002	0,002	0,005	0,002	0,004	0,002	0,006
	% от годового	75,0	66,7	66,7	62,5	50,0	66,7	66,7	67,4
Объем половодья без подземной составляющей	км ³	0,0003	0,0003	0,0007	0,0005	0,0003	0,0007	0,0004	0,0008
	% от годового	3,8	10,0	16,7	6,3	7,5	11,7	13,3	9,0
Объем дождевого стока без подземной составляющей	км ³	0,002	0,0007	0,001	0,0016	0,001	0,0012	0,0007	0,002
	% от годового	25,0	23,3	33,3	20,0	25,0	20,0	23,3	22,5
Объем оттепельного стока без подземной составляющей	км ³	0,0002	0,000006	0,00006	0,00015	0,0002	0,00047	0,00002	0,0001
	% от годового	2,5	0,2	2,0	1,9	5	7,8	0,7	1,1
Максимальный расход дождевых паводков, м ³ /с	15,13	3,85	6,45	11,87	4,17	9,92	4,65	15,45	
Максимальный расход оттепельных паводков, м ³ /с	3,26	0,29	0,93	1,95	3,17	7,08	0,85	3,2	

Сравнение осредненных суточных гидрографов современного периода за 2020–2023 гг. по посту C5 с наблюдениями 1979–1988 гг. на посту «Сложные эфиры» показало меньший на 11,8% средний годовой расход воды ($Q_{\text{ср}}$, м³/с) р. Сетуни на этапе современных наблюдений (2,55 против 2,85 м³/с) (рис. 3). Учитывая короткий период наблюдений, подобные отличия следует уточнять по мере накопления рядов данных. Более достоверными представляются данные об изменениях распределения внутригодового стока. Наблюдается снижение расходов воды в половодье, меженных расходов летом и базисного осенне-зимнего стока. Снижение весеннего половодья может происходить за счет зимних оттепелей и вывоза снега на снегоплавильные пункты, активно практикуемого в столице, и, как было сказано выше, соответствует региональным тенденциями изменения стока и, следовательно, частично объясняется климатическими изменениями [Горбаренко и др., 2021]. Повторяемость высоких паводков выросла примерно в 7–10 раз, стандартное отклонение суточных расходов воды для всего ряда данных за период 1979–1988 гг. равно

1,45 м³/с, а для ряда за 2019–2024 гг. – 1,67 м³/с (рост на 15,1%). Причиной роста повторяемости паводков является тренд на усиление вариабельности интенсивных осадков, отмечающийся в Московском регионе с 1966 по 2021 г. [Чалов и др., 2023]. С 1997 по 2020 г. происходил рост показателей экстремальности осадков и увеличение их интенсивности на 10–15% [Ярынич и др., 2023]. Увеличению количества паводков способствует также снижение водопроницаемости поверхности за счет роста застройки. С использованием снимка Landsat за 1985 г. нами было установлено, что к 2024 г. (см. табл. 2) по сравнению с полученными оценками, площадь селитебных территорий выросла приблизительно на 30 км² (16% площади водосбора). Этому способствует изменение режима ООПТ в пределах бассейна Сетуни [Крюков, Голубева, 2021], основными чертами которого является возведение крупных объектов транспортной инфраструктуры, инженерных, социальных и административных объектов, увеличение плотности дорожной и тропиной сети и фрагментация ядер охраняемых территорий. В конечном счете все это приводит

к снижению инфильтрации на водосборе, меньшей регулирующей роли естественных покрытий и снижению времени добега в русловую сеть, которая при прохождении экстремальных ливней

2020 и 2021 гг. для бассейна Сетуни оценивалась в 6–8 часов, в то время как для рек-аналогов Московского региона при аналогичных событиях составляла около 15 часов [Chalov et al., 2023].

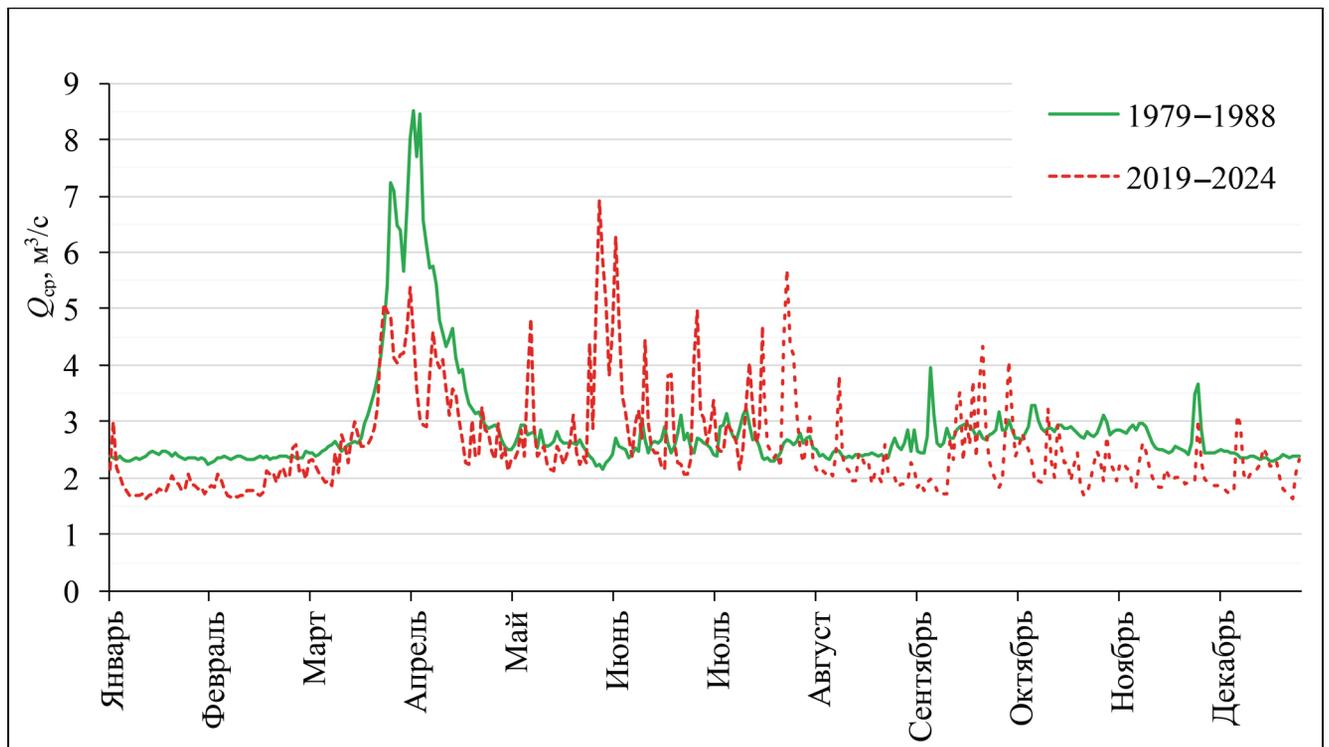


Рис. 3. Осредненные суточные гидрографы р. Сетуни за 1979–1988 гг. по г. п. «Сложные эфиры» и посту С5 сети наблюдений МГУ за 2019–2023 гг.

Fig. 3. Mean daily flow hydrographs of the Setun River for 1979–1988 at the Slozhnye Efiry gauge and the C5 MSU gauging network for 2019–2023

ВЫВОДЫ

Обработка данных мониторинга, подкрепленная геопространственным анализом, позволила оценить современные (2019–2024 гг.) особенности формирования стока р. Сетуни, полностью расположенной в пределах Московской агломерации.

1. Водосбор реки, протекающей от пригорода к центру города, существенно меняется по характеристикам землепользования – в два раза увеличивается вниз по течению относительная площадь жилых массивов. Доля водонепроницаемых поверхностей колеблется от 24,5% в верхних частях водосбора до 37,8% на всем водосборе. При этом указанные изменения не имеют однозначной связи с характеристиками речного стока, что, вероятно, может объясняться значительной ролью промышленных и коммунальных сточных вод и вод ливневой канализации, а также пространственной неравномерностью дождей осадков.

2. В питании малой городской реки определяющую роль играет подземная составляющая стока, которая включает в себя как грунтовые воды, так

и воды антропогенного генезиса. Вклад весеннего половодья в годовой сток изменялся в разные годы наблюдений (2020–2023 гг.) от 3,8 до 16,7% от годового стока, а объем дождевого стока – от 20 до 33,3%. За счет снижения времени добега, значительной роли различных антропогенных воздействий на речной сток происходит размытие сезонной структуры гидрографа. На трансформацию стока оказывают влияние как общие климатические тенденции, так и специфика формирования стока в условиях городской среды, в частности приводящая к прохождению большого количества оттепелей и дождевых паводков, в несколько раз превышающих региональные значения.

3. Основными чертами современного стока р. Сетуни по сравнению со второй половиной XX в. является двукратное снижение объемов и расходов весеннего половодья за счет зимних оттепелей и, вероятно, за счет вывоза снега; увеличение интенсивности и частоты коротких дождевых осадков и их вклада в годовой сток.

Благодарности. Развитие мониторинговой сети и натурные исследования в бассейне р. Сетуни выполнены в рамках проекта РНФ 19-77-30004-П. Анализ источников формирования стока выполнен в рамках проекта Министерства высшего образования и науки (075-15-2024-614).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болгов М.В., Филиппова И.А., Харламов М.А.* Современные изменения гидрологического режима и водообеспечение Московского региона // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 8. С. 29–36.
- Бруслова Н.Е., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И.* Особенности режима осадков в Московском регионе в 2008–2017 гг. // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019. № 1. С. 127–172.
- Власов Д.В., Кукушкина О.В., Кошелева Н.Е. и др.* Уровни и факторы накопления металлов и металлоидов в придорожных почвах, дорожной пыли и их фракции РМ10 в Западном округе Москвы // *Почвоведение*. 2022. № 5. С. 538–555.
- Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б.* Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне верхней Волги под влиянием климатических изменений // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 4. С. 6–28. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-1.
- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Поповичева О.Б. и др.* Загрязнение Московского мегаполиса: мониторинг химического состава микрочастиц в системе атмосфера – снег – дорожная пыль – почвы – поверхностные воды // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 5. С. 5–19.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г. и др.* Оценка антропогенных воздействий на водные ресурсы России // *Вестник РАН*. 2019. Т. 89. № 6. С. 603–614.
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С.* Трансформация стока под влиянием ландшафтных изменений в бассейне реки Москвы и на территории города Москвы // *Водные ресурсы*. 2015. Т. 42. № 2. С. 133–143. DOI: 10.7868/S0321059615020066.
- Крюков В.А., Голубева Е.И.* Оценка изменений природоохранных режимов городской ООПТ в ГИС-среде // *ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: материалы Международной конф.* 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 323–334. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-323-334.
- Рец Е.П., Киреева М.Б., Самсонов Т.Е. и др.* Алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа по методу Б.И. Куделина GrWat: проблемы и перспективы // *Водные ресурсы*. 2022. Т. 49. № 1. С. 27–42. DOI: 10.31857/S032105962201014X.
- Стулов Е.А.* Влияние города Москвы на усиление летних осадков // *Метеорология и гидрология*. 1993. № 11. С. 34–41.
- Цыпленков А.С., Черницова О.В., Кошелева Н.Е. и др.* ГИС-моделирование баланса наносов и загрязняющих веществ в бассейне р. Сетунь (Москва). Инженерная экология – 2021 (Москва, 1–3 дек. 2021 г.): доклады Международного симпозиума. М., 2021. С. 172–176.
- Чалов С.Р., Платонов В.С., Морейдо В.М. и др.* Реакция водного стока малой городской реки на экстремальные дождевые осадки на территории Москвы в 2020 и 2021 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 2. С. 69–79. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-2-69-79.
- Чиждова Ю.Н., Рец Е.П., Тебенькова Н.А. и др.* Двухкомпонентное расчленение гидрографа реки Протвы // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2021. № 6. С. 62–76.
- Ярынич Ю.И., Варенцов М.И., Платонов В.С. и др.* Влияние московского мегаполиса на осадки теплого периода в зависимости от крупномасштабных атмосферных условий // *Водные ресурсы*. 2023. Т. 50. № 5. С. 550–560. DOI: 10.31857/S0321059623600151.
- Chalov S.R., Platonov V.S., Erina O.N. et al.* Rainstorms impacts water, sediment and trace elements loads in an urbanized catchment within Moscow city: case study of summer 2020 and 2021, *Theoretical and applied climatology*, 2023, vol. 151, p. 871–889, DOI: 10.1007/s00704-022-04298-9.
- Kong D., McVicar T.R., Xiao M. et al.* Phenofit: An R package for extracting vegetation phenology from time series remote sensing, *Methods Ecol. Evol.*, 2022, vol. 13, no. 7, p. 1508–1527, DOI: 10.1111/2041-210X.13870.
- Savitzky A., Golay M.J.E.* Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, *Anal. Chem.*, 1964, vol. 36, no. 8, p. 1627–1639.
- Sokolov D.I., Erina O.N., Tereshina M.A. et al.* Impact of Mozhaysk Dam on the Moscow river sediment transport, *Geogr. Environ. Sustain.*, 2020, vol. 13, no. 4, p. 24–31, DOI: 10.24057/2071-9388-2019-150.
- Tereshina M.A., Erina O.N., Sokolov D.I. et al.* Nutrient dynamics along the Moskva River under heavy pollution and limited self-purification capacity, *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 163, p. 05014.
- Varentsov M.I., Wouters H., Platonov V.S. et al.* Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia, *Atmosphere (Basel)*, 2018, vol. 9, no. 2, p. 50, DOI: 10.3390/atmos9020050.

Электронные источники

OpenStreetMap, URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения 11.02.2024).

Samsonov T. GrWat: River Hydrograph Separation and Analysis. R package version 0.0.4.9000, URL: <https://tsamsonov.github.io/grwat/>, <https://github.com/tsamsonov/grwat> (дата обращения 11.02.2024).

Поступила в редакцию 27.08.2024

После доработки 23.10.2024

Принята к публикации 26.11.2024

RUNOFF FORMATION IN THE SMALL URBAN SETUN RIVER (MOSCOW)

I.S. Denisova¹, O.D. Loshkov², M.A. Samokhin³, S.R. Chalov⁴¹⁻⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology¹ Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences¹ Ph.D. Student; Engineer; ira.denisova@icloud.com² Student; ollo107@mail.ru³ Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: gidromiha@mail.ru³ Professor, D.Sc. in Geography; srchalov@geogr.msu.ru

The growth of the Moscow metropolis has led to profound changes in the hydrological processes of rivers located within the city limits. Based on 2019–2024 monitoring data for a network of stations on the Setun River, the river runoff formation in the context of urbanization was evaluated. The increase in impervious surface areas (from 25% to almost 40%) and the influence of industrial and municipal wastewater have led to the formation of specific water regime characterized by predominance of summer floods over the high water period, their large number (up to 29 events per year) and rather short basin lag time. Using the GrWat model, it was found that a twofold increase in residential areas and impervious surfaces downstream the river did not significantly affect the balance of river flow sources. The emerging water regime is characterized by an indistinct seasonal structure of the hydrograph and the transformation of the ground component of runoff into a technogenically transformed one, characterized by a greater volume of runoff compared to natural conditions. In different years and at different stations, it determines from 50 to 75% of the annual runoff, while the spring floods account for 3,8 to 16,7% and the rain runoff for 20 to 33%. Compared to the second half of the 20th century, an increase of over 15% in the residential areas (by 30 km²), as well as winter thaws, including those caused by regional climate change, determined a twofold decrease in water volume during spring floods, and almost tenfold increase in frequency of rainfall flood events. All this leads to frequent floods in river valleys and damage to city infrastructure, which makes the monitoring results very important for the city's economy.

Keywords: urban hydrology, urban territories, GrWat, floods, extreme rainfall

Acknowledgements. Monitoring network development and field studies in the Setun River basin were financially supported by the Russian Science Foundation (project 19-77-30004). The analysis of the sources of flow formation was performed within the framework of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under the Agreement 075-15-2024-614.

REFERENCES

- Bolgov M.V., Filippova I.A., Kharlamov M.A. Sovremennyye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima i vodoobespecheniya Moskovskogo regiona [Modern changes in hydrological regime and water supply in the Moscow region], *Meteorologiya i gidrologiya*, 2020, no. 8, p. 29–36. (In Russian)
- Brusova N.E., Kuznetsova I.N., Nakhaev M.I. Osobennosti rezhima osadkov v Moskovskom regione v 2008–2017 gg. [Precipitation regime features in the Moscow region in 2008–2017], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2019, no. 1, p. 127–172. (In Russian)
- Chalov S.R., Platonov V.S., Erina O.N. et al. Rainstorms impacts water, sediment and trace elements loads in an urbanized catchment within Moscow city: case study of summer 2020 and 2021, *Theoretical and Applied Climatology*, 2023, vol. 151, p. 871–889, DOI: 10.1007/s00704-022-04298-9.
- Chalov S.R., Platonov V.S., Moreido V.M. et al. Reaktsiya vodnogo stoka maloi gorodskoi reki na ekstremal'nye dozhdevye osadki na territorii Moskvy v 2020 i 2021 gg. [Small urban river runoff response to 2020 and 2021 extreme rainfalls within the territory of Moscow], *Meteorologiya i gidrologiya*, 2023, no. 2, p. 69–79, DOI: 10.52002/0130-2906-2023-2-69-79. (In Russian)
- Chizhova Yu.N., Rets E.P., Teben'kova N.A. et al. Dvukhkomponentnoe raschlenenie gidrografa reki Protvy [Two-component separation of the Protva River hydrograph], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 6, p. 62–76. (In Russian)
- Gorbarenko A.V., Varentsova N.A., Kireyeva M.B. Transformatsiya stoka vesennego polovod'ya i pavodkov v bassejne Verkhney Volgi pod vliyaniem klimaticheskikh izmeneniy [Transformation of the spring highwater and flood runoff in the Upper Volga basin under the climate change impact], *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*, 2021, no. 4, p. 6–28, DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-1. (In Russian)
- Kasimov N.S., Kosheleva N.Ye., Popovicheva O.B. et al. Zagryazneniye Moskovskogo megapolisa: monitoring khimicheskogo sostava mikrochastits v sisteme atmosfera – sneg – dorozhnaya pyl' – pochvy – poverkhnostnyye vody [Moscow megacity pollution: monitoring of chemical composition of microparticles in the atmosphere-snow-road dust-soil-surface water system], *Meteorologiya i gidrologiya*, 2023, no. 5, p. 5–19. (In Russian)
- Kong D., McVicar T.R., Xiao M. et al. Phenofit: An R package for extracting vegetation phenology from time series remote sensing, *Methods Ecol. Evol.*, 2022, vol. 13, no. 7, p. 1508–1527, DOI: 10.1111/2041-210X.13870.

- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G. et al. Otsenka antropogennykh vozdeistvii na vodnye resursy Rossii [An assessment of the anthropogenic impact on water resources in Russia], *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2019, vol. 89, no. 6, p. 603–614. (In Russian)
- Koronkevich N.I., Mel'nik K.S. Runoff transformation under the effect of landscape changes in the Moskva River Basin and in the territory of Moscow city, *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 2, p. 159–169, DOI: 10.1134/S0097807815020062.
- Kryukov V.A., Golubeva Ye.I. [Assessment of urban protected areas regulations changes using GIS software], *InterKarto. InterGIS. Geoinformatsionnoye obespecheniye ustojchivogo razvitiya territorii* [Geoinformation support of sustainable development of territories], *Materialy Mezhdunar. Konf*, 2021, vol. 27, no. 3, p. 323–334, DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-323-334. (In Russian)
- Rets E.P., Kireeva M.B., Samsonov T.E. et al. Algorithm Gr-Wat for Automated Hydrograph Separation by B.I. Kudelin's Method: Problems and Perspectives, *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 1, p. 23–37, DOI: 10.1134/S0097807822010146.
- Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, *Anal. Chem.*, 1964, vol. 36, no. 8, p. 1627–1639.
- Sokolov D.I., Erina O.N., Tereshina M.A., Puklakov V.V. Impact of Mozhaysk Dam on the Moscow river sediment transport, *Geogr. Environ. Sustain*, 2020, vol. 13, no. 4, p. 24–31, DOI: 10.24057/2071-9388-2019-150.
- Stulov E.A. Vliyanie goroda Moskvy na usilenie letnikh osadkov [Effect of the city of Moscow on the increasing summer precipitation], *Meteorologiya i gidrologiya*, 1993, no. 11, p. 34–41. (In Russian)
- Tereshina M.A., Erina O.N., Sokolov D.I. et al. Nutrient dynamics along the Moskva River under heavy pollution and limited self-purification capacity, *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 163, p. 05014.
- Tsyplenkov A.S., Chernitsova O.V., Kosheleva N.E., Chalov S.R. [GIS-based modeling of sediment and pollutants balance in the Setun River basin (Moscow)], *Inzhenernaya ekologiya – 2021* [Engineering Ecology – 2021], *Doklady mezhdunarodnogo simpoziuma*, Moscow, 2021, p. 172–176. (In Russian)
- Varentsov M.I., Wouters H., Platonov V.S., Konstantinov P.P. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia, *Atmosphere (Basel)*, 2018, vol. 9, no. 2, p. 50, DOI: 10.3390/atmos9020050.
- Vlasov D.V., Kukushkina O.V., Kosheleva N.Ye., Kasimov N.S. Levels and Factors of the Accumulation of Metals and Metalloids in Roadside Soils, Road Dust and Their PM₁₀ Fraction in the Western Okrug of Moscow, *Eurasian Soil Science*, 2022, no. 5, p. 556–572.
- Yarynich Yu.I., Varentsov M.I., Platonov V.S. et al. The effect of Moscow megapolis on warm season precipitation depending on large-scale atmospheric conditions, *Water Resources*, 2023, vol. 50, no. 5, p. 699–708.

Received 27.08.2024

Revised 23.10.2024

Accepted 26.11.2024

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕЛОВО-ПИХТОВЫХ И ДУБОВЫХ ЛЕСОВ ЗАКАЗНИКА «УДЫЛЬ» (НИЖНЕЕ ПРИАМУРЬЕ)

П.С. Ван¹, Л.С. Шарая², Г.В. Ван³

¹ Заповедное Приамурье, сектор мониторинга состояния природных комплексов и объектов заповедника;

¹ Институт комплексного анализа региональных проблем (ИКАРП) Дальневосточного отделения РАН, Лаборатория геологических и геоэкологических исследований

² Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, Лаборатория географической сети опытов

³ Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет, естественно-географический факультет, кафедра безопасности жизнедеятельности и естественных наук

¹ Вед. науч. сотр., науч. сотр. (ИКАРП), канд. геогр. наук; e-mail: vanpolina8710@mail.ru

² Гл. науч. сотр., д-р биол. наук; e-mail: l_sharaya@mail.ru

³ Преподаватель, канд. биол. наук; e-mail: vangrigroriy@mail.ru

Определение связей между распределением лесов и рельефом – одна из ключевых задач в изучении структурно-функциональной организации лесных экосистем. Выявленные закономерности распределения лесов позволяют спрогнозировать их реакцию на внешние изменения среды. В Нижнем Приамурье такие исследования проведены недостаточно. Данная работа посвящена поиску связей между распределением елово-пихтовых и дубовых лесов и характеристиками почв и рельефа в регионе. С этой целью в заказнике «Удыль», расположенном в Нижнем Приамурье, в период с 2014 по 2017 г. проведены полевые работы с закладкой и описанием девяти пробных площадей в елово-пихтовых и дубовых лесах. Матрица рельефа получена из цифровой модели проекта NASA SRTM3, для каждой пробной площади рассчитаны характеристики рельефа – морфометрические величины. Выявлено, что в изучаемом регионе присутствует температурная инверсия почв, связанная с наличием вечной мерзлоты в понижениях и отсутствием ее на склонах гор. По этой причине нарушается распределение лесов по высотам – дубовые леса произрастают выше по склонам, чем елово-пихтовые, т. е. происходит инверсия типов леса. Еловые леса чаще встречаются на пологих северных и восточных склонах, дубовые леса – на крутых южных и западных склонах. Освещенность елово-пихтовых лесов колеблется в пределах 20–22%, дубняков – 34–37%. Освещенность дубняков возрастает с увеличением азимута – она максимальна при положении Солнца на юго-западе. Елово-пихтовые леса занимают отрицательные формы рельефа, произрастая в зонах слабо выраженной аккумуляции. Дубняки чаще встречаются на положительных формах рельефа – средневыпуклых и гребневых, располагаясь в зонах сноса водных и литодинамических потоков. Склоны с елово-пихтовыми лесами характеризуются более высокими значениями площади сбора жидких и твердых веществ, силы потоков и топографического индекса влажности в сравнении с дубняками.

Ключевые слова: закономерности пространственного распределения, рельеф, температура и влажность почвы, морфометрические величины

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.11

ВВЕДЕНИЕ

Рельеф наряду с климатом – основной средообразователь растительного покрова. Он влияет на потоковые и радиационные процессы на поверхности, температурный и водный режим почв, что, в свою очередь, отражается на распределении и свойствах растительности. Показано, что рельеф влияет на потенциальную структуру типов лесных местопроизрастаний, особенности распространения и роста лесобразующих пород, процессы лесовозобновления [Сысуев, Шарый, 2000]. В настоящее время матрицы высот рельефа находятся в свободном доступе [Rodrigues et al., 2005]. Матрицы рельефа

дают возможность интерполировать отдельные значения измеренных в поле или рассчитанных характеристик растительности на исследовательских площадках на всю поверхность изучаемого региона при условии их тесной связи [Шарая, Шарый, 2011].

Изучению пространственных закономерностей распределения лесных экосистем посвящен большой ряд отечественных научных работ прошлого столетия [Колесников, 1956; Карпенко, 1969; Сочава, 1975; Крауклис, 1979; Погребняк, 1980; Манько, 1983; Коломыц, 1995]. Ранее их поиск осложнялся отсутствием, в том числе подробной информации о количественных характеристиках рельефа для той

или иной территории. На основе связей рельефа и эдафических характеристик сформированы матрицы экологических факторов для количественного изучения пространственных закономерностей структурных и функциональных свойств лесных экосистем в Нижнем Приамурье [Шарая, Ван, 2021; Sharaya, Van, 2022]. Из последних работ по исследованию роли рельефа в пространственном распределении лесов можно отметить следующие – особенности распространения еловых лесов в Подмоскowie [Черенькова и др., 2015] и сосново-еловых лесов в Ленинградской области [Черниховский, 2017], оценка густоты редколесий в лесостепной зоне Белгородской области [Ukrainskiy et al., 2020], оценка количественных характеристик лесов в Иране [Rezaei Sangdehi et al., 2022] и др.

Нередко для выявления связей между рельефом и распределением растительности используют 1–3 морфометрические величины (МВ), среди которых чаще всего высота, крутизна и экспозиция склонов [Алексеев, Никифоров, 2014; Коломыц, 2008; Соколова, 2016; Bader, Ruijten, 2008], что ограничивает оценку всего многообразия процессов, связанных с ним. Исключение составляют некоторые работы – установление состояния лесных экосистем Германии [Zirlewagen et al., 2007] – 6 МВ, моделирование распространения пихты и дуба в горном районе на юго-западе Китая – 16 МВ [Zhang et al., 2016], выявление условий местообитания лиственнично-сосновых и дубовых лесов в Альпах – 24 МВ [Hörsch, 2003].

В Нижнем Приамурье роль рельефа в распределении лесов остается слабо исследованной [Петренко, Коломыц, 2018; Ван, 2024]. Изучение пространственного распределения лесных сообществ важно в связи с пониманием их пространственных изменений и прогнозом «смещения» границ разных типов лесов в условиях меняющегося климата. Цель данной работы – на основе расширенной системы базовых морфометрических величин и полевых данных выявить закономерности распределения елово-пихтовых и дубовых лесов в Нижнем Приамурье на субрегиональном уровне – для территории заказника «Удыль».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Физико-географическая характеристика района исследования. Полигон исследования – заказник «Удыль», который находится в Нижнеамурской области Амурско-Приморской физико-географической страны [Кривоуццкий, 1968]. Нижнее Приамурье ограничено с севера Охотским морем, с юга – долиной реки Амур, с востока – Сахалинским заливом и Амурским лиманом, с запада – Буреинским нагорьем (рис. 1). Рельеф региона низко- и среднегорно-долинный. Он включает в себя все широтные полосы тайги, а также горную и подтаежную зоны и находится в субпацифическом долготном секторе [Мартыненко, Бочарников, 2008].

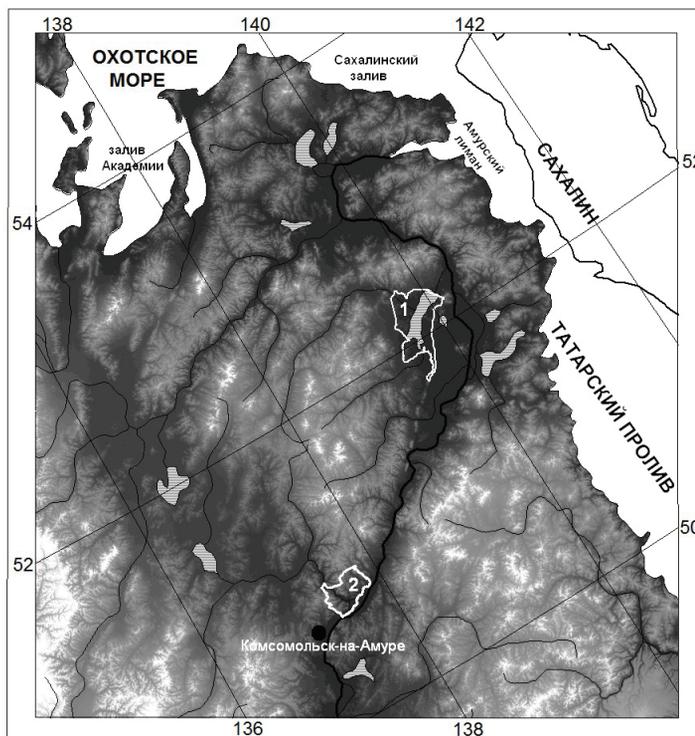


Рис. 1. Расположение заказника «Удыль» (1) и заповедника «Комсомольский» (2) в Нижнем Приамурье на карте рельефа

Fig. 1. Location of the Udyl' Nature reserve (1) and the Komsomolsky Nature Reserve (2) in the Lower Amur region

Заказник «Удыль» расположен на северо-востоке Нижнеамурской области, на северо-западе Удыль-Кизинской низменности, вблизи поймы реки Амур, в зоне островковой вечной мерзлоты. В центре заказника находится озеро Удыль, которое занимает 25% его площади. Рельеф территории озерно-аллювиальный низменный с короткими низкогорными хребтами (высота от 5 до 476 м). В основной части заказника произрастает интразональная лугово-болотная растительность, развивающаяся на торфяно-глееземах и аллювиальных почвах. Леса составляют 25% территории заказника. К зональной растительности относятся среднетаежные елово-пихтовые и лиственничные леса, которые вместе с производными от них березовыми и осиновыми занимают низкогорную часть заказника [Ван и др., 2021]. Они произрастают на почвах буроземного типа. Территория заказника сильно пострадала от лесных пожаров в разные годы.

В статье также приводится сравнение с результатами исследований, полученных на территории заповедника «Комсомольский», расположенном в южной приграничной части Нижнего Приамурья (см. рис. 1) в зоне произрастания южнотаежных и подтаежных лесов. Рельеф заповедника низко- и среднегорно-долинный (амплитуда высот от 20 до 680 м).

Полевые методы исследования. В заказнике «Удыль» летом 2014, 2016 и 2017 гг. в различных типах местоположений (геотопах) [Глазковская, 1964], образующих систему местных ландшафтных сопряжений от элювиальных до супераквальных, были заложены девять пробных ландшафтно-экологических площадей размером 20×20 м, из них шесть в елово-пихтовых лесах и три в дубняках. Их распределяли таким образом, чтобы максимально охватить ландшафтное разнообразие территории. При закладке пробных площадей проводили комплексное описание растительности, почвенного профиля и рельефа. Кроме того, измеряли температуру почвы на фиксированных глубинах от 30 до 70 см через каждые 10 см ртутным термометром. Дополнительно определяли влажность почв для различных почвенных горизонтов полевым визуальным методом с выделением пяти категорий влажности [Добровольский, 1982] в баллах: сухая, свежая, влажная, сырая, мокрая.

Расчет морфометрических величин. Для анализа использовали характеристики рельефа – морфометрические величины (МВ), описывающие рельеф пробных площадей. Для этого применяли систему базовых МВ [Shary et al., 2002] и ряда составных [Шарый, Пинский, 2013] МВ, полученных из цифровой модели рельефа проекта NASA SRTM3 в программе Аналитическая ГИС Эко [Wood, 2009].

Условия рельефа площадей произрастания лесов охарактеризованы с помощью девяти МВ, описанных ниже.

Основной МВ является абсолютная высота Z . Тянущую вниз со склонов силу характеризует крутизна, которая определяется углом наклона поверхности GA . Для оценки термо- и светорежима лесов использовали освещенность и экспозицию склонов. Относительная освещенность склонов $F_0(a, b)$ определяется как перпендикулярность падения солнечных лучей на земную поверхность, которая зависит от двух углов: склонения a Солнца над горизонтом и азимута Солнца b [Шарая, Шарый, 2011]. Ее можно выражать в процентах (100% для перпендикулярного падения лучей, и 0% – для теневых склонов) или в единицах энергии по формуле

$$F_0(a, b) = \tau \cdot F_0(a, b)/100, \quad (1)$$

где $\tau = 760 \text{ Вт/м}^2$ есть солнечная постоянная на уровне моря, а $F_0(a, b)$ – освещенность в процентах.

Экспозиция склонов имеет циклическую легенду (0 и 360° – одно и то же, северный склон), поэтому использование ее вместе с другими МВ в статистических сравнениях некорректно. Вместо нее используют две нециклические величины $\sin A_0$ и $\cos A_0$ [Шарый, Смирнов, 2013]. Положительные значения $\sin A_0$ отвечают восточным, $\cos A_0$ – северным, а отрицательные значения – западным и южным склонам, соответственно.

Горизонтальная kh и вертикальная kv кривизны дают представление о двух основных механизмах аккумуляции жидких и твердых веществ. kh описывает первый механизм, отражающий поведение потоков на земной поверхности, проецируя его на горизонтальную плоскость. При этом $kh < 0$ характеризует конвергентные склоны, собирающие с поверхности водные и литодинамические потоки за счет их сближения, а $kh > 0$ – дивергентные склоны, рассеивающие потоки. Проецирование на перпендикулярную к горизонтальной плоскости позволяет охарактеризовать динамическую компоненту потоков – вертикальную кривизну kv : потоки могут испытывать относительное ускорение при $kv > 0$ на выпуклых в профиле склонах или замедление при $kv < 0$ на вогнутых.

Геометрические формы рельефа, которые не изменяются при наклоне и повороте поверхности (т. е. не зависят от положения в гравитационном поле), описывают средняя H , максимальная k_{\max} и минимальная k_{\min} кривизны. Значениям $H < 0$ отвечают средневогнутые формы рельефа, $H > 0$ – средневыпуклые. Гребневые формы рельефа определяются $k_{\max} > 0$, а килевые формы – $k_{\min} < 0$.

Региональные характеристики потоков жидких и твердых веществ под действием силы тяжести описываются площадью сбора МСА, характеризующей собирающую площадь в данный элемент матрицы, топографическим индексом влажности TI , который рассчитывается отношением МСА к крутизне GA (могут выделяться здесь зоны подтопления при снижении GA), и силой потоков SPI , которая есть произведение МСА и GA (увеличение GA приводит к возрастанию силы потоков при одной и той же площади сбора).

Оценка статистической значимости полученных результатов проводилась с помощью t -статистики Стьюдента. В ее основе лежит оценка достоверности различия средних значений для двух сравниваемых выборок:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}, \quad (2)$$

где \bar{x}_1 и \bar{x}_2 – средние по выборкам, m_i – ошибки, определенные как стандартное отклонение, деленное на корень из числа точек наблюдения. Если $|t|$ меньше t_0 , то средние статистически одинаковы, иначе – разные. Величина t_0 зависит от выбранного уровня вероятности (0,05 или «достоверные отличия на уровне 95%») и числа степеней свободы (общее число точек). Расчет с помощью t -статистики Стьюдента проводился в программе Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Елово-пихтовые леса являются зональными для заказника. Поскольку территория сильно пострадала от пожаров, их площадь составляет около 2% от площади ООПТ. Сохранившиеся елово-пихтовые леса произрастают небольшими группами на покатах поверхностях подгорных шлейфов и нижних частях пологих затененных склонов, в долинах ключей и рек. Помимо *Picea ajanensis* Fisch. ex Carr. и *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim. к составу древостоя часто примешиваются *Larix cajanderi* Mayr и *Betula platyphylla* Sukaczew; в поймах рек – *Sorbus amurensis* Koehne, *Fraxinus mandshurica* Rupr, *Acer mono* Maxim. ex Rupr. В поврежденных ельниках с пожарами 50–60-летней давности ель и пихта успешно возобновляются, вытесняя лиственницу и березу. Класс бонитета в среднем составляет III–IV. Сомкнутость крон 0,6–0,8 баллов. Кустарниковый ярус практически отсутствует. Здесь представлено два типа ельников – травяно-зеленомошные и зеленомошно-папоротниковые. В первом типе незначительный травяной покров характеризуется низким проективным покрытием до 30%. Его составляют в основном *Chamaepericlymenum canadense* (L.) Asch.

& Graebn., *Equisetum sylvaticum* L., *Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt, *Trientalis europaea* L., *Smilacina dahurica* Turcz. ex Fisch. & C.A. Mey., *Linnaea borealis* L. В елово-пихтовых зеленомошно-папоротниковых лесах травяно-кустарниковый ярус отличается большим разнообразием. Здесь доминируют *Smilacina dahurica* и *Gymnocarpium Dryopteris* (L.) Newman. Помимо видов, характерных для предыдущего типа леса, появляются *Paris verticillata* M. Bieb., *Aconitum umbrosum* (Korsh.) Kom., *Aruncus dioicus* (Walter) Fernald и др. Проективное покрытие травостоя 50–70%.

Дубовые и дубово-лиственничные леса в заказнике «Удиль» встречаются фрагментарно и занимают, как правило, прогретые вершины сопкок. Чистых дубняков в заказнике мало. Дубово-лиственничные леса часто являются вторичными. Об этом говорит наличие пирогенных остатков в маломощных скелетных почвах, на которых они развиваются. Здесь молодые дубы (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.) от 30–70 лет, в зависимости от абсолютной высоты их расположения, достигающие от 10 до 16 м, с классом бонитета II–V, соседствуют с уцелевшей от пожара *Larix cajanderi* возрастом 120–140 лет с классом бонитета III–IV. Сомкнутость крон возрастает с высотой местности от 0,3 балла на высоте 30 м до 0,6 балла на высоте 300 м. Кустарниковый ярус плохо выражен (проективное покрытие 5%) и состоит из *Rosa acicularis* Lindl., *Spiraea media* Schmidt и *Rhododendron dauricum* L. В густом травяно-кустарниковом ярусе с проективным покрытием 70–95% доминируют осоки и вейники. Значительна роль *Artemisia maximovicziana* Krasch. ex Poljakov, *A. medioxima* Krasch. ex Poljakov, *Lathyrus humilis* (Ser.) Spreng., *Maianthemum bifolium*, *Convallaria keiskei* Miq., *Hemerocallis middendorffii* Trautv. & C.A. Mey и *Rhodococcum vitis-idaea* (L.) Avrogin.

Использование нами в описании и сравнении двух типов леса морфометрических характеристик и собранного полевого материала на исследуемых площадях позволило выявить следующие особенности и различия в распределении изученных лесов в регионе.

Абсолютная высота и температура почвы. Елово-пихтовые леса встречаются чаще в нижних частях склонов и их подножиях (10–55 м), а также в межгорных ложбинах (до 300 м), занимая увлажненные и охлажденные аккумулятивные, трансаккумулятивные и супераккумулятивные местоположения (14–60 м) (рис. 2, табл. 1). Эти участки характеризуются максимальным сбором почвенной влаги с верхних склонов и близким расположением к поверхности вечной мерзлоты, охлаждающей почвы. В супераккумулятивных местоположениях в заказнике

влажность почвы примерно в 3 раза выше, а ее температура в 3 раза ниже, чем на вершинах и верхних участках склонов [Шарая, Ван, 2021; Sharaya, Van, 2022]. При этом ельники приурочены к местам с проточным, а не застойным увлажнением, часто располагаясь у ручьев. Тяготение ельников Дальнего Востока к влажным и холодным местообитаниям отмечена многими учеными [Чумин, 1969; Урусов и др., 2007; Манько и др., 2011; Волков, 2015; Шлотгауэр, 2016; Максимова и др., 2019]. Подобные условия местопроизрастания характерны и для еловых лесов европейской части России [Черненкова и др., 2015; Пузаченко, Черненкова, 2016; Беляева и др., 2020]. В середине июля в елово-пихтовых лесах температура почвы на глубинах от 30 до 70 см колеблется в диапазоне от 4 до 7°C (рис. 3).

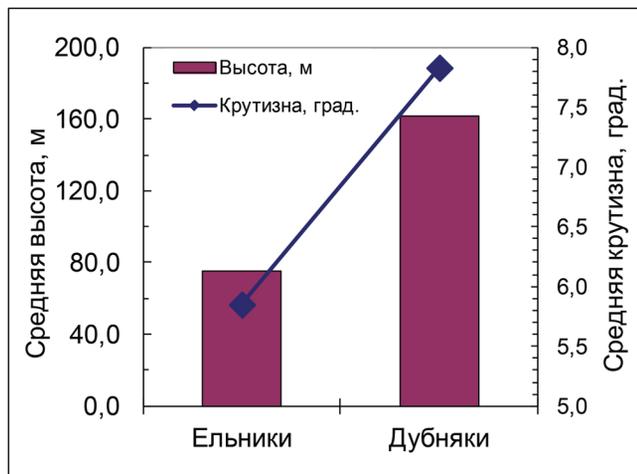


Рис. 2. Сравнение средних значений высот и крутизны склонов пробных площадей с елово-пихтовыми и дубовыми лесами

Fig. 2. Comparison of average altitude and steepness of slope of the sample plots with spruce-fir and oak forests

Дубовые леса заказника занимают верхние части склонов, произрастая в прогретых и сухих элювиальных и трансэлювиальных местоположениях (50–300 м), что также подтверждается другими научными работами [Добрынин, 2000; Шлотгауэр, 2016; Середюк, Выводцев, 2016]. Такие места их расположения в этом регионе рассматриваются как рефугиумы, поскольку дуб монгольский – южный элемент флоры (маньчжурская флора) – находится в пессимальных условиях произрастания в суровом климате. В отличие от елово-пихтовых лесов почвы в дубовых лесах более прогреты: на глубинах 30–70 см температура колеблется от 8 до 12°C (см. рис. 3). Добавим, что вероятность различия в распределении дубовых и елово-пихтовых лесов в заказнике «Удыль» по указанным высотам характеризуется результатами статистической оценки в 65% (табл. 2).

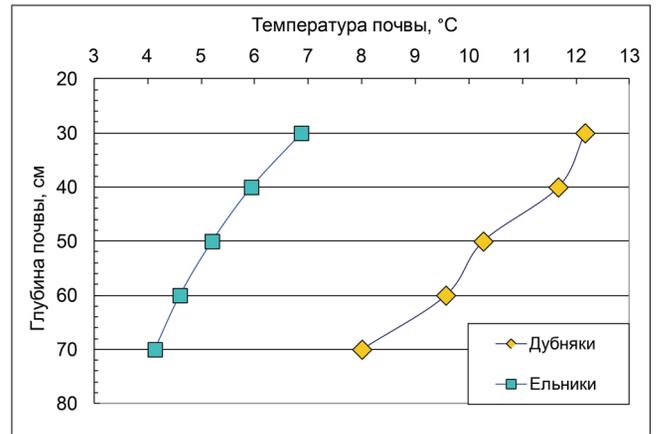


Рис. 3. Распределение температуры почвы в июле на глубинах 30–70 см в елово-пихтовых и дубовых лесах заказника «Удыль»

Fig. 3. Distribution of the July soil temperature at depths of 30 to 70 cm in spruce-fir and oak forests in the Udyl' Nature Reserve

Дубняки Комсомольского заповедника, расположенного южнее заказника, также преимущественно занимают сухие прогретые вершины и верхние части склонов (элювиальные и трансэлювиальные местоположения), но при этом они произрастают на увалах (низкогорье) с высотами от 100 до 300 м. Вершины и привершинные теневые и нейтральные склоны горных образований с высотами от 370 до 680 м в заповеднике занимают елово-пихтовые леса. Помимо этого, они также как и темнохвойные леса заказника могут локализоваться в трансэлювиальных (предгорных) местоположениях с повышенным увлажнением и ограниченной освещенностью. Температура почвы в елово-пихтовых лесах заповедника на той же глубине колеблется в пределах 9–11°C, а в дубовых лесах от 10 до 14°C [Петренко, 2014].

Обычный порядок расположения лесов в горах, когда дубовые леса произрастают по склонам ниже темнохвойных, в заказнике «Удыль» нарушается из-за инверсии почвенной температуры: внизу температура снижена из-за близости вечной мерзлоты, сверху – выше из-за отсутствия мерзлоты на солнечепечных вершинах и верхних частях склонов.

Крутизна и экспозиция склонов. Елово-пихтовые леса занимают пологие склоны и низины, в отличие от дубовых лесов, произрастающих на крутых склонах (см. рис. 2). Ельники располагаются на хорошо выраженных северных склонах, на которых дубняки почти отсутствуют, и на склонах восточной экспозиции. Дубняки в основном занимают южные и западные склоны (рис. 4). Заметим, что, согласно результатам статистической оценки (см. табл. 2), вероятность различия произрастания ельников на восточных склонах, а дубняков на западных составляет только 50%, что является низким показателем

Приуроченность елово-пихтовых и дубовых лесов заказника «Удыль» к различным показателям рельефа и другим условиям местопроизрастания

Показатели рельефа и другие условия местопроизрастания	Типы леса			
	Елово-пихтовые		Дубовые	
	Пределы значений	Среднее значение	Пределы значений	Среднее значение
Типы местоположений*	A, Та, Saq	–	Э, Тэ	–
Z, м	15–300	75	30–300	160
GA, градусы	0–15	5	5–10	10
$\cos A_0$	0,3–1	0,7 северные склоны	(–0,6)–0	–0,2 преобладают на южных склонах
$\sin A_0$	(–0,6)–1	0,3 преобладают на восточных склонах	(–1)–0,8	–0,4 преобладают на западных склонах
Освещенность склонов $F_0(a, b)$, %	20–22	21	34–37	36
Температура почвы на глубине 50 см, °C	0–9	6	10–11	10
Влажность почвы	Свежие–Влажные	Влажные	Сухие–свежие	Сухие
Присутствие вечной мерзлоты в почве	Часто присутствует	–	Отсутствует	–
kh	(–0,6)–0,5	–0,2 преобладают конвергентные склоны	0,5–3,5	1,6 сильно выраженные дивергентные склоны
kv	(–0,5)–0,5	0	0,1–2,1	1 выражены ускоряющие потоки
Итоговое воздействие kh и kv	–	Преобладают в зоне слабо выраженной аккумуляции	–	Преобладают в зоне сноса
H	(–0,9)–0,4	–0,2	0,6–2,6	1,6 выраженные средневывуклые формы
k_{\min}	(–1,4)–0,4	–0,7 преобладают килевые формы	0,2–1,4	0,8 выраженные внекилевые формы
k_{\max}	(–0,6)–0,7	0,1	0,7–2,1	1,5 выраженные гребневые формы
$\ln MCA$, м ²	9–14	10	5–10	8
$\ln TI$	11–16	13	7–12	10
$\ln SPI$	6–11	8	3–8	6

Примечание. * Э – элювиальный, Тэ – трансэлювиальный, Та – трансаккумулятивный, А – аккумулятивный, Saq – супераккумулятивный [Глазовская, 1964]. Расшифровка кривизны и региональных величин приведены в разделе «Материалы и методы исследований».

достоверности. Тем не менее во многих работах также отмечается тяготение дубняков к южным и юго-западным крутым склонам [Цымек, 1969; Добрынин, 2000; Шлотгауэр, 2016; Середюк, Выводцев, 2016]. Некоторые исследователи отмечают

приуроченность ели к пологим и покатым склонам [Урусов и др., 2007], другие утверждают, что елово-пихтовые леса могут занимать любые местоположения и склоны с разной крутизной [Манько, 1983; Чумин, 1969]. Однако авторы всех указанных работ

Таблица 2

Оценка различия средних значений для двух сравниваемых выборок (ельники и дубняки), выполненная с помощью *t*-статистики Стьюдента

Показатели рельефа и другие условия местопроизрастания	Уровень достоверности отличия, %	Показатели рельефа и другие условия местопроизрастания	Уровень достоверности отличия, %
Z	65	<i>kv</i>	75
GA	78	<i>H</i>	91
cos <i>A</i> ₀	85	<i>k</i> _{min}	90
sin <i>A</i> ₀	50	<i>k</i> _{max}	90
<i>F</i> (35;120)	95	ln <i>MCA</i>	92
<i>F</i> (35;140)	96	ln <i>TI</i>	95
<i>F</i> (35;160)	95	ln <i>SPI</i>	85
<i>F</i> (35;180)	89	T 30 см	99
<i>F</i> (35;200)	89	T 40 см	99
<i>F</i> (35;220)	89	T 50 см	99
<i>F</i> (35;240)	89	T 60 см	99
<i>kh</i>	90	T 70 см	98

сходятся во мнении, что в основной части своего ареала, к которому относится и Нижнее Приамурье, елово-пихтовые леса тяготеют к северным склонам. В наших исследованиях показано, что в заказнике «Удыль» на северных склонах температура почвы в 1,7 раза меньше, а влажность в 1,5–1,7 раза больше, чем на южных [Шарая, Ван, 2021; Sharaya, Van, 2022].

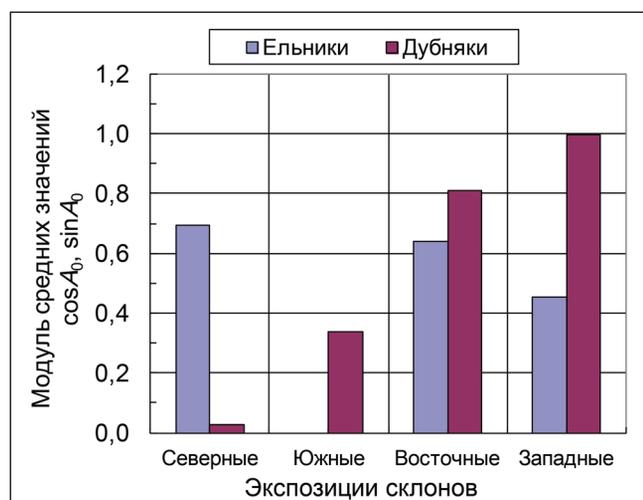


Рис. 4. Сравнение средних значений модулей $\cos A_0$ и $\sin A_0$, отражающих выраженность разных экспозиций склонов для дубовых и елово-пихтовых лесов заказника «Удыль»

Fig. 4. Comparison of $\cos A_0$ and $\sin A_0$ modules average values reflecting the intensity of different slope exposures for oak and spruce-fir forests of the Udyly' Nature Reserve

В Комсомольском заповеднике темнохвойные леса занимают склоны с различной экспозицией и крутизной, при этом приуроченность их местообитаний к экспозиции изменяется с высотой. Так, на наименьших высотах (40–200 м) ельники занимают восточные и северо-восточные склоны, на средних (350–450 м) – южные и юго-восточные склоны, на наибольших (550–780 м) – склоны западной экспозиции. В этом отношении они схожи с елово-пихтовыми лесами заказника «Удыль». Дубняки в заповеднике произрастают в основном на крутых склонах южной экспозиции, которая незначительно изменяется с высотой.

Освещенность. Для всех пробных площадей елово-пихтовых лесов за весь световой день освещенность варьирует в среднем в пределах 20–22% (152–167 Вт/м²). Дубняки освещены сильнее – 34–37% (от 258 до 281 Вт/м²) (рис. 5). Освещенность дубняков возрастает с увеличением азимута – соответственно в вечерние часы при положении Солнца на юго-западе (220–240°) они освещены максимально.

Потоковые характеристики пробных площадей. Елово-пихтовые леса преимущественно занимают склоны, собирающие водные и литодинамические потоки (конвергентные) (рис. 6). На средних высотах леса произрастают на склонах, ускоряющих потоки (выпуклых в профиле), а в низине и на максимальной высоте – на склонах, замедляющих их (вогнутые в профиле). В целом с постепенным возрастанием высоты местности в ельниках выпуклые склоны сменяются вогнутыми. В отличие от елово-пихтовых лесов изученные площадки с дубняками занимают только склоны, рассеивающие

(дивергентные) и ускоряющие потоки (выпуклые в профиле). Отметим, что выраженность потенциалов собирать и замедлять потоки, определяемая значением соответствующей кривизны, для площадей елово-пихтовых лесов заметно ниже потенциалов рассеивать и ускорять потоки для площадей дубовых лесов. Таким образом, елово-пихтовые леса произрастают в основном в зонах аккумуляции, а дубняки исключительно в зоне сноса твердых и жидких веществ.

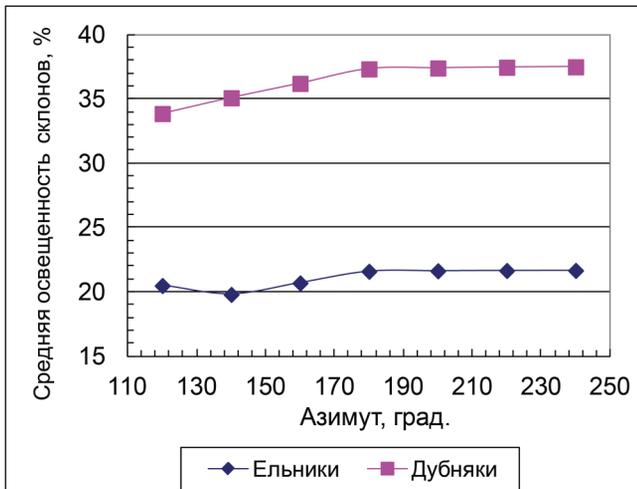


Рис. 5. Средняя освещенность склонов при разных азимутах для пробных площадей с ельниками и дубняками

Fig. 5. Mean illumination of slopes at different azimuths for sample plots with spruce-fir and oak forests

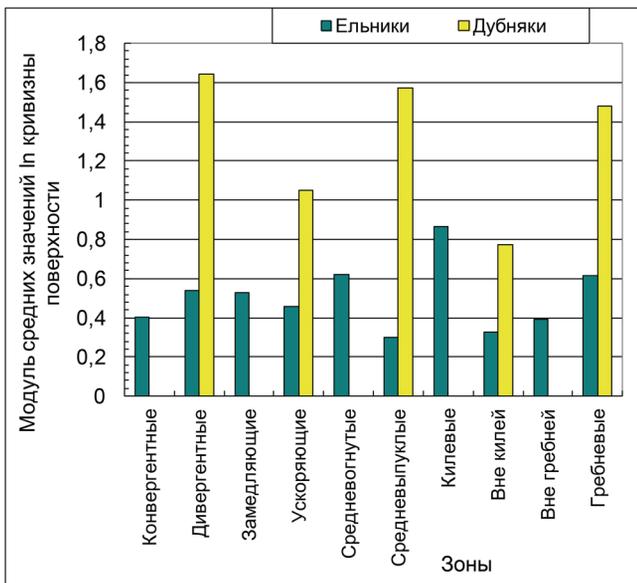


Рис. 6. Модули средних значений логарифма кривизны, описывающих выраженность разных зон рельефа, связанных с характеристиками потоков и форм

Fig. 6. Modules of average values of curvature logarithms describing the intensity of different relief areas linked with the flow and shape characteristics

Геометрические формы рельефа, не связанные напрямую с потоками. Практически для всех пробных площадей елово-пихтовых лесов характерны килевые (отрицательные) формы рельефа (см. рис. 6). При этом на средних высотах наблюдаются также слабовыраженные гребневые (положительные) формы. Дубняки в отличие от елово-пихтовых лесов занимают только положительные формы рельефа, произрастая на выпуклых склонах и на гребневых формах.

А.С. Карпенко в своей работе [1969] также говорит о приуроченности темнохвойных лесов в нижнем течении реки Амгунь (левый приток Амура) к отрицательным формам рельефа. Ю.И. Манько [1983] отмечает, что эти леса в Нижнем Приамурье не тяготеют к определенным элементам микро-рельефа, избегая только заболоченных мест и высоких вершин. Интересно, что в центральной части Восточно-Европейской равнины ельники также занимают вогнутые участки водоразделов, а дубняки – наиболее выпуклые формы рельефа с хорошим дренажом [Черненко и др., 2015; Беляева и др., 2020].

Региональные потоковые характеристики. Пробные площади с елово-пихтовыми лесами характеризуются наибольшими значениями площади сбора, топографического индекса влажности и индекса мощности потоков в отличие от дубняков (рис. 7). Превышение данных показателей у ельников в сравнении с дубняками составляет 25–30%.

Практически все рассмотренные показатели рельефа и другие условия местопроизрастания имеют высокую достоверность различия для елово-пихтовых и дубовых лесов – 75–99% (см. табл. 2).

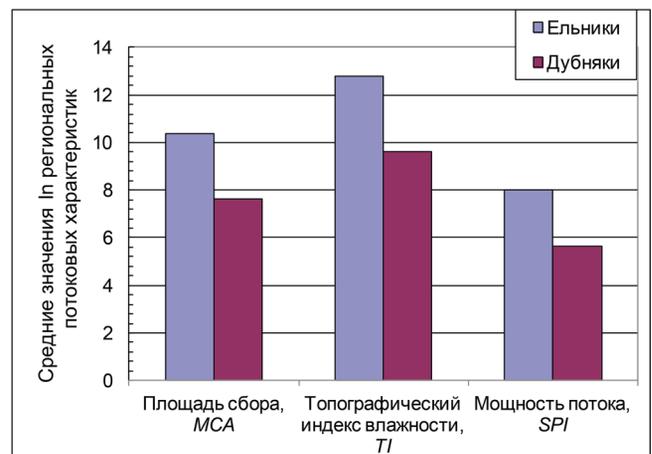


Рис. 7. Средние значения логарифмов характеристик, описывающих выраженность разных свойств рельефа, связанных с региональными (не локальными) потоками

Fig. 7. Average values of logarithms of characteristics describing the intensity of various relief properties linked with regional (not local) flows

ВЫВОДЫ

На топологическом уровне исследования в заказнике «Удиль» с помощью сравнения морфометрических величин и собранных полевых данных в Нижнем Приамурье показана приуроченность елово-пихтовых и дубовых лесов к определенным показателям рельефа и другим условиям местопрорастания.

Выявленные закономерности распределения елово-пихтовых и дубовых лесов в регионе в основном подтверждают выводы других авторов, проводивших исследование данных типов леса на Дальнем Востоке и в европейской части России. Их кратко можно изложить следующим образом. Елово-пихтовые леса занимают северные и северо-восточные пологие склоны, «выбирая» затененные и увлажненные местоположения. Они произрастают преимущественно в зонах аккумуляции на отрицательных формах рельефа. Дубняки в отличие от ельников локализуются на прогретых южных скло-

нах исключительно в зоне сноса твердых и жидких веществ на положительных формах рельефа.

Распределение лесов в заказнике «Удиль» определено важным микроклиматическим фактором, «ломающим» общие географические закономерности произрастания лесов по склонам. Здесь на водоразделах отсутствуют ельники – они локализуются в нижних частях склонов, тогда как верхние участки заняты дубняками. Причиной этой *инверсии типов леса* на склонах является *инверсия температуры почвы*. Благодаря близости расположения вечной мерзлоты в низинах и у подножия склонов гор и отсутствия ее на хорошо прогретых склонах и вершинах почвенная температура не снижается с высотой, как обычно в горах, а возрастает.

Используемый в работе подход количественного сравнения морфометрических величин и свойств почв для мест произрастания разных типов леса является полезным и перспективным для понимания закономерностей распределения различных типов леса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.С., Никифоров А.А. Влияние рельефа на структуру и продуктивность лесных ландшафтов с применением 3D-моделирования на примере Лисинского учебно-опытного лесхоза // Лесоведение. 2014. № 5. С. 42–53.
- Беляева Н.Г., Сандлерский Р.Б., Черненко Т.В. Ландшафтообразующая роль рельефа в формировании состава лесов юго-западной части Московской области // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2020. № 65(2). С. 362–376. DOI: 10.21638/spbu07.2020.208.
- Ван П.С. Организация лесных геосистем Нижнего Приамурья на примере заповедника «Комсомольский» // Поволжский экологический журнал. 2024. № 1. С. 3–19. DOI: 10.35885/1684-7318-2024-1-3-19.
- Ван П.С., Силаев А.В., Ван Г.В. Растительность федерального заказника «Удиль» (Нижнее Приамурье) // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геогр. Геоэкол. 2021. № 3. С. 69–78. DOI: 10.17308/geo.2021.3/3603.
- Волков Е.В. Пихтово-еловые леса в нижней части бассейна р. Бурей // Вестн. КрасГАУ. 2015. № 5. С. 190–196.
- Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: МГУ, 1964. 230 с.
- Добрынин А.П. Дубовые леса российского Дальнего Востока (биология, география, происхождение). Владивосток: Дальнаука, 2000. 260 с.
- Добровольский В.В. Практикум по географии почв с основами почвоведения. М.: Просвещение, 1982. 127 с.
- Карпенко А.С. Основные закономерности растительного покрова нижней части бассейна Амгуни // Амурская тайга (комплексные ботанические исследования). Л.: Наука, 1969. С. 36–52.
- Колесников Б.П. Кедровые леса Дальнего Востока // Труды ДВО АН СССР. Сер. ботанич. 1956. Т. 2(4). 262 с.
- Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
- Коломыц Э.Г. Организация и устойчивость хвойно-лесных экосистем на бореальном экотоне Русской равнины // Известия РАН. Сер. географическая. 1995. № 3. С. 37–51.
- Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 232 с.
- Кривоулицкий А.Е. Амурско-Приморская страна // Физико-географическое районирование СССР: характеристика региональных единиц / под ред. проф. Н.А. Гвоздецкого. М.: Типография изд-ва МГУ, 1968. С. 503–542.
- Максимова В.Ф., Майорова Л.А., Петропавловский Б.С. Основные факторы среды, влияющие на усыхание пихтово-еловых лесов Дальнего Востока // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 1. С. 61–66.
- Манько Ю.И. Ель аянская и особенности ее географического распространения // Комаровские чтения. Вып. XXX. 1983. С. 3–28.
- Манько Ю.И., Гладкова Г.А., Бутовец Г.Н. К изучению естественной динамики пихтово-еловых лесов центрального Сихотэ-Алиня // Вестн. КрасГАУ. 2011. № 12. С. 120–125.
- Мартыненко А.Б., Бочарников В.Н. Экологическое районирование Дальнего Востока // Известия РАН. Сер. геогр. 2008. № 2. С. 76–84.
- Петренко П.С. Моносистемная организация лесных биогеоценозов на бореальном экотоне Нижнего Приамурья // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1. С. 84–92.
- Петренко П.С., Коломыц Э.Г. Влияние геоморфологических факторов на организацию лесных топогеосистем заповедника «Комсомольский» // Вестн. Воронеж. гос-го ун-та. Сер.: Геогр., Геоэкол. 2018. № 2. С. 16–27.
- Погребняк П.С. Общее лесоводство. 2-е изд., перераб. М., 1968. 440 с.

- Пузаченко М.Ю., Черненко Т.В. Определение факторов пространственного варьирования растительного покрова с использованием ДДЗ, ЦМР и полевых данных на примере центральной части Мурманской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 167–191. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-167-191.
- Сердюк А.В., Выводцев Н.В. Дубы Дальнего Востока // Ученые заметки ТОГУ. 2016. Т. 7. № 4. С. 427–435.
- Соколова Г.Г. Влияние высоты местности, экспозиции и крутизны склона на особенности пространственного распределения растений // Acta biologica Sibirica. 2016. Т. 2. № 3. С. 34–45. DOI: 10.14258/abs.v2i3.1453.
- Сочава В.Б. Учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1975. 39 с.
- Сысуюев В.В., Шарый П.А. Выделение типов условий местопроизрастания для лесоустройства по участковому методу // Лесоведение. 2000. № 5. С. 10–19.
- Урусов В.М., Лобанова И.И., Варченко Л.И. Хвойные российского Дальнего Востока – ценные объекты изучения, охраны, разведения и использования. Владивосток: Дальнаука, 2007. 440 с.
- Цылик А.А. Дубовые леса // Леса Дальнего Востока / под ред. А.С. Агеенко. М.: Лесная промышленность, 1969. С. 171–176.
- Черненко Т.В., Морозова О.В., Пузаченко М.Ю. и др. Состав и структура лесов юго-западного Подмосковья // Лесоведение. 2015. № 5. С. 323–338.
- Черниковский Д.М. Автоматическая классификация поверхности рельефа для изучения количественных и качественных характеристик лесов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 219. С. 74–95. DOI: 10.21266/2079-4304.2017.219.74-95.
- Чумин В.Т. Еловые леса. Лесоводственная характеристика // Леса Дальнего Востока / под ред. А.С. Агеенко. М.: Лесная промышленность, 1969. С. 94–100.
- Шарая Л.С., Ван П.С. Закономерные изменения температур почвы на территории заказника «Удиль» (Нижнее Приамурье) // География и природные ресурсы. 2021. Т. 42. № 2(166). С. 51–58. DOI: 10.15372/GIPR20210206.
- Шарая Л.С., Шарый П.А. Изучение пространственной организации лесных экосистем с помощью методов геоморфометрии // Экология. 2011. № 1. С. 3–10.
- Шарый П.А., Пинский Д.Л. Статистическая оценка связи пространственной изменчивости содержания органического углерода в серой лесной почве с плотностью, концентрациями металлов и рельефом // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1344–1356.
- Шарый П.А., Смирнов Н.С. Механизмы влияния солнечной радиации и анизотропии местности на растительность темнохвойных лесов Печоро-Ильчского заповедника // Экология. 2013. № 1. С. 11–19.
- Шлотгауэр С.Д. Реликтовые черты лесной растительности национального парка «Ануйский» (Хабаровский край) // Региональные проблемы. 2016. Т. 19. № 3. С. 38–48.
- Bader M.Y., Ruijten J.J. A topography-based model of forest cover at the alpine treeline in the tropical Andes, *Journal of Biogeography*, 2008, vol. 35, no. 4, p. 711–723, DOI: 10.1111/j.1365-2699.2007.01818.x.
- Hörsch B. Modeling the spatial distribution of mountain and subalpine forests in the Central Alps using digital elevation models, *Ecological modeling*, 2003. vol. 168, no. 3, p. 267–282, DOI: 10.1016/S0304-3800(03)00141-8.
- Rezaei Sangdehi S.M., Fallah A., Oladi J.A. et al. The modeling of some quantitative characteristics forest using topographic features stands (case study: district-3 of Sangdeh forests), *Ecology of Iranian forests*, 2022, vol. 10, no. 19, p. 88–98, DOI: 10.52547/ifej.10.19.88. (In Persian)
- Rodrigues E., Morris C.S., Belz J.E. et al. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Pasadena, California, Jet Propulsion Laboratory, 2005, 143 p.
- Sharaya L.S., Van P.S. Regular changes in soil moisture content in coniferous forests of the Udyly State Nature Reserve, Lower Amur River Region, *Contemp. Probl. Ecol.*, 2022, vol. 15, no. 7, p. 863–871, DOI: 10.1134/S1995425522070198.
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma*, 2002, vol. 107, p. 1–32.
- Ukrainskiy P., Terekhin E., Lisetskii F. et al. The influence of relief on the density of light-forest trees within the Small-Dry-Valley network of uplands in the forest-steppe zone of Eastern Europe, *Geosciences*, 2020, vol. 10, no. 11, p. 1–18, DOI: 10.3390/geosciences10110420.
- Wood J. Overview of software packages used in geomorphometry, *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, Amsterdam, etc., Elsevier, 2009, vol. 33, ch. 10, p. 257–267, DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00010-X.
- Zhang L., Liu S., Sun P. et al. Using DEM to predict *Abies faxoniana* and *Quercus aquifolioides* distributions in the upstream catchment basin of the Min River in southwest China, *Ecological indicators*, 2016, vol. 69, p. 91–99, DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.04.008.
- Zirlewagen D., Raben G., Weise M. Zoning of forest health conditions based on a set of soil, topographic and vegetation parameters, *Forest Ecology and Management*, 2007, vol. 248, p. 43–55.

Поступила в редакцию 12.02.2024

После доработки 21.09.2024

Принята к публикации 26.11.2024

REGULARITIES OF SPRUCE-FIR AND OAK FORESTS DISTRIBUTION OVER THE UDYL' STATE NATURE RESERVE (THE LOWER AMUR RIVER REGION)

P.S. Van¹, L.S. Sharaya², G.V. Van³

¹ *Zapovednoe Priamur'e, Sector for Natural Complexes and the Reserve Objects' Monitoring;*

¹ *The Institute for Complex Analysis of Regional Problems (ICARP), Far Eastern Branch RAS, Laboratory of Geology and Geoecology Studies*

² *Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, Geographic Network Laboratory*

³ *Amur State University of Humanities and Pedagogy, Faculty of Nature and Geography, Department of Life Safety and Natural Sciences*

¹ *Leading Scientific Researcher, Scientific Researcher (ICARP), Ph.D. in Geography; e-mail: vanpolina8710@mail.ru*

² *Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Biology; e-mail: l_sharaya@mail.ru*

³ *Lecturer, Ph.D. in Biology; e-mail: vangrigoriy@mail.ru*

The identification of relationships between forest spatial distribution and relief features is among the main objectives in studying the structural and functional organization of forest ecosystems. The revealed patterns of forest distribution make it possible to predict their response to external environmental changes. In the Lower Amur River region, such studies are quite insufficient. The study objective is to identify relationships between spruce-fir and oak forests' distribution and relief parameters in the region. For this purpose nine sampling plots were placed and described in 2014–2017 in spruce-fir and oak forests of the Udyl' State Nature Reserve located in the Lower Amur River region. The relief matrix was obtained from the digital model of the NASA SRTM3 project, and morphometric values of relief parameters were calculated for each sample plot. It was found that there is a thermal inversion in soils of the region under study coming from the occurrence of permafrost in depressions and its absence on mountain slopes. As a result the altitudinal distribution of forests is disrupted – the oak forests grow higher on the slopes than the spruce-fir ones, thus producing the inversion of forest types. Spruce forests more often occupy the northern and eastern gentle slopes, while the oak forests grow on the southern and western steep slopes. Light intensity in the spruce-fir forests ranges from 20 to 22%, being from 34 to 37% in the oak forests. Light intensity in the oak forests increases with increasing azimuth and reaches the maximum when the Sun is in the southwest. Spruce-fir forests occupy negative topographic forms, growing in the zones of weak accumulation. Oak forests often occupy positive topographic forms, such as medium-convex and crest ones, located in the denudation zones of water and lithodynamic flows. Slopes with spruce-fir forests have larger catchment areas of liquid and solid substances, higher flow intensity index and topographic humidity in comparison with the oak forests.

Keywords: regularities of forest distribution, relief, temperature and moisture content of soil, morphometric parameters

REFERENCES

- Alekseev A.S., Nikiforov A.A. Vliyaniye rel'yefa na strukturu i produktivnost' lesnykh landshaftov s primeneni- em 3D-modelirovaniya na primere Lisinskogo uchebno- opytnogo leskhoza [Surficial topography controls of the structure and productivity of forest landscapes: analysis with 3D-modeling based on GIS-technology application (case study of the Lisino experimental forest station)], *Lesovedenie*, 2014, no. 5, p. 42–53. (In Russian)
- Bader M.Y., Ruijten J.J. A topography-based model of forest cover at the alpine treeline in the tropical Andes, *Journal of Biogeography*, 2008, vol. 35, no. 4, p. 711–723, DOI: 10.1111/j.1365-2699.2007.01818.x.
- Belyaeva N.G., Sandlersky R.B., Chernenkova T.V. Land- shaftoobrazuyushchaya rol' rel'yefa v formirovani- i sostava lesov yugo-zapadnoy chasti Moskovskoy oblasti [The landscape-forming role of relief in the formation of the forest composition in the southwestern part of Mos- cow Oblast], *Vestnik St-Peter. Universiteta. Earth Sci- ences*, 2020, no. 65(2), p. 362–376, URL: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.208>. (In Russian)
- Chernen'kova T.V., Morozova O.V., Puzachenko M.Yu. et al. Sostav i struktura lesov yugo-zapadnogo Podmoskov'ya [Composition and structure of the spruce forests of South-west of Moscow Oblast], *Lesovedeniye*, 2015, no. 5, p. 323–338. (In Russian)
- Chernikhovskiy D.M. Avtomaticheskaya klassifikatsiya pov- erkhnosti rel'yefa dlya izucheniya kolichestvennykh i kachestvennykh kharakteristik lesov [Automatic clas- sification of surface topography to the quantitative and qualitative characteristics of forests], *Izvestia Sankt- Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2017, is. 219, p. 74–95, DOI: 10.21266/2079-4304.2017.219.74-95. (In Russian)
- Chumin V.T. [Spruce forests. Silvicultural characteristics], *Les Dal'negu Vostoka* [Forests of the Far East], Mos- cow, Lesnaja Promyshlennost' Publ., 1969, p. 94–100. (In Russian)
- Cymek A.A. [Oak forests], *Les Dal'negu Vostoka* [For- ests of the Far East], Moscow, Lesnaja Promyshlennost' Publ., 1969, p. 171–176. (In Russian)
- Dobrovolsky V.V. *Praktikum po geografii pochv s osnova- mi pochvovedeniya* [Soil Geography Tutorial with Soil Science Basics], Moscow, Prosveshchenie Publ., 1982, 127 p. (In Russian)

- Dobrynin A.P. *Dubovye lesa rossijskogo Dal'nego Vostoka (biologija, geografija, proishozhdenie)* [Oak forests of the Russian Far East (biology, geography, origin)], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2000, 260 p. (In Russian)
- Glazovskaya M. A. *Geokhimicheskiye osnovy tipologii i metodiki issledovaniy prirodnykh landshaftov* [Geochemical Foundations of Natural Landscapes Typology and Research Methods], Moscow Univ. Publ., 1964, 230 p. (In Russian)
- Hörsch B. Modeling the spatial distribution of montane and subalpine forests in the Central Alps using digital elevation models, *Ecological modeling*, 2003, vol. 168, no. 3, p. 267–282, DOI: 10.1016/S0304-3800(03)00141-8.
- Karpenko A.S. [Basic patterns of vegetation cover in the lower part of the Amgun' River basin], *Amurskaja tajga (kompleksnye botanicheskie issledovaniya)* [The Amur region taiga (complex botanical investigations)], Nauka Publ., 1969, p. 36–52. (In Russian)
- Kolesnikov B.P. Kedrovye lesa Dal'nego Vostoka [Cedar forests of the Far East], *Trudy dal'nev-go filiala AN SSSR. Ser. botanich.*, 1956, vol. 2(4), 262 p. (In Russian)
- Kolomyts E.G. *Local Mechanisms of Global Changes in Natural Ecosystems*, Moscow, Nauka Publ., 2008, 427 p. (In Russian)
- Kolomyts E.G. Organizatsiya i ustoychivost' khvoyno-lesnykh ekosistem na boreal'nom ekotone Russkoy ravniny [Organization and stability of coniferous-forest ecosystems in the boreal ecotone of the Russian Plain], *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya geograficheskaya*, 1995, no. 3, p. 37–51. (In Russian)
- Krauklis, A.A. *Problemy eksperimental'nogo landshaftovedeniya* [Experimental landscape science challenges], Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 232 p. (In Russian)
- Krivolutsky A.E. [Amur-Primorie territory], *Fiziko-geograficheskoye rayonirovaniye SSSR: kharakteristika regional'nykh yedinit* [Physical-geographical regionalization of the USSR: description of regional units], Moscow Univ. Publ., 1968, p. 503–542. (In Russian)
- Maksimova V.F., Mayorova L.A., Petropavlovskiy B.S. Osnovnye faktory sredey, vliyajushhie na usyhanie pihotovo-elovykh lesov Dal'nego Vostoka [Main environmental factors influencing the drying of the Far East fir-spruce forests], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 1, p. 61–66. (In Russian)
- Man'ko Ju.I. El' ajanskaja i osobennosti ee geograficheskogo rasprostraneniya [Ayanskaya spruce and specific features of its geographical distribution], *Komarovskie chteniya*, 1983, no. 30, p. 3–28. (In Russian)
- Man'ko Ju.I., Gladkova G.A., Butovec G.N. K izucheniju estestvennoj dinamiki pihotovo-elovykh lesov central'nogo Sihotje-Alinja [Studying the fir-spruce forest natural dynamics in the Central Sikhote-Alin], *Vestn. KrasGAU*, 2011, no. 12, p. 120–125. (In Russian)
- Martynenko A.B., Bocharnikov V.N. Ekologicheskoe rajonirovanie Dal'nego Vostoka [Ecological regionalization of the Far East], *Izvestiya RAN, Ser. geogr.*, 2008, no. 2, p. 76–84. (In Russian)
- Petrenko P.S. Monosistemnaja organizatsija lesnykh biogeocenozov na boreal'nom ekotone Nizhnego Priamur'ja [Monosystem organization of forest geosystems on the boreal ecotone in Lower Amur region], *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 2014, vol. 16, no. 1, p. 84–92. (In Russian)
- Petrenko P.S., Kolomyts E.G. Vlijanie geomorfologicheskikh faktorov na organizatsiju lesnykh topogeosistem zapovednika "Komsomol'skij" [The effect of geomorphological factors on the organization of the forest topological geosystems of the Komsomolsky Nature reserve], *Vestn. Voronezh. Gos. un-ta. Ser.: Geogr., Geojekol.*, 2018, no. 2, p. 16–27. (In Russian)
- Pogrebnyak P.S. *Obshcheye lesovodstvo* [General Forestry], Moscow, Kolos Publ., 1968, 440 p. (In Russian)
- Puzachenko M.Yu., Chernenkova T.V. Opredeleniye faktorov prostranstvennogo var'irovaniya rastitel'nogo pokrova s ispol'zovaniyem DDZ, TSMR i polevykh dannykh na primere tsentral'noy chasti Murmanskoy oblasti [Definition of factors of spatial variation in vegetation using RSD, DEM and field data by example of the central part of Murmansk Region], *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2016, vol. 13, no. 5, p. 167–191, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-167-191. (In Russian)
- Rezaei Sangdehi S.M., Fallah A., Oladi J.A., Latifi H. The modeling of some quantitative characteristics forest using topographic features stands (case study: district-3 of Sangdeh forests), *Ecology of Iranian forests*, 2022, vol. 10, no. 19, p. 88–98, DOI: 10.52547/ifej.10.19.88. (In Persian)
- Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E. et al. An assessment of the SRTM topographic products, *Technical Report JPL D-31639*, Pasadena, California, Jet Propulsion Laboratory, 2005, 143 p.
- Seredjuk A.V., Vyvodcev N.V. Duby Dal'nego Vostoka [Oak woods of the Far East], *Uchenye zametki TOGU*, 2016, vol. 7, no. 4, p. 427–435. (In Russian)
- Sharaya L.S., Sharyi P.A. Izuchenie prostranstvennoj organizatsii lesnykh jekosistem s pomoshh'ju metodov geomorfometrii [Geomorphometric study of the spatial organization of forest ecosystems], *Ekologiya*, 2011, no. 1, p. 3–10. (In Russian)
- Sharaya L.S., Van P.S. Regular changes in soil moisture content in coniferous forests of the Udyl' State Nature Reserve, Lower Amur River Region, *Contemp. Probl. Ecol.*, 2022, vol. 15, no. 7, p. 863–871, DOI: 10.1134/s1995425522070198.
- Sharaya L.S., Van P.S. Zakonomernye izmeneniya temperatur pochvy na territorii zakaznika "Udyl'" (Nizhnee Priamur'e) [Regular changes in soil temperatures on the territory of the Udyl' Wildlife Reserve (Lower Amur Region)], *Geografija i prirodnye resursy*, 2021, vol. 42, no. 2(166), p. 51–58, DOI: 10.15372/GIPR20210206. (In Russian)
- Shary P.A., Pinskii D.L. Statistical evaluation of the relationships between spatial variability in the organic carbon content in gray forest soils, soil density, concentrations of heavy metals, and topography, *Eurasian Soil Science*, 2013, vol. 46, no 11, p. 1076–1087
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma*, 2002, vol. 107, p. 1–32.
- Shary P.A., Smirnov N.S. Mehanizmy vlijaniya solnechnoj radiatsii i anizotropii mestnosti na rastitel'nost' temnohojnykh lesov Pechoro-Ilychskogo zapovednika [Mechanisms of the effects of solar radiation and terrain anisotropy on the vegetation of dark conifer forests in the Pechora-Ilych state biosphere reserve], *Ekologiya*, 2013, vol. 44, no. 1, p. 9–17. (In Russian)
- Shlotgaujer S.D. Reliktovye cherty lesnoj rastitel'nosti nacional'nogo parka "Anjujskij" (Habarovskij kraj) [Relic

- features of forest vegetation in the Anyuisky National Park (Khabarovsk territory)], *Regional'nye problemy*, 2016, vol. 19, no. 3, p. 38–48. (In Russian)
- Sochava V.B. *Uchenie o geosistemah* [The doctrine of geosystems], Novosibirsk, Nauka Publ., 1975, 39 p. (In Russian)
- Sokolova G.G. Vliyaniye vysoty mestnosti, ekspozitsii i krutizny sklona na osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya rasteniy [The influence of terrain altitude, slope exposure and slope degree on plant spatial distribution], *Acta Biologica Sibirica*, 2016, vol. 2, no. 3, p. 34–45, URL: <https://doi.org/10.14258/abs.v2i3.1453>. (In Russian)
- Sysuyev V.V., Sharyy P.A. Vydeleniye tipov usloviy mesto-proizrastaniya dlya lesoustroystva po uchastkovomu metodu [Identification of the types of habitat conditions for forest management using the site method], *Lesovedeniye*, 2000, no. 5, p. 10–19. (In Russian)
- Ukrainskiy P., Terekhin E., Lisetskii F. et al. The influence of relief on the density of light-forest trees within the Small-Dry-Valley network of uplands in the forest-steppe zone of Eastern Europe, *Geosciences*, 2020, vol. 10, no. 11, p. 1–18, DOI: 10.3390/geosciences10110420.
- Urusov V.M., Lobanova I.I., Varchenko L.I. *Hvojnye rossijskogo Dal'nego Vostoka – cennye obekty izuchenija, oh-rany, razvedeniya i ispol'zovaniya* [Conifers of the Russian Far East – important objects of study, conservation, growing and use], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2007, 440 p. (In Russian)
- Van P.S. Organizatsiya lesnykh geosistem Nizhnego Priamur'ya na primere zapovednika “Komsomol'skiy” [Organization of forest geosystems in the Lower Amur region by example of the Komsomol'sky Nature Reserve], *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2024, no. 1, p. 3–19, URL: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-1-3-19>. (In Russian)
- Van P.S., Silaev A.V., Van G.V. Rastitel'nost' federal'nogo zakaznika “Udyl” (Nizhnee Priamur'e) [Vegetation of the Udyl' Federal Nature Reserve (Lower Priamurie)], *Vestn. Voronezh. gos-go un-ta, Ser.: Geogr. Geojekol.*, 2021, no. 3, p. 69–78, DOI: 10.17308/geo.2021.3/3603. (In Russian)
- Volkov E.V. Pihtovo-elovye lesa v nizhnej chasti bassejna r. Bureja [Fir-spruce forests in the lower part of the Bureya river basin], *Vestn. KrasGAU*, 2015, no. 5, p. 190–196. (In Russian)
- Wood J. Overview of software packages used in geomorphometry, *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, Amsterdam, etc., Elsevier, 2009, vol. 33, ch. 10, p. 257–267, URL: [doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00010-X).
- Zhang L., Liu S., Sun P. et al. Using DEM to predict *Abies faxoniana* and *Quercus aquifolioides* distributions in the upstream catchment basin of the Min River in southwest China, *Ecological indicators*, 2016, vol. 69, p. 91–99, DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.04.008.
- Zirlewagen D., Raben G., Weise M. Zoning of forest health conditions based on a set of soil, topographic and vegetation parameters, *Forest Ecology and Management*, 2007, vol. 248, p. 43–55.

Received 12.02.2024

Revised 21.09.2024

Accepted 26.11.2024

СУБРЕЦЕНТНЫЕ СПОРОВО-ПЫЛЬЦЕВЫЕ СПЕКТРЫ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР КУРГАЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА (БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ)

Т.Ю. Газизова¹, А.Г. Русанов², Т.В. Сапелко³, А.Е. Лапенков⁴

¹⁻⁴ Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН

¹ Лаборатория географии и гидрологии, мл. науч. сотр.; e-mail: tssml@bk.ru

² Лаборатория гидробиологии, ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: a_rusanov@yahoo.com

³ Лаборатория географии и гидрологии, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: tsapelko@mail.ru

⁴ Лаборатория географии и гидрологии, мл. науч. сотр.; e-mail: lapa13art@gmail.com

Приводятся результаты изучения субрецентных спорово-пыльцевых спектров (СПС) и современной водной растительности озер Липовское и Белое на Кургальском полуострове в Балтийском море. В 2023 г. на озерах впервые были начаты палеолимнологические исследования, важная роль в которых отводится пыльце водных растений. В связи с этим появилась необходимость оценить, насколько точно СПС отражают современную водную растительность, и подготовить основу для интерпретации палеогеографических данных по колонкам донных отложений озер. Отбор поверхностных проб для палинологического анализа проводился летом 2019 г., зимой и летом 2023 г., что позволило охватить большой период накопления пыльцы и спор макрофитов. За время исследований в СПС оз. Липовского отмечена пыльца *Alisma* sp., *Myriophyllum* sp., *Nuphar lutea*, *Potamogeton* sp., *Typha latifolia* и споры *Isoëtes* sp. В СПС оз. Белого встречена пыльца *Myriophyllum* sp., *Nuphar lutea*, *Typha latifolia* и споры *Isoëtes* sp. В ходе флористических исследований установлено, что в оз. Липовском доминируют погруженные гидрофиты и гелофиты с преобладанием *Potamogeton perfoliatus*, *P. pectinatus*, *Batrachium marinum*, *Najas marina*, *Myriophyllum sibiricum* и *Phragmites australis*. В оз. Белом развиты сообщества погруженных гидрофитов с преобладанием зарослей *Lobelia dortmanna*. В СПС оз. Липовского отмечена пыльца двух преобладающих таксонов (*Myriophyllum* sp. и *Potamogeton* sp.). В СПС оз. Белого не отражено присутствие основного доминанта, *Lobelia dortmanna*, но встречена пыльца и споры видов-содоминантов, *Myriophyllum* sp. и *Isoëtes* sp. Данные палинологических и флористических исследований дополняют и уточняют друг друга. В целом, состав водной растительности озер на Кургальском полуострове в поверхностных пробах отражен лишь частично. Полученные результаты позволяют более корректно интерпретировать данные спорово-пыльцевого анализа колонок донных отложений озер, а также внести вклад в региональную базу данных по субрецентным СПС.

Ключевые слова: макрофиты, спорово-пыльцевой анализ, донные отложения озер, поверхностные пробы

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.12

ВВЕДЕНИЕ

Лимнологические работы на Кургальском полуострове начаты Институтом озероведения РАН в 2019 г.; в 2023 г. они продолжились, а также были впервые проведены палеолимнологические исследования с целью реконструировать голоценовую историю двух озер – Липовского и Белого. Основным источником информации для палеоэкологических реконструкций изменения состояния водоемов и окружающей среды являются колонки донных отложений озер, изученные методом палинологического анализа. Чтобы определить, насколько точны полученные данные о растительности в прошлом, в подобных исследованиях необходимо оценить, насколько адекватно субрецентные спорово-пыльцевые спектры (СПС) из озерных осадков отражают современную расти-

тельность. Значимость изучения субрецентных СПС неоднократно была доказана в работах классиков и современных палинологов [Гричук, За-клинская, 1948; Кабайлене, 1969; Чернова и др., 2006; Благовещенская, 2016; Носова, 2020; Новенко и др., 2017; Газизова и др., 2023; Дюжова, 2024]. Особенно это важно для пыльцы и спор водных растений, которые хуже сохраняются и реже встречаются в озерных отложениях, а следовательно, меньше используются в палеореконструкциях в сравнении с пыльцой наземных растений.

Целью настоящего исследования является изучение видового состава водной растительности в поверхностных пробах озерных отложений и выявление взаимосвязей между составом СПС и современной растительностью, в частности, макрофитами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кургальский полуостров находится в южной части Финского залива Балтийского моря на территории Ленинградской области (рис. 1). Изучаемые озера являются уникальными для северо-запада России природными объектами. Озеро Белое (площадь 3,2 км², максимальная глубина 13,1 м) находится на абсолютной высоте 23 м над уровнем моря; это полностью

изолированный бессточный ультра-олиготрофный водоем. Озеро Липовское (площадь 5,3 км², максимальная глубина 16,9 м) является мезотрофным и относится к категории соленых [Сапелко и др., 2023], средняя соленость составляет 3,8 г/л [Станиславская и др., 2021]. Водоем до сих пор связан с Балтийским морем узкой искусственной протокой и находится на абсолютной высоте 0 м над уровнем моря.



Рис. 1. Точки отбора поверхностных проб на озерах Кургальского полуострова

Fig. 1. The location of surface sampling points for the lakes of the Kurgalsky Peninsula

В рамках настоящего исследования детальное изучение современной наземной растительности не проводилось; общая информация об окружающих изучаемые озера сообществах получена из литературных источников [Глазкова и др., 2018; 2019; Дорошина и др., 2019]. На Кургальском полуострове распространены типичные для подзоны южной тайги сосновые и еловые леса с примесью березы, черной ольхи, осины, лещины, рябины. Также встречаются смешанные и мелколиственные леса (березняки на местах вырубок, черноольшанники, осинники). На северо-западе полуострова произрастают редкие для Ленинградской области широколиственные леса из липы, вяза, клена, ясеня, дуба. В подлеске растет можжевельник обыкновенный, жимолость обыкновенная; по берегам озер – заросли ив. Под пологом леса доминируют чернично-зеленомошные сообщества, реже встречаются чернично-сфагновые, чернично-разнотравные, чернично-кисличные, травяно-сфагновые, брусничные, папоротниковые и разнотравные сообщества. Преобладающими видами в различных типах леса на Кургальском полуострове являются *Vaccinium*

myrtilus L., *Oxalis acetosella* L., *Actaea spicata* L., *Dryopteris expansa* (C. Presl) Fras.-Jenk. et Jermy, *Paris quadrifolia* L., *Stellaria nemorum* L., *Viola riviniana* Reichenb., *Hepatica nobilis* Mill., *Milium effusum* L., *Lathyrus vernus* (L.) Bernh., *Chrysosplenium alternifolium* L., *Athyrium filix-femina* (L.) Roth, *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, *Vaccinium vitis-idaea* L. и др. На болотах и заболоченных территориях полуострова произрастают осоковые сообщества (*Carex vesicaria* L., *C. dioica* L., *C. limosa* L., *C. rostrata* Stokes), *Equisetum fluviatile* L., *Calla palustris* L., *Caltha palustris* L., *Comarum palustre* L., *Menyanthes trifoliata* L., *Eriophorum angustifolium* L., *Drosera intermedia* Hayne, бриевые мхи (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Polytrichum commune* Hedw., *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwägr.), сфагновые мхи (*Sphagnum fuscum* Schimp.) и др.

Для изучения состава СПС проводился отбор поверхностных проб донных отложений изучаемых озер с использованием лота Воронкова в рамках многолетних полевых лимнологических работ Института озероведения РАН (см. рис. 1): в 2019 г. – однократно в ходе летней экспедиции, в

2023 г. – в зимний и летний периоды. Обработка и подготовка проб для палинологического анализа осуществлялась на базе Института озероведения РАН по модифицированной сепарационной методике В.П. Гричука [Гричук, Заклинская, 1948] с применением тяжелой жидкости удельным весом 2,28 г/см³. Для идентификации палиноморф использовались определители [Куприянова, Алешина, 1967, 1972, 1978], электронные палинологические базы данных [PalDat, 2024; Сибирская..., 2023] и авторская коллекция пыльцы водных растений. Для каждого образца подсчитывалось статистически значимое количество пыльцы – не менее 250 зерен древесных растений. Процентное содержание каждого таксона рассчитывалось от общего числа древесных, травянистых и споровых растений. Построение спорово-пыльцевых диаграмм производилось с использованием программ Tilia, TiliaGraph, TGView [Grimm, 1999, 2004].

Изучение видового состава и пространственного распределения макрофитов озер проводилось летом 2023 г. в период максимального развития высшей водной растительности (начало августа) при помощи стандартного метода картирования фитолисторали [Катанская, 1981; Kolada et al., 2009]. Полученные во время картирования схемы пространственного распределения водных растений стали основой для подсчета площадей зарастания экологических групп макрофитов и общей площади покрытия озер макрофитами в среде ArcView GIS 3.2 [Карякин и др., 2009]. Изучение глубины распространения водной растительности осуществлялось в рамках водолазных работ летом 2023 г. путем заложения трансект протяженностью 48–60 м с частотой точек описания 2 м [Русанов и др., 2024].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам палинологического анализа поверхностных проб донных отложений озер Кургальского полуострова построены диаграммы (рис. 2, 3), отражающие состав водной и наземной растительности. На круговых диаграммах (рис. 4) представлены данные по древесным, травянистым и спорным растениям на Кургальском полуострове в целом, отражающие состав актуальной наземной растительности: доминирование сосновых и еловых лесов, значительную роль березняков и березы в составе хвойных лесов, присутствие мелколиственных (черная ольха, лещина, ивы) и широколиственных (липа, вяз, дуб) пород. В составе травяно-кустарничкового яруса преобладает пыльца злаковых растений (41% от всей пыльцы трав), среди которых существенную долю составляет пыльца *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; данный вид образует

густые заросли по берегам озер Липовского и Белого. Также в СПС отмечена пыльца *Vaccinium* sp., *Carex* sp., Ericaceae, Polygonaceae и других представителей разнотравья, произрастающих в лесных и болотных сообществах на Кургальском полуострове. Среди споровых растений доминируют сфагновые и бриевые мхи, виды которых произрастают на заболоченных участках.

Водная растительность озера Липовского. По результатам изучения современной водной растительности в оз. Липовском произрастает 17 видов макрофитов [Русанов и др., 2024]: девять погруженных гидрофитов (*Nitella* sp., *Batrachium marinum* Fries, *Ceratophyllum demersum* L., *Elodea canadensis* Michx., *Myriophyllum alterniflorum* DC., *M. sibiricum* Kom., *Najas marina* L., *Potamogeton pectinatus* L., *P. perfoliatus* L.), один плавающий гидрофит (*Nuphar lutea* (L.) Smith), один гидрофит (*Ranunculus reptans* L.) и шесть гелофитов (*Alisma gramineum* Lej., *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla, *Carex acuta* L., *Phragmites australis*, *Scirpus lacustris* L., *Typha latifolia* L.).

Занятая макрофитами площадь в оз. Липовском составляет 73 га (12,9% от общей площади озера) (табл. 1) [Русанов и др., 2024]. Среди них преобладают погруженные гидрофиты (63,1%) и гелофиты (36,4%); плавающие гидрофиты занимают менее 1% от общей площади зарастания. Берега озера заняты зарослями *Phragmites australis*. Заросли погруженной растительности сложены преимущественно *Potamogeton perfoliatus*, *P. pectinatus*, *Batrachium marinum*, *Najas marina* и *Myriophyllum sibiricum*.

По результатам палинологического анализа (рис. 5) в СПС оз. Липовского нет определенного доминанта среди водных растений. Содержание и видовое разнообразие пыльцы и спор макрофитов в СПС в пробах каждого периода в целом низкое, поэтому материалы за несколько лет отбора проб позволили получить более подробные данные. За время исследований в поверхностных пробах оз. Липовского была встречена пыльца *Alisma* sp., *Myriophyllum* sp., *Nuphar lutea*, *Potamogeton* sp., *Typha latifolia* и споры *Isoetes* sp. Состав озерной растительности отражен довольно слабо. СПС отражают наличие доминантных таксонов (*Myriophyllum* и *Potamogeton*), однако их присутствие ограничивается в основном единичными пыльцевыми зернами, что не дает возможности говорить о занимаемых площадях в зарастании озера. Встречена пыльца гелофитов, *Typha latifolia* и *Alisma gramineum*, участвующих в зарастании берегов. Единично отмечена пыльца плавающего гидрофита *Nuphar lutea*, занимающего небольшие по площади участки озера. Также единично встречена спора *Isoetes* sp., не обнаруженного при описании современной водной растительности.

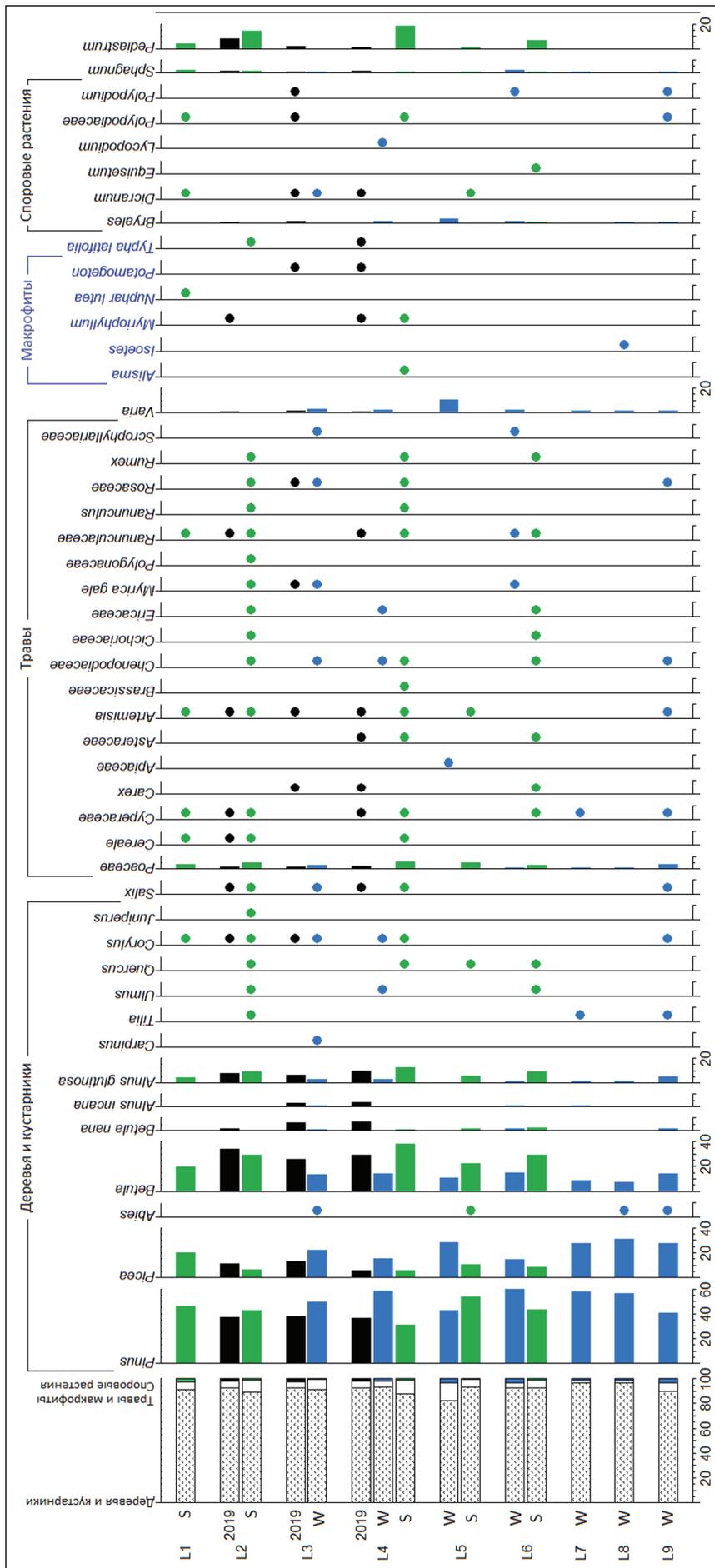


Рис. 2. Спорово-пыльцевая диаграмма поверхностных проб донных отложений оз. Липовского в 2019 и 2023 гг. Периоды 2023 г.: W – зимний; S – летний

Fig. 2. Pollen diagram of surface samples of the Lake Lipovskoye bottom sediments in 2019 and 2023: W – winter period of 2023; S – summer period of 2023

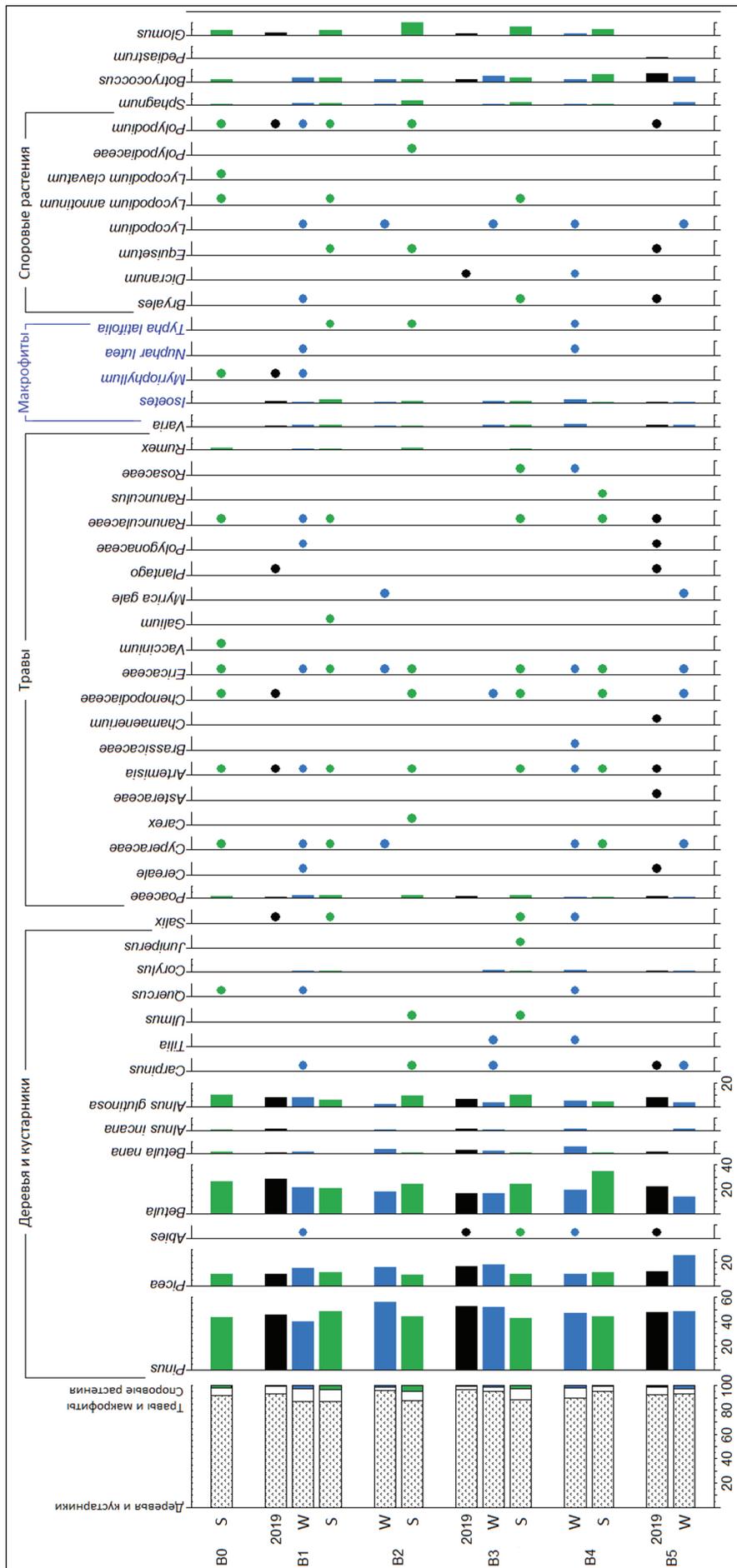


Рис. 3. Спорно-пыльцевая диаграмма поверхностных проб донных отложений оз. Белого в 2019 и 2023 гг. Периоды 2023 г.: W – зимний; S – летний

Fig. 3. Pollen diagram of surface samples of the Lake Beloye bottom sediments in 2019 and 2023: W – winter period of 2023; S – summer period of 2023

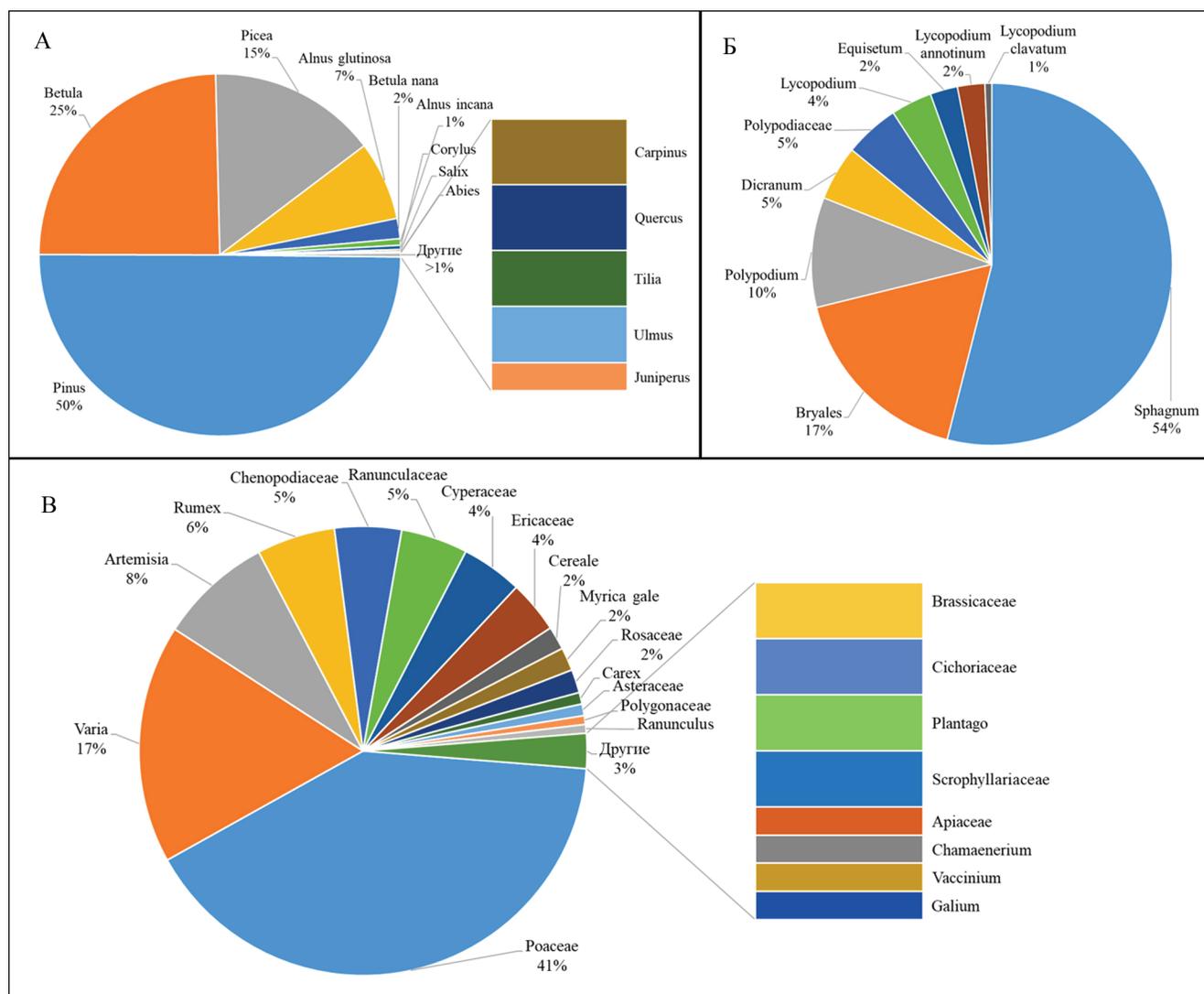


Рис. 4. Осредненное соотношение пыльцы древесных (А), споровых (Б) и травянистых (В) растений в поверхностных пробах донных отложений озер на Кургальском полуострове

Fig 4. The average ratio of pollen of trees (A), spore (B) and herbaceous (B) plants in surface samples of bottom sediments of the Kurgalsky Peninsula lakes

Таблица 1

Вклад экологических групп макрофитов в общую площадь зарастания оз. Липовского

Экологическая группа	Площадь, га	Заросли, % от общей площади	Заросли, % от площади водоема
Гелофиты	26,6	36,4	4,7
Плавающие гидрофиты	0,4	0,5	0,1
Погруженные гидрофиты	46	63,1	8,1
Общая площадь	73	100	12,9

Водная растительность озера Белого. В оз. Белом по данным изучения современной водной растительности произрастает 19 видов макрофитов [Русанов и др., 2024]: шесть погруженных гидрофитов (*Nitella* sp., *Isoetes echinospora* Durieu, *I. lacustris* L., *Littorella uniflora* (L.) Aschers., *Lobelia dortmanna* L. и *Myriophyllum alterniflorum*), один плавающий ги-

дрофит (*Nuphar lutea*), четыре гидрофита (*Eleocharis acicularis* (L.) Roem., *E. palustris* (L.) Roem. et Schult., *Juncus supinus* Moench, *Ranunculus reptans*) и восемь гелофитов (*Carex acuta*, *Equisetum fluviatile* L., *Glyceria maxima* (C. Hartm.) Holmb., *Phragmites australis*, *Sagittaria sagittifolia* L., *Scirpus lacustris*, *Sparganium angustifolium* Michx. и *Typha latifolia*).

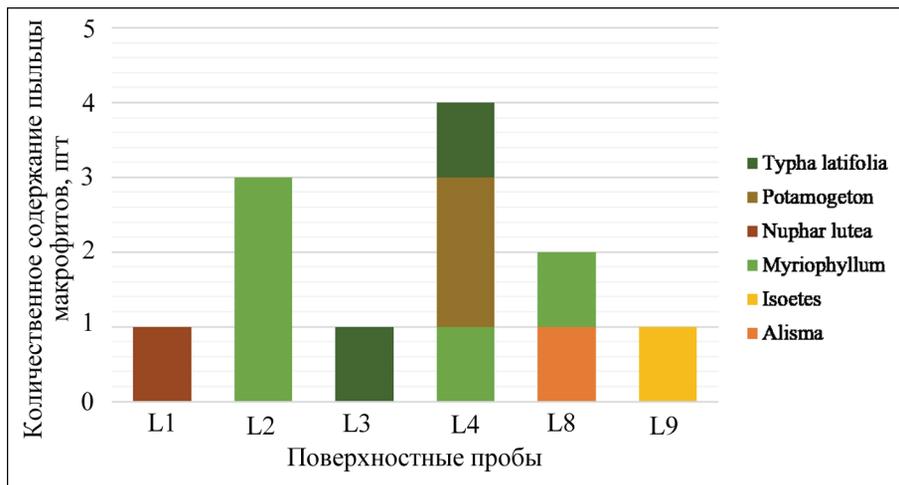


Рис. 5. Соотношение пыльцы макрофитов в поверхностных пробах донных отложений оз. Липовского

Fig. 5. Ratio of macrophyte pollen in surface samples of the Lake Lipovskoye bottom sediments

Макрофиты в оз. Белом занимают площадь 90,1 га (27,5% от общей площади озера) (табл. 2) [Русанов и др., 2024]. Преобладают погруженные гидрофиты (79,6%), гелофиты занимают 20,1% от общей площади зарослей; роль плавающих гидрофитов крайне мала (0,3%). Песчаные мелководья до глубины 2 м заняты развитыми сообществами *Lobelia dortmanna*, среди которых произрастают *Littorella uniflora*, *Myriophyllum alterniflorum*, *Eleocharis acicularis* и *Ranunculus reptans*. Берега и мелководья заняты зарослями *Phragmites australis*.

По результатам палинологического анализа (рис. 6) доминантным видом в СПС оз. Белого является *Isoetes* sp. Видовое разнообразие макрофитов невысокое, однако общее содержание пыльцы и спор в пробах значительно выше, чем в оз. Липовском. За время исследований в донных отложениях оз. Белого отмечена пыльца *Myriophyllum* sp., *Nuphar lutea*, *Typha latifolia* и споры *Isoetes* sp.

СПС не отражают присутствие основного доминанта среди современной водной растительности, *Lobelia dortmanna*, занимающего значительные площади в погруженном ярусе водной растительности озера; причины этого будут рассмотрены ниже. Однако споры видов-содоминантов, *Isoetes echinospora* и *I. lacustris*, встречаются в большом количестве на протяжении всего периода исследований. Пыльца *Myriophyllum* sp. отмечена в поверхностных пробах 2023 г., отобранных в северо-восточной части озера (B0 и B1, см. рис. 1); во время проведения флористических исследований в районе отбора данных проб среди лобелиевых сообществ была встречена уруть (*Myriophyllum alterniflorum*). Единично встречена пыльца плавающего гидрофита *Nuphar lutea*, играющего невысокую роль в зарастании озера. Пыльца гелофита *Typha latifolia* единично встретилась в пробах разных периодов исследований.

Таблица 2

Вклад экологических групп макрофитов в общую площадь зарастания оз. Белого

Экологическая группа	Площадь, га	Заросли, % от общей площади	Заросли, % от площади водоема
Гелофиты	18,1	20,1	5,5
Плавающие гидрофиты	0,3	0,3	0,1
Погруженные гидрофиты	71,7	79,6	21,9
Общая площадь	90,1	100	27,5

Результаты сравнения флористических и палинологических исследований неоднозначны. В субрецентных СПС оз. Липовского частично отражены таксоны, преобладающие среди погруженной растительности (*Myriophyllum* sp., *Potamogeton* sp.), принимающие участие в зарастании

берегов (*Alisma* sp., *Typha latifolia*) и единственный вид-гидрофит (*Nuphar lutea*). Пыльца некоторых гелофитов, в частности доминантов (*Phragmites australis*), с высокой вероятностью представлена в отложениях, но ее затруднительно идентифицировать среди морфологически сходных пыльцевых

зерен семейства Poaceae. Количественное содержание пыльцы и спор водных растений в оз. Липовском невелико, что ограничивает представления о занятых макрофитами площадях. Продуктивность пыльцы и спор в оз. Белом заметно выше, в частности в пробах высокое содержание спор *Isoetes* sp. СПС оз. Белого не отражают присутствие основного доминанта – *Lobelia dortmanna*. Это может быть объяснено в целом низкой пыльцевой продуктивностью *Lobelia dortmanna* в озерных отложениях, поскольку она опыляется насекомыми [Podbielkowski, Tomaszewicz, 1979]. Кроме того,

при недостатке опылителей растения данного вида могут прибегать к клейстогамии, когда опыление происходит внутри нераскрывшегося цветка [Жизнь растений, 1981], что существенно снижает встречаемость пыльцы в донных осадках. Как показывают исследования, более удачным индикатором присутствия *Lobelia dortmanna* в озерных экосистемах являются ее семена [Lamentowicz, Milecka, 2004]. При этом в отложениях встречена пыльца и споры видов-содоминантов *Myriophyllum* и *Isoetes*, произрастающих среди лобелиевых зарослей.

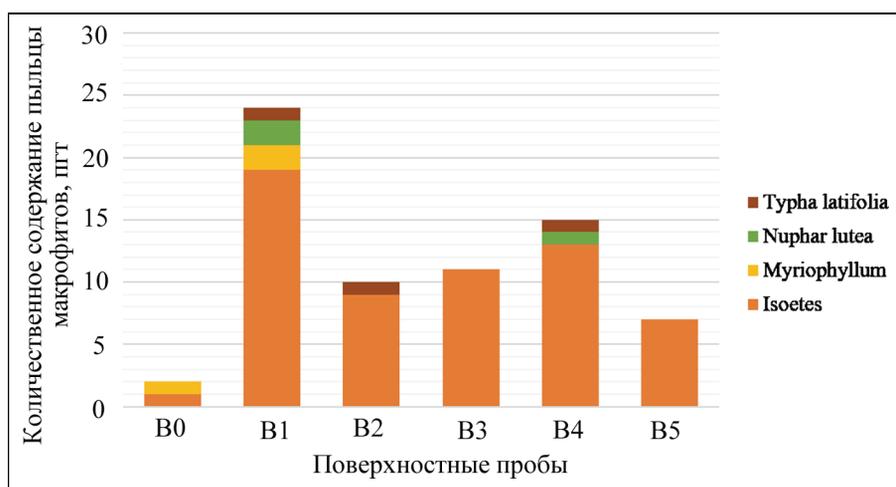


Рис. 6. Соотношение пыльцы макрофитов в поверхностных пробах донных отложений оз. Белого

Fig. 6. Ratio of macrophyte pollen in surface samples of the Lake Beloye bottom sediments

Результаты проведенных исследований дополняют и уточняют друг друга. Данные флористических исследований позволили установить видовую принадлежность некоторых таксонов пыльцы и спор макрофитов в озерах на Кургальском полуострове (*Alisma gramineum*, *Isoetes echinospora*, *I. lacustris*, *Myriophyllum alterniflorum*, *M. sibiricum*, *Potamogeton pectinatus*, *P. perfoliatus*), что в дальнейшем будет использовано для палеореконов озерной растительности по колонкам донных отложений. Палинологические данные уточнили состав современной водной растительности – присутствие *Isoetes* sp. в оз. Липовском.

Использование пыльцы водных растений в палеолимнологических исследованиях ограничивается более низкой продуктивностью и сохранностью пыльцы макрофитов в сравнении с пыльцой большинства наземных растений или макроостатками водных растений. Роль пыльцы наземной растительности в интерпретации палеогеографических данных, как указывалось выше, доказана неоднократно. Особенности распространения и отражения

в СПС, например, пыльцы *Pinus* sp. и других древесных пород [Елина и др., 1994; Филимонова, 2005; 2021] хорошо изучены палинологами. Работы по изучению растительных макроостатков, в том числе макрофитов, в реконструкциях [Gałka et al., 2012, 2014; Gałka, Szncl, 2013] также занимают важное место среди палеогеографических исследований. Исследований, направленных на изучение пыльцы макрофитов и их индикаторной роли, в настоящее время немного [Газизова и др., 2023], что делает полученные результаты особенно значимыми для понимания возможностей использования пыльцы макрофитов и особенностей отражения актуальной водной растительности в донных отложениях.

Кроме того, макрофиты являются хорошими биоиндикаторами содержания органических веществ в воде. В связи с этим нами была предпринята попытка оценить сапробность изучаемых озер с помощью индикаторного значения видов макрофитов [Садчиков, Кудряшов, 2005], пыльца и споры которых была встречена при палинологическом анализе. Обитающие в оз. Липовском

Nuphar lutea и виды *Myriophyllum* и *Potamogeton*, уточненные по данным полевых флористических исследований, относятся к β -мезосапробам, а виды *Isoëtes* – к олигосапробам. В отложениях оз. Белого значительно преобладают споры видов *Isoëtes*. Это позволяет предположить, что оз. Липовского является β -мезосапробным водоемом, а оз. Белое – олигосапробным. Для β -мезосапробных озер характерно слабое органическое загрязнение, высокое содержание кислорода и богатый видовой состав водной растительности. Олигосапробные водоемы характеризуются чистой, богатой кислородом водой и бедным видовым составом макрофитов. Полученные результаты соотносятся с актуальными лимническими характеристиками озер на Кургальском полуострове.

ВЫВОДЫ

В ходе исследований на Кургальском полуострове изучена современная водная растительность озер Липовское и Белое, а также ее отражение в поверхностных пробах донных отложений.

В оз. Липовском доминируют погруженные гидрофиты и гелофиты с преобладанием *Potamogeton perfoliatus*, *P. pectinatus*, *Batrachium marinum*, *Najas marina*, *Myriophyllum sibiricum* и *Phragmites*

australis. В СПС озера отмечена пыльца *Alisma* sp., *Myriophyllum* sp., *Potamogeton* sp., *Nuphar lutea*, *Typha latifolia* и споры *Isoëtes* sp.

В оз. Белом развиты сообщества погруженных гидрофитов с преобладанием зарослей *Lobelia dortmanna*. В СПС озера встречена пыльца *Myriophyllum* sp., *Nuphar lutea*, *Typha latifolia* и споры *Isoëtes* sp.

В целом субрецентные СПС отражают водную растительность озер на Кургальском полуострове частично; видовой состав и обилие экологических групп макрофитов более полно представлены в оз. Липовском.

Данные палинологических и флористических исследований дополняют и уточняют друг друга. Полученные результаты станут основой для интерпретации палеогеографических данных из колонок донных отложений озер на Кургальском полуострове и позволят оценить возможности использования пыльцы водных растений для реконструкций развития водоемов в прошлом. Дальнейшее изучение субрецентных пыльцы и спор макрофитов в различных водоемах будет способствовать уточнению полученных результатов, а также внесет вклад в региональную базу данных по субрецентным СПС.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00128, <https://rscf.ru/project/23-27-00128/>. Авторы благодарят рецензентов за конструктивные замечания и предложения по улучшению рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовецкая Н.В. Особенности интерпретации субфоссильных спорово-пыльцевых спектров Приволжской возвышенности (в целях палеоботанических реконструкций) // Бюл. Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2016. Т. 121. Вып. 5. С. 48–63.
- Газизова Т.Ю., Русанов А.Г., Сапелько Т.В. Оценка сходства видового состава макрофитов современной водной растительности и субрецентных спорово-пыльцевых спектров малых озер на острове Валаам (Ладожское озеро) // Труды КарНЦ РАН. Сер. Лимнология и океанология. 2023. № 6. С. 73–83. DOI: 10.17076/lim1703.
- Глазкова Е.А., Гимельбрант Д.Е., Степанчикова И.С. и др. Ценные ботанические объекты заказника «Кургальский» (Ленинградская область). 1. Редкие и охраняемые виды // Труды КарНЦ РАН. Серия Биогеография. № 8. 2018. С. 37–62.
- Глазкова Е.А., Ликсакова Н.С., Гимельбрант Д.Е. и др. Ценные ботанические объекты заказника «Кургальский» (Ленинградская область). 2. Леса, болота, луга // Труды КарНЦ РАН. Серия Биогеография. № 8. 2019. С. 44–61.
- Гричук В.П., Заклинская Е.Д. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М.: Географгиз, 1948. 224 с.
- Дюжова К.В. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры аллювиальных отложений рек Дон и Кубань и их значение при палеогеографических реконструкциях // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. № 1. С. 48–60. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.4.
- Дорошина Г.Я., Гинзбург Э.Г., Курбатова Л.Е. Мхи государственного природного заказника «Кургальский» (Ленинградская область) // Новости систематики низших растений. 2019. № 53-2. С. 369–384.
- Елина Г.А., Кузнецов О.Л., Девятова Э.И. и др. Современная и голоценовая растительность национального парка «Паанаярви» (северо-западная Карелия) // Ботан. журн. 1994. Т. 79. № 4. С. 13–31.
- Жизнь растений. Цветковые растения. Порядок колокольчиковые (Campanulales) / под ред. А.Л. Тахтаджяна. М.: Просвещение, 1981. Т. 5. Ч. 2. 576 с.
- Кабайлене М.В. Формирование пыльцевых спектров и методы восстановления палеорастительности. Вильнюс: Минтис, 1969. 148 с.
- Карякин И.В., Лапшин Р.Д., Шестакова А.А. ArcView GIS для экологов: инструктивно-методическое пособие. Н. Новгород, 2009. 543 с.
- Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Методы изучения. Л.: Наука, 1981. 187 с.

- Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Палинологическая терминология покрытосеменных растений. Л.: Наука, 1967. 86 с.
- Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца и споры растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука, 1972. Т. 1. 171 с.
- Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца двудольных растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука, 1978. 184 с.
- Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г., Зерницкая В.П. Рецентные спорово-пыльцевые спектры заповедных территорий Европейской части России как ключ к интерпретации результатов палеоэкологических исследований // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2017. Т. 2. № 2. С. 55–65.
- Носова М.Б. Исследования современных пыльцевых спектров: инструменты, подходы, современные направления // Ботанический журнал. 2020. № 12. С. 1147–1168.
- Русанов А.Г., Газизова Т.Ю., Лапенков А.Е. и др. Современное состояние растительности покрова озер Белое и Липовское (Кургальский полуостров) // Труды КарНЦ РАН. Сер. Лимнология и океанология. 2024. № 2. С. 51–64. DOI: 10.17076/lim1864.
- Садчиков А.П., Кудряшов М.А. Гидробиотика: прибрежно-водная растительность. М.: Академия, 2005. 33 с.
- Сапелко Т.В., Русанов А.Г., Игнатъева Н.В. и др. Древняя и современная связь оз. Липовского на Кургальском полуострове с Балтийским морем // XXV Международная научная конференция (Школа) по морской геологии «Геология морей и океанов» (Москва, 13–17 ноября 2023 г.): материалы. М.: ИО РАН, 2023. Т. IV. С. 103–107.
- Станиславская Е.В., Афанасьева А.Л., Павлова О.А. Альгофлора озер заказника «Кургальский» (Ленинградская область) // Поволжский экологический журнал. 2021. № 3. С. 335–347.
- Филимонова Л.В. Динамика растительности среднетаежной подзоны Карелии в позднеледниковье и голоцене (палеоэкологические аспекты): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2005. 24 с.
- Филимонова Л.В. Динамика растительности в заповеднике «Костомукшский» (Россия) и в окружающем регионе на фоне изменения природной среды в голоцене // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2021. Т. 6(1). С. 98–115.
- Чернова Г.М., Денисенков В.П., Ломова Е.И. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры северо-западного Приладожья на примере Ладужской учебно-географической базы // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. 2006. № 1. С. 70–79.
- Galka M., Tobolski K., Kołaczek P. The Holocene decline of slender naiad (*Najas flexilis* (Willd.) Rostk. & W.L.E. Schmidt) in NE Poland in the light of new paleobotanical data, *Acta Palaeobot.*, 2012, vol. 52, p. 127–138.
- Galka M., Tobolski K., Zawisza E. et al. Postglacial history of vegetation, human activity and lake-level changes at Jezioro Linówek in northeast Poland, based on multiproxy data, *Vegetation History and Archaeobotany*, 2014, vol. 23, p. 123–152.
- Galka M., Sznajder M. Late Glacial and Early Holocene development of lakes in northeastern Poland in view of plant macrofossil analyses, *Quaternary International*, 2013, vol. 292, p. 124–135.
- Grimm E. Tilia and TiliaGraph PC spreadsheet and graphics software for pollen data, *Newsletter*, 1999, vol. 4, p. 5–7.
- Grimm E. TGView 2.0.2 (Software), Springfield: Illinois State Museum, Research and Collections Center, 2004.
- Lamentowicz M., Milecka K. Lobelia dortmanna L. seeds in lake sediments from the Tuchola Forest (Pomerania, northern Poland), *Acta Palaeobotanica*, 2004, vol. 44(2), p. 281–285.
- Podbielkowski Z., Tomaszewicz H. Zarzys hydrobotaniki [The outline of hydrobotany], PWN, Warszawa, 1979, 531 p.

Электронные ресурсы

PalDat – Palynological Database, URL: <https://www.paldat.org/> (дата обращения 15.12.2023).

Сибирская палинологическая база данных SibPal / PaleoAltai. URL: <https://www.paleoaltai.com/sibpal> (дата обращения 15.12.2023).

Kolada A., Seppo H., Kanninen A. et al. Deliverable D3.2-1: Overview and comparison of macrophyte survey methods used in European countries and a proposal of harmonized common sampling protocol to be used for WISER uncertainty exercise including a relevant common species list. 2009, URL: <http://www.wiser.eu/download/D3.2-1.pdf> (дата обращения 15.12.2023).

Поступила в редакцию 24.06.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 26.11.2024

SUBRECENT POLLEN SPECTRA IN LAKE SEDIMENTS OF THE KURGALSKY PENINSULA (THE BALTIC SEA)

T.Yu. Gazizova¹, A.G. Rusanov², T.V. Sapelko³, A.E. Lapenkov⁴

¹⁻⁴ Institute of Limnology of the RAS – SP Centre of the RAS

¹ Laboratory of Geography and Hydrology, Junior Scientific Researcher; e-mail: tssml@bk.ru

² Laboratory of Hydrobiology, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: a_rusanov@yahoo.com

³ Laboratory of Geography and Hydrology, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: tsapelko@mail.ru

⁴ Laboratory of Geography and Hydrology, Junior Scientific Researcher; e-mail: lapa13art@gmail.com

The article presents the results of studying subrecent pollen spectra (SPS) and modern aquatic vegetation of the Lipovskoye and Beloye lakes located on the Kurgalsky Peninsula of the Baltic Sea, Russia. In 2023, paleolimnological researches of the lakes were initiated for the first time. An important role was assigned to macrophyte pollen. This led to the need to assess how accurately the subrecent pollen spectra reflect modern vegetation and to prepare a strong basis for paleogeographical data interpretation. Surface samples for pollen analysis, collected during few expeditions in 2019 and 2023, provided the data on short-term dynamics of macrophyte pollen. Pollen of *Alisma sp.*, *Myriophyllum sp.*, *Nuphar lutea*, *Potamogeton sp.*, *Typha latifolia* and spores of *Isoetes sp.* was recorded in the SPS of Lake Lipovskoye. Pollen of *Myriophyllum sp.*, *Nuphar lutea*, *Typha latifolia* and spores of *Isoetes sp.* was noted in the SPS of Lake Beloye. The studies of floristic diversity have revealed the dominance of submerged hydrophytes and helophytes in Lake Lipovskoye (*Potamogeton perfoliatus*, *P. pectinatus*, *Batrachium marinum*, *Najas marina*, *Myriophyllum sibiricum*, and *Phragmites australis*). In Lake Beloye, communities of submerged hydrophytes are developed, dominated by *Lobelia dortmanna*. According to the results of comparing the pollen data and floristic diversity, the species composition of submerged hydrophytes in Lake Lipovskoye and floating hydrophytes in both lakes are well reflected. The helophytes composition is weaker. Pollen of *Lobelia dortmanna* weren't found in sediments of Lake Beloye. Both palynological and floristic studies data complement and clarify each other. Generally, the macrophyte composition of the Kurgalsky Peninsula lakes is partially reflected in surface samples. The obtained results will provide a better interpretation of paleolimnological data and will contribute to the regional database on subrecent pollen spectra.

Keywords: macrophytes, pollen analysis, lake sediments, surface samples

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 23-27-00128, <https://rscf.ru/project/23-27-00128/>). The authors highly appreciate the reviewers' comments and recommendations.

REFERENCES

- Blagoveshchenskaya N.V. Osobennosti interpretatsii subfossil'nykh sporovo-pyl'tsevykh spektrov Privolzhskoi vozvyshennosti (v tselyakh paleobotanicheskikh rekonstruktsii) [Peculiarities of subfossilic spore-pollen spectra interpretation of the Volga upland (for the paleobotanical reconstructions purposes)], *Byul. Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody*, Otdel biologicheskii, 2016, is. 121(5), p. 48–63. (In Russian)
- Chernova G.M., Denisenkov V.P., Lomova E.I. Subrecentnye sporovo-pyl'tsevye spektry severo-zapadnogo Priladozh'ya na primere Ladozhskoi uchebno-geograficheskoi bazy [Subrecent spore-pollen spectra of the northwestern Ladoga region on the example of the Ladoga educational and geographical base], *Vestn. SPbGU*, Ser. 7, 2006, no. 1, p. 70–79. (In Russian)
- Dyuzhova K.B. Subrecentnye sporovo-pyl'tsevye spektry allyuvial'nykh otlozhenii rek Don i Kuban' i ikh znachenie pri paleogeograficheskikh rekonstruktsiyakh [Subrecent pollen assemblages in alluvial deposits of the Don and Kuban rivers and their significance for paleogeographic reconstructions], *Vestn. Mosk. un-ta*, Ser. 5, *Geogr.*, 2024, no. 1, p. 48–60, URL: <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.4>. (In Russian)
- Elina G.A., Kuznetsov O.L., Devyatova E.I. et al. Sovremennaya i golotsenovaya rastitel'nost' natsional'nogo parka "Paanayarvi" (severo-zapadnaya Kareliya) [Modern and Holocene vegetation of the Paanayarvi National Park (Northwestern Karelia)], *Botan. zhurn*, 1994, vol. 79(4), p. 13–31. (In Russian)
- Filimonova L.V. *Dinamika rastitel'nosti srednetazhnoi podzony Karelii v pozdnelednikov'e i golotsene (paleoekologicheskie aspekty)* [Vegetation dynamics of the Karelian Middle Taiga subzone in the Late Glacial and Holocene (paleoecological aspects)], avtoref. dis. ... kan. biol. nauk, Petrozavodsk, 2005, 24 p. (In Russian)
- Filimonova L.V. Dinamika rastitel'nosti v zapovednike "Kostomukshskii" (Rossiya) i v okruzhayushchem regione na fone izmeneniya prirodnoi sredy v golotsene [Vegetation dynamics in the Kostomuksha Nature Reserve (Russia) and surroundings against changes in the natural environment during the Holocene], *Zapovednaya nauka*, 2021, no. 6(1), p. 98–115. (In Russian)
- Galka M., Sznal M. Late Glacial and Early Holocene development of lakes in northeastern Poland in view of plant macrofossil analyses, *Quaternary International*, 2013, vol. 292, p. 124–135.
- Gałka M., Tobolski K., Kołaczek P. The Holocene decline of slender naiad (*Najas flexilis* (Willd.) Rostk. & Schmidt) in NE Poland in the light of new paleobotanical data, *Acta Palaeobot.*, 2012, vol. 52, p. 127–138.
- Gałka M., Tobolski K., Zawisza E., Goslar T. Postglacial history of vegetation, human activity and lake-level changes at Jezioro Linowek in northeast Poland, based on multiproxy data, *Vegetation History and Archaeobotany*, 2014, vol. 23, p. 123–152.
- Gazizova T.Yu., Rusanov A.G., Sapelko T.V. Otsenka skhodstva vidovogo sostava makrofitov sovremennoi vodnoi rastitel'nosti i subrecentnykh sporovo-pyl'tsevykh spektrov malykh ozer na ostrove Valaam (Ladozhskoe ozero) [The similarity assessment of the macrophytes species composition between modern aquatic vegetation and subrecent pollen spectra of small lakes on the Valaam Island (Lake Ladoga)], *Trudy KarNTs RAN, Ser. Limnologiya i okeanologiya*, 2023, no. 6, p. 73–83, DOI: 10.17076/lim1703. (In Russian)
- Glazkova E.A., Gimel'brant D.E., Stepanchikova I.S. et al. Tsennye botanicheskie ob'ekty zakaznika "Kurgal'skii" (Leningradskaya oblast'), 1. Redkie i okhranyaemye vidy [Valuable botanical objects of the Kurgalsky Nature Reserve (Leningrad region), 1. Rare and protected species], *Trudy KarNTs RAN, Ser. Biogeografiya*, 2018, no. 8, p. 37–62. (In Russian)

- Glazkova E.A., Liksakova N.S., Gimel'brant D.E. et al. Tsennye botanicheskie ob'ekty zakaznika "Kurgal'skii" (Leningradskaya oblast'), 2. Lesa, bolota, luga [Valuable botanical objects of the Kurgalsky Nature Reserve (Leningrad region), 2. Forests, swamps, meadows], *Trudy KarNTs RAN, Ser. Biogeografiya*, 2019, no. 8, p. 44–61. (In Russian)
- Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. *Analiz iskopaemykh pyl'tsy i spor i ego primeneniye v paleogeografii* [Analysis of fossil pollen and spores and its application in paleogeography], Moscow, Geografiz Publ., 1948, 224 p. (In Russian)
- Grimm E. *TGView 2.0.2 (Software)*, Springfield: Illinois State Museum, Research and Collections Center, 2004.
- Grimm E. Tilia and TiliaGraph PC spreadsheet and graphics software for pollen data, *Newsletter*, 1999, vol. 4, p. 5–7.
- Kabailene M.V. *Formirovaniye pyl'tsevykh spektrov i metody vosstanovleniya paleorastitel'nosti* [Formation of pollen spectra and methods of paleovegetation restoration], Vil'nyus, Mintis Publ., 1969, 148 p. (In Russian)
- Karyakin I.V., Lapshin R.D., Shestakova A.A. *ArcView GIS dlya ekologov* [ArcView GIS for ecologists], Instrukтивно-metodicheskoe posobie, Nizhnii Novgorod, 2009, 543 p. (In Russian)
- Katanskaya V.M. *Vysshaya vodnaya rastitel'nost' kontinental'nykh vodoemov SSSR* [Higher aquatic vegetation of the USSR continental basins], *Metody izucheniya*, Leningrad, Nauka Publ., 1981, 187 p. (In Russian)
- Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. *Palinologicheskaya terminologiya pokrytosemennykh rastenii* [Palynological terminology of angiosperms], Leningrad, Nauka Publ., 1967, 86 p. (In Russian)
- Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. *Pyl'tsa dvudol'nykh rastenii flory evropeiskoi chasti SSSR* [Pollen of dicotyledonous plants of the flora of the USSR European part], Leningrad, Nauka Publ., 1978, 184 p. (In Russian)
- Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. *Pyl'tsa i spory rastenii flory evropeiskoi chasti SSSR* [Pollen and spores of plants of the flora of the USSR European part], Leningrad, Nauka Publ., 1972, vol. 1, 171 p. (In Russian)
- Lamentowicz M., Milecka K. *Lobelia dortmanna* L. seeds in lake sediments from the Tuchola Forest (Pomerania, northern Poland), *Acta Palaeobotanica*, 2004, vol. 44(2), p. 281–285.
- Nosova M.B. *Issledovaniya sovremennykh pyl'tsevykh spektrov: instrumenty, podkhody, sovremennye napravleniya* [Researches of modern pollen spectra: techniques, approaches, modern areas], *Botanicheskii zhurnal*, 2020, no. 12, p. 1147–1168. (In Russian)
- Novenko E.Yu., Mazei N.G., Zernitskaya V.P. *Retsentnye sporovo-pyl'tsevyye spektry zapovednykh territorii Evropeiskoi chasti Rossii kak klyuch k interpretatsii rezul'tatov paleoekologicheskikh issledovaniy* [Recent spore-pollen spectra of protected areas of the European part of Russia as a key to the interpretation of paleoecological studies results], *Zapovednaya nauka*, 2017, no. 2(2), p. 55–65. (In Russian)
- Podbielkowski Z., Tomaszewicz H. *Zarys hydrobotaniki* [The outline of hydrobotany], PWN, Warszawa, 1979, 531 p.
- Rusanov A.G., Gazizova T.Yu., Lapenkov A.E., Sapelko T.V. *Sovremennoe sostoyaniye rastitel'nosti pokrova ozer Beloe i Lipovskoe (Kurgal'skii poluostrov)* [Current state of vegetation cover of lakes Beloye and Lipovskoye (Kurgalsky Peninsula)], *Trudy KarNTs RAN, Ser. Limnologiya i okeanologiya*, 2024, no. 2, p. 51–64, DOI: 10.17076/lim1864. (In Russian)
- Sadchikov A.P., Kudryashov M.A. *Gidrobotanika: pribrezhno-vodnaya rastitel'nost'* [Hydrobotany: coastal aquatic vegetation], Moscow, Akademiya Publ., 2005, 33 p. (In Russian)
- Sapelko T.V., Rusanov A.G., Ignat'eva N.V. et al. [The ancient and modern connection of Lake Lipovskoye on the Kurgalsky Peninsula with the Baltic Sea], *XXV Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya (Shkola) po morskoi geologii "Geologiya morei i okeanov"* [Geology of seas and oceans] (Moskva, 13–17 noyabrya 2023 g.), materially, Institute Oceanography, Russian Academy of Science Publ., 2023, vol. IV, p. 103–107. (In Russian)
- Stanislavskaya E.V., Afanas'eva A.L., Pavlova O.A. *Al'goflora ozer zakaznika "Kurgal'skii" (Leningradskaya oblast')* [Algoflora of the Kurgalsky Nature Reserve lakes (Leningrad region)], *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*, 2021, no. 3, p. 335–347. (In Russian)
- Zhizn' rastenii. Tsvetkovyye rasteniya. Poryadok kolokol'chikovyye (Campanulales)* [Plant life. Flowering plants. The bellflower order (Campanulales)], A.L. Takhtadzhyan (ed.), Moscow, Prosveshchenie Publ., 1981, vol. 5(2), 576 p. (In Russian)
- Web sources*
- Kolada A., Seppo H., Kanninen A. et al. Deliverable D3.2-1: Overview and comparison of macrophyte survey methods used in European countries and a proposal of harmonized common sampling protocol to be used for WISER uncertainty exercise including a relevant common species list, 2009, URL: <http://www.wiser.eu/download/D3.2-1.pdf> (access date 15.12.2023).
- PalDat – Palynological Database, URL: <https://www.paldat.org/> (дата обращения 15.12.2023).
- Sibirskaya palinologicheskaya baza dannykh (SibPal /Paleo-Altai), URL: <https://www.paleoaltai.com/sibpal> (дата обращения 15.12.2023). (In Russian)

Received 24.06.2024

Revised 10.09.2024

Accepted 26.11.2024

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА КАНОНЕРСКОГО ОСТРОВА

М.А. Чукаева¹, А.А. Кошенкова², Н.А. Малыгин³, Д.Д. Борисова⁴, Д.Ф. Анамов⁵

¹⁻⁴ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

⁵ ООО «ЦветМетИнжиниринг», отдел экологического сопровождения проектов

¹ Лаборатория моделирования экологической обстановки; ст. науч. сотр., канд. техн. наук; e-mail: shellx@bk.ru

² Образовательный центр цифровых технологий; инженер; e-mail: koshenkova2000@mail.ru

³ Горный факультет, кафедра геоэкологии; магистрант; e-mail: nik.redapple.malygin@mail.ru

⁴ Горный факультет, кафедра геоэкологии; аспирант; e-mail: dashbo2000@gmail.com

⁵ Инженер первой категории; e-mail: danyar.anamov@yandex.ru

Авторами проведена оценка загрязнения тяжелыми металлами (Cd, Cu, Ni, Pb и Zn) почвенно-растительного покрова Канонерского острова г. Санкт-Петербурга. В ходе рекогносцировки определено, что Западный скоростной диаметр (ЗСД) – значимый источник загрязнения, а территория острова поделена на четыре зоны в соответствии с их функциональным назначением и ветровым режимом: рекреационную, переходную, наветренную и подветренную относительно магистральной дороги. Основными загрязнителями почвенного покрова установлены Pb и Zn с концентрациями, варьирующимися в пределах 5–376 и 16–1131 мг/кг – для подвижных форм, 46–1179 и 64–2903 мг/кг – для валового содержания соответственно. Наибольшая кратность превышения ПДК по подвижным формам металлов установлена для Pb (63 в переходной зоне) и Zn (50 с наветренной стороны ЗСД). Коэффициент суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами составил от 2 до 104 по подвижным формам и от 5 до 55 по валовому содержанию. Максимальные значения установлены в переходной и наветренной зонах, поэтому почвы данных территорий попадают под категорию умеренно загрязненных. Наибольшей подвижностью среди рассмотренных тяжелых металлов на острове обладает Pb (29% – средняя доля его подвижных форм), наименьшей – Ni (4%). При этом их накопление растениями растет в ряду Pb < Cd < Ni < Cu < Zn. Самые высокие значения зафиксированы по Zn и Cu в листьях древесных растений с подветренной стороны ЗСД. По общей оценке состояния почвенно-растительного покрова Канонерского острова выявлена умеренная степень загрязнения почв с локализацией с наветренной стороны ЗСД и частично в переходной зоне.

Ключевые слова: городские почвы, растительный покров, тяжелые металлы, коэффициент контрастности, коэффициент суммарного загрязнения, коэффициент биоаккумуляции

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.13

ВВЕДЕНИЕ

Более чем в 30 городах России уровень загрязнения воздуха был высоким на протяжении трех лет из пяти последних [Характеристики уровня..., 2021], в том числе и в Санкт-Петербурге [Dzhevaga, Borisova, 2021]. Среди всех источников поступления поллютантов в атмосферный воздух около 90% здесь приходится на автотранспорт [Отчет..., 2021]. Высокую опасность в структуре выбросов такого типа имеют тяжелые металлы (элементы с атомной массой > 50, начиная с V) [Водяницкий, 2008; Медведева и др., 2019; Дьячкова, 2020]. Особенно уязвим перед аэрогенным загрязнением почвенно-растительный покров из-за буферных свойств почвы. Аккумуляция тяжелых металлов скапливается на почвенном биоразнообразии, снижает запасы гумуса и способствует их последующему накоплению в тканях растений [Касимов, Власов, 2018; Швец, Сидорова, 2018; Алексеенко и др., 2021].

На фоне растущей антропогенной нагрузки на окружающую среду в России актуален вопрос неравномерной развитости мониторинговых сетей [Коршунов и др., 2022; Опекунова и др., 2023]. Анализ отчетов Комитета по природопользованию за последние пять лет показал, что почвенные исследования не охватывали достаточную площадь Санкт-Петербурга. На обширные территории отдельных районов приходится недостаточное количество станций мониторинга, а некоторые из них в целом не затрагиваются исследованиями [Пашкевич и др., 2020].

Одно из таких «белых пятен» – Канонерский остров, где на одном посту мониторинга атмосферного воздуха ведется контроль по выбросам пыли общей, PM 2.5 и PM 10, H₂S, O₃, SO₂, NO₂ и CO. При этом территория окружена целым рядом объектов антропогенного воздействия: на севере – Центральной станцией аэрации, а на юге и

юго-востоке – портовой территорией (нефтяным, балкерным и контейнерным терминалами) и промышленной зоной, включающей Юго-Западную ТЭЦ, Судомеханический завод и цеха Кировского завода.

Большая часть исследований, проводимых на Канонерском острове ранее, касалась загрязнения прибрежных территорий морским мусором и микропластиком [Шилин и др., 2020; Голубева, Ершова, 2022]. Результаты показали, что степень загрязнения пляжей острова можно считать высокой, а основным источником поступления веществ является Центральная станция аэрации. Также для территории характерно шумовое загрязнение от Западного скоростного диаметра (далее – ЗСД) [Сарапулова, 2020; Дроздов, Лисовский, 2021].

Цель данного исследования – оценка текущего экологического состояния почвенно-растительного покрова Канонерского острова для выявления возможных источников поступления поллютантов.

Для проведения эколого-геохимической оценки острова среди критериев и показателей качества окружающей среды выбраны: коэффициент контрастности, кларк концентрации, коэффициент контрастности по ПДК, суммарный показатель загрязнения (далее – СПЗ) и коэффициент биоаккумуляции. Их комбинация позволяет учитывать среднее содержание загрязняющих веществ в городах и литосфере для оценки аномальности получаемых концентраций, а также делать выводы не только по итоговому загрязнению, но и по специфике накопления тяжелых металлов в растительности. Перечень изучаемых элементов был выбран исходя из геохимических особенностей городских почв. Для них характерно повышенное в сравнении с кларками содержание As, Cd, Cu, Hg, Pb и Zn и др. [Алексеевко, Алексеевко, 2013; Норова и Николаева, 2020; Мосягина и Мысин, 2022]. Наибольший интерес в качестве неспецифических поллютантов представляла группа металлов Cd, Ni и Pb ввиду ряда факторов [Поляк, Сухаревич, 2020]:

- они обладают высоким токсическим воздействием на живые организмы [Егорова, 2018];
- Cd и Pb относятся к группе ксенобиотиков;
- Ni несмотря на то, что является микроэлементом, необходимым для развития живых организмов, относится ко II классу опасности для почв [Хомич и др., 2019].

Предварительный перечень был расширен Cu и Zn, обнаруженными в значительных количествах по результатам разведочного анализа. Таким образом, к итоговому рассмотрению были приняты Cd, Ni, Pb, Cu и Zn.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на основе анализа почвенных и растительных образцов, отобранных на территории Канонерского острова в сентябре 2022 г. Работа выполнена на базе НЦ «Экосистема» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Полная схема описываемого далее исследования представлена на рис. 1.

Точки опробования устанавливались с учетом природно-климатических условий и рекогносцировки местности, по результатам которой была составлена карта-схема острова, дифференцированная по типам землепользования (рис. 2). Роза ветров, характерная для изучаемой территории, отражает вероятный аэротехногенный перенос загрязняющих веществ по территории острова.

В ходе рекогносцировки было сделано предположение, что эстакада ЗСД – основной источник загрязнения северо-восточной части острова. Исходя из этого, по обе стороны от нее была установлена более частая сеть опробования – по три пробных площадки с подветренной и наветренной стороны с шагом около 100 м. Парковая зона, находящаяся на максимальном удалении от эстакады ЗСД, была выбрана в качестве условно фонового участка.

С учетом видовой идентичности растительности и площади проективного покрытия участков, ограниченной в условиях застройки, практически во всех случаях с каждой пробной площадки отбирались две точечные пробы, из которых затем формировалась объединенная (например, из точечных проб 5' и 5'' была получена объединенная проба 5).

Геохимическое опробование, пробоподготовка и анализ проб почв. Пробы почв отбирались и подготавливались в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017. Отбор точечных проб производился с одного горизонта глубиной 10 см методом «конверта» с площадок 5×5 м. Отобранные пробы высушивались в лаборатории до воздушно-сухого состояния, после чего проводилось их измельчение в ступке, просеивание через сито с диаметром отверстий 1 мм и квартование для получения аналитической пробы.

Определение валовых содержаний и подвижных форм тяжелых металлов проводилось в соответствии с М-МВИ-80-2008. Разложение проб для валового анализа выполнялось в микроволновой системе Multiwave 3000 Anton Paar со смесью соляной, азотной, плавиковой и борной кислот. Подвижные формы извлекались ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH = 4,8 согласно РД 52.18.289-90. Для всех образцов велись две параллельные пробы и холостая с использованием тех же реактивов и материалов.

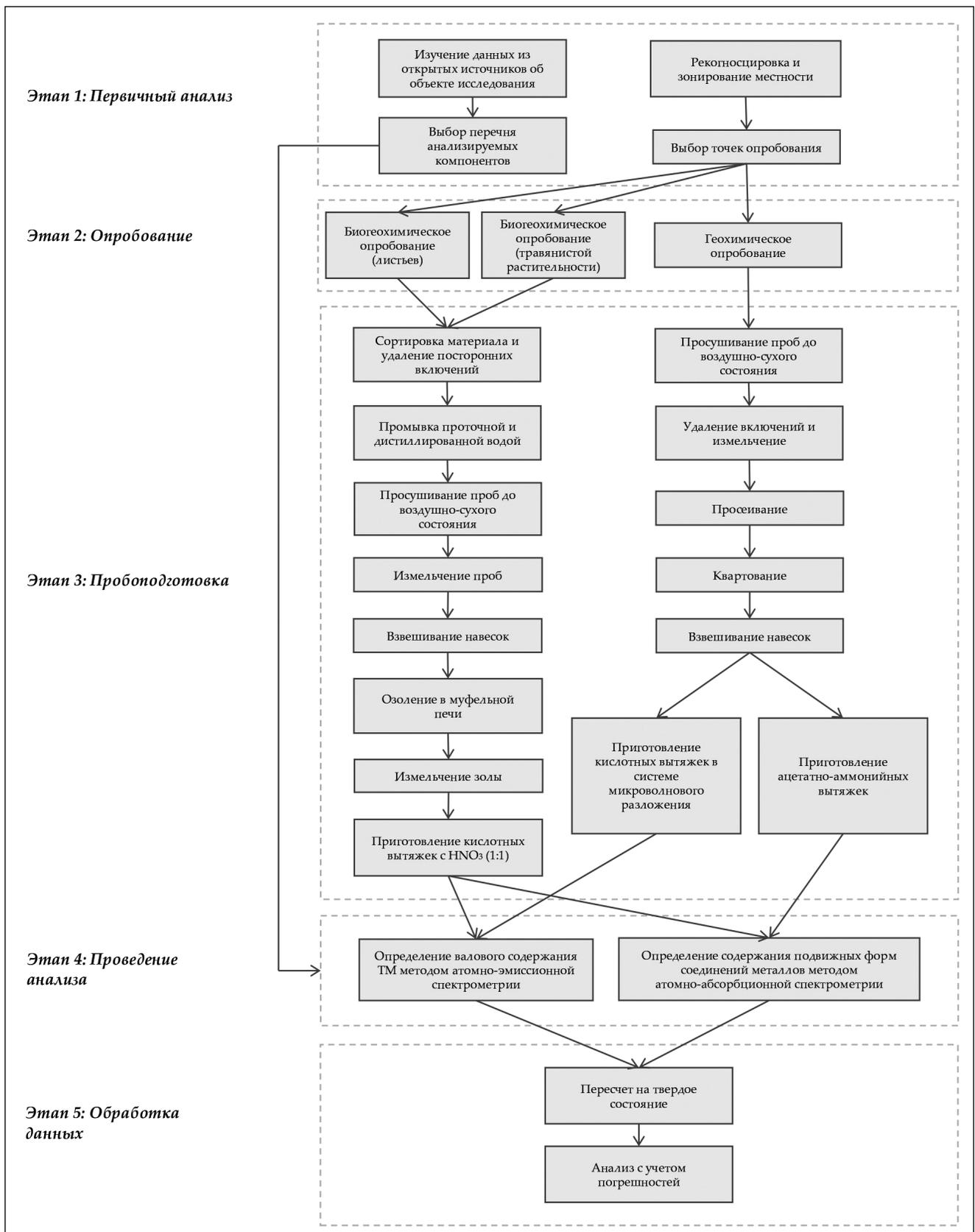


Рис. 1. Схема исследования

Fig. 1. Study flow diagram

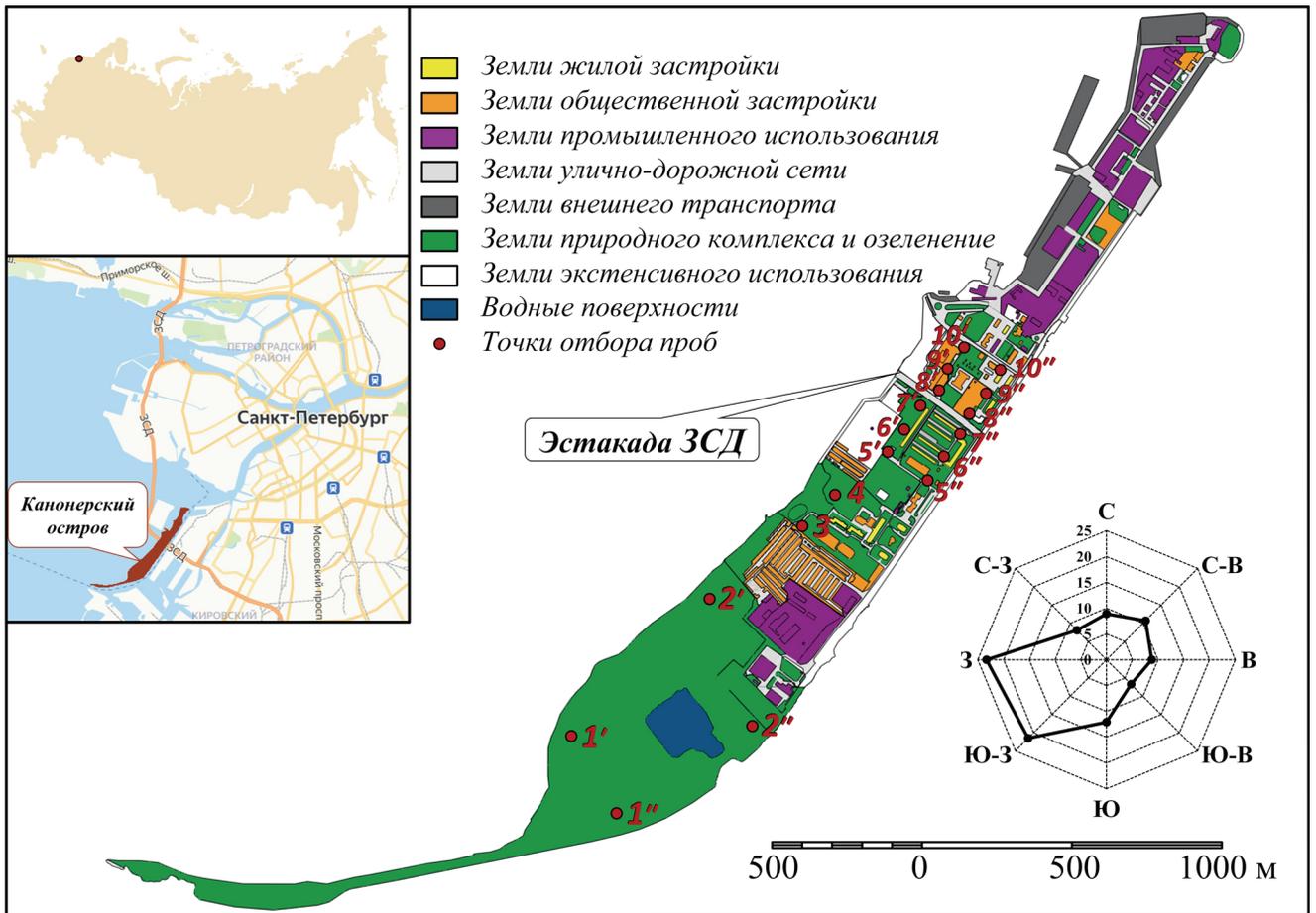


Рис. 2. Карта-схема назначения земель Канонерского острова с отмеченными точками опробования

Fig. 2. Schematic map of land categories on the Kanonersky Island with marked sampling points

Полученные растворы анализировались методом АЭС-ИСП на ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) и методом ААС с ЭТА на AA-7000 (Shimadzu, Япония), в зависимости от концентрации определяемого элемента [Качор и др., 2019]. Для каждого элемента строилась градуировочная характеристика (коэффициент корреляции в каждом случае $R \geq 0,998$). В качестве стандартного раствора использовался многоэлементный раствор для ICP SigmaAldrich Merck. Определение влажности почв выполнялось на термогравиметрическом анализаторе TGA 701 (Лесо, США) в соответствии с ГОСТ 28268-89.

Эколого-геохимическая оценка состояния почв осуществлялась путем расчета показателей: коэффициента контрастности (K_c), кларка концентрации (K_k) и коэффициента контрастности по ПДК ($K_{ПДК}$). Они отражают, соответственно, отношение фактического содержания элемента в городских почвах к его среднегородскому содержанию, кларку литосферы и ПДК в соответствии с ГН 2.1.7.2041.

Для интегральной оценки был рассчитан СПЗ по формуле:

$$Z_c = \sum K_{ПДК} - (n - 1),$$

где n – число аномальных элементов.

Степень загрязнения определялась в зависимости от величины Z_c : < 16 – допустимая, $16-32$ – умеренно опасная, $32-128$ – опасная, > 128 – чрезвычайно опасная по СанПиН 2.1.7.1287-03.

Биогеохимическое опробование, пробоподготовка и анализ растительных проб. Для биогеохимического опробования принимались доминирующие в ландшафтах острова виды древесной и травянистой растительности. Среди древесной растительности при отборе листьев принимались: береза повислая (*Betula pendula*), тополь белый (*Populus alba*), ива белая (*Salix alba*) и липа сердцевидная (*Tilia cordata*). Среди травянистой растительности: осока обыкновенная (*Carex L.*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), подорожник большой (*Plantago major L.*), клевер луговой (*Trifolium pratense L.*) и клевер белый (*Trifolium repens L.*). Они предрасположены к накоплению загрязняющих веществ (в частности, тяжелых металлов) [Ветчинникова и др., 2013].

Отбор проб растительного материала осуществлялся в соответствии с [Методические рекомендации..., 1981] на площадках размером 1×1 м методом «конверта», что скомпенсировало неоднородность в сомкнутости крон и видовом составе. Раздельно отбиралась аэральная часть травяного покрова и листья древесных растений без видимых повреждений и заболеланий. Масса каждой пробы составляла >500 г.

Так как в задачи исследования входило определение биоаккумуляции тяжелых металлов, для исключения поступления анализируемых компонентов на поверхность растений из атмосферы свежесобраный материал промывался дистиллированной водой, затем пробы высушивались до воздушно-сухого состояния, измельчались и квартовались аналогично пробам почв.

Подготовленные образцы минерализовали методом «сухого» озоления в муфельной печи LT 15/11 (Nabertherm, Германия) при температуре 650° до достижения постоянной массы (в течение 12 часов). Зольность определялась при той же температуре на термогравиметрическом анализаторе TGA 701 (Leco, США).

Кислотное разложение полученной золы проводилось аналогично почвам и с использованием тех же реактивов, как было описано выше. Определе-

ние рассматриваемых металлов в полученных растворах производилось согласно М-МВИ-80-2008 с использованием стандартов и оборудования, описанных выше.

Оценка степени накопления загрязняющих веществ растениями из почвы производилась на основании коэффициентов биоаккумуляции (K_b) отдельно для отобранных проб листьев и травяного яруса. K_b показывает отношение концентрации элемента в растении к концентрации его подвижной формы в почве (в мг/кг) [Перельман, Касимов, 1999].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа валового содержания и подвижных форм Cd, Cu, Ni, Pb и Zn в почвах представлены в табл. 1. Как видно, на всех пробных площадках отмечено превышение гигиенических нормативов сразу по нескольким из рассматриваемых элементов. При этом везде, с учетом погрешности, выявлено превышение ПДК по валовому содержанию и подвижным формам Pb и Zn, а также превышение ОДК валового содержания Cd (при условии, что количество подвижных форм данного элемента в почве не нормируется).

Таблица 1

Концентрации исследуемых тяжелых металлов в пробах почв, мг/кг

Зона	Номер пробной площадки	Элемент (Подвижные формы / Валовое содержание)				
		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
I	1	0,20 / 2,6	16,2 / 56	1,9 / 28	25 / 85	30 / 145
	2	0,64 / 2,6	6,5 / 34	1,05 / 23	26 / 85	45 / 115
II	3	0,17 / 3,5	3,2 / 105	0,68 / 31	376 / 1179	32 / 209
	4	0,34 / 2,8	5,4 / 49	1,4 / 29	25 / 73	49 / 167
III	5	0,21 / 2,3	4,6 / 37	0,63 / 21	10,3 / 55	20 / 96
	6	0,41 / 2,6	2,5 / 35	1,05 / 28	13 / 79	54 / 199
	7	0,56 / 3,1	15,0 / 107	2,5 / 29	297 / 345	1131 / 2903
IV	8	0,18 / 2,6	1,57 / 956	0,65 / 21	7,0 / 52	20 / 123
	9	0,16 / 2,4	2,3 / 26	0,66 / 20	8,2 / 46	16 / 64
	10	0,32 / 2,6	0,84 / 49	0,90 / 29	5,2 / 65	27 / 143
ПДК _{п.ф.} / ОДК (ПДК _{в.с.})		- / 1	3 / 66	4 / 40	6 / 65 (32)	23 / 110

Примечание. Погрешность для всех элементов и форм составляет 30%.

Для репрезентативности территория острова была условно поделена на IV зоны: I – рекреационную (пробные площадки № 1 и 2), относящуюся к землям природного комплекса и озеленения; II – переходную (пробные площадки № 3 и 4), граничащую с землями общественной застройки и промышленного использования; III – наветренную

зону до ЗСД (пробные площадки № 5–7) и IV – подветренную зону после ЗСД (пробные площадки № 8–10). На рис. 4–5 представлены значения полученных коэффициентов.

Для отражения подвижности металлов в почве построена зависимость отношения их подвижных форм к валовому содержанию (рис. 3).

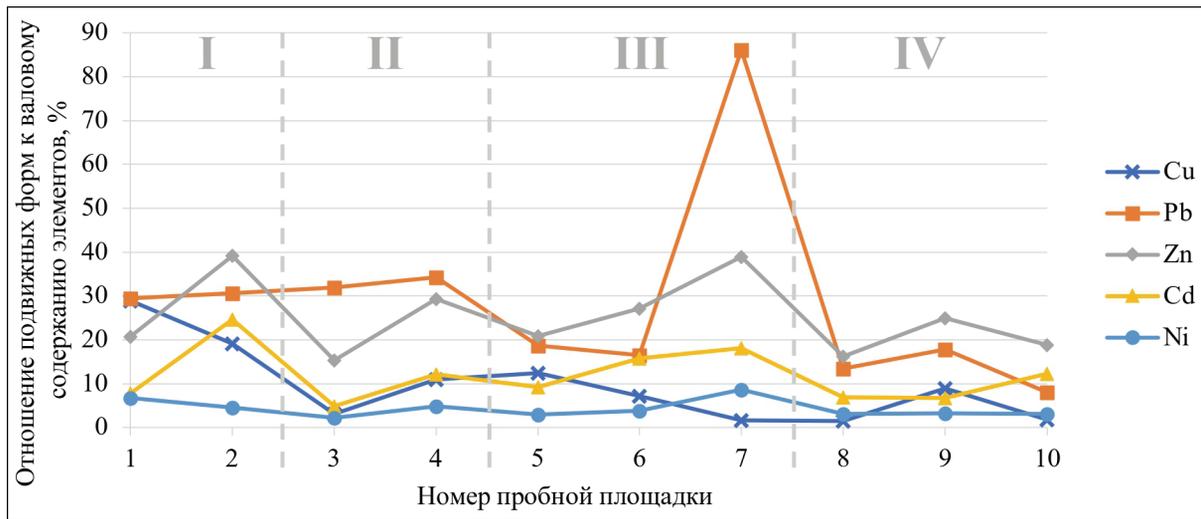


Рис. 3. Соотношение подвижных форм и валового содержания элементов в почвах

Fig. 3. Ratio of mobile forms and gross content of elements in soils

Ряд подвижности металлов на изученной территории может быть представлен как Pb (29%) > Zn (25%) > Cd (12%) > Cu (10%) > Ni (4%). В скобках указана средняя доля подвижных форм. На пробной площадке № 7 отмечается повышенное содержание подвижных форм Pb (86%), что может быть связано со свежим загрязнением поверхностного слоя почвы.

По данным табл. 1 рассчитана кратность превышения ПДК у подвижных форм металлов (рис. 4) и коэффициент контрастности по ПДК, кларк концентрации и коэффициент контрастности относитель-

но средних валовых содержаний в почвах городов с населением более 700 тыс. чел. (рис. 5).

Тогда как на пробной площадке № 1 (перед началом косы острова) зафиксированы наибольшие $K_{ПДК}$ у валовых Cd и Pb, у гаражного кооператива (пробная площадка № 2) обнаружены максимальные количества их подвижных форм и наиболее растворимого в почвах Zn. В рекреационной зоне I незначительно выше среднего в городских почвах содержание только валового Pb – остальные элементы находятся в пределах характерных им величин.

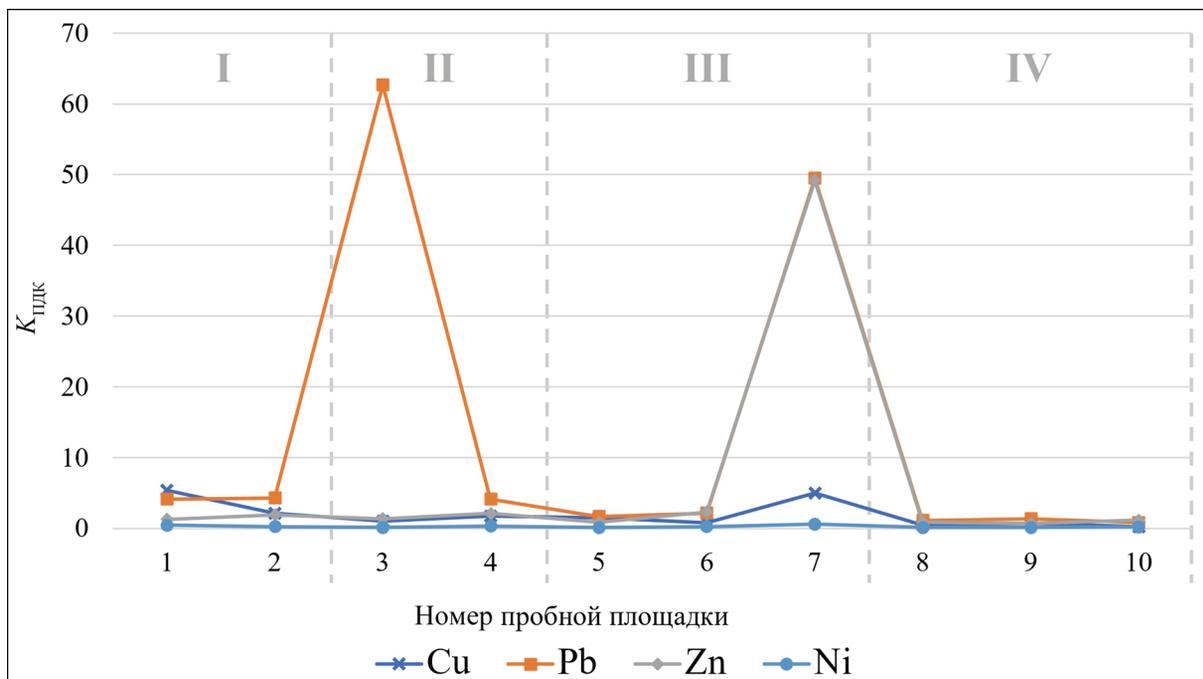


Рис. 4. Кратность превышения ПДК подвижными формами металлов

Fig. 4. Ratio of MPC surcharge by mobile forms of metals

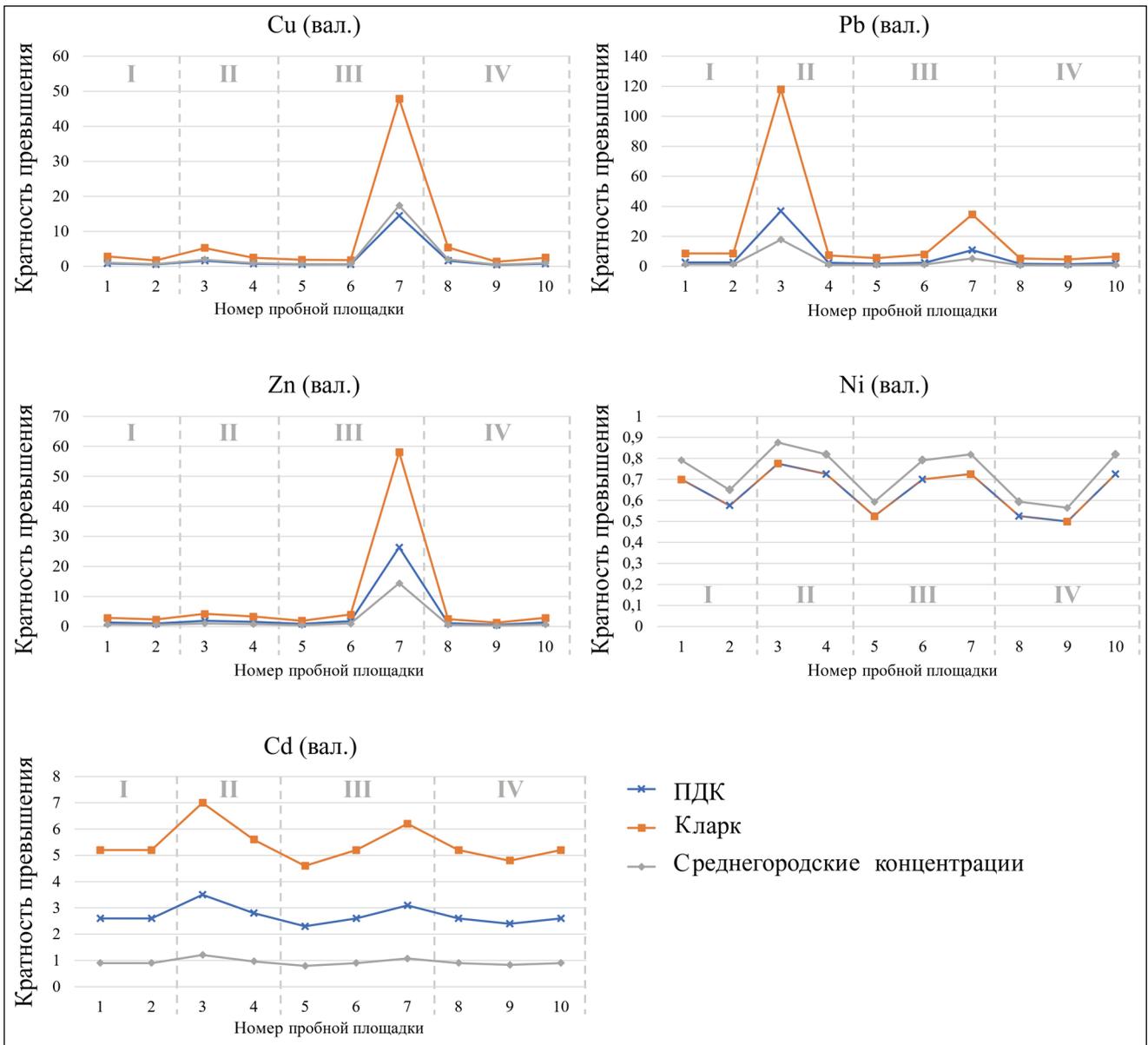


Рис. 5. Сравнение кратностей превышения валовыми содержаниями металлов

Fig. 5. Comparison of surcharge degrees for the gross contents of metals

В переходной зоне II обнаружено превышение валовых Cd, Pb и Zn на обеих пробных площадках № 3–4, а также Cu и Ni на площадке № 3. Рост подвижности элементов при этом происходит при удалении от рекреационной зоны I. Наиболее значимо загрязнение Pb: для него получены самые большие K_c , K_k и $K_{ПДК}$ среди всех четырех зон как по валовому содержанию, так и по подвижным формам. Только в данной зоне острова обнаружено незначительное превышение среднегородского уровня загрязнения Cd.

На пробных площадках № 5–7, относящихся к наветренной зоне общественной застройки у ЗСД (III), обнаружено высокое валовое содержание Cu, Pb и Zn. В наибольшей степени это проявляется на самой близкой к эстакаде площадке № 7, где для

Zn и Cu были рассчитаны самые значимые $K_{ПДК}$. У остальных элементов $K_{ПДК}$ подвижных форм сравнимы с рекреационной зоной I. Для всех элементов кроме Cu характерно постепенное снижение валовых содержаний при удалении от эстакады (движении от площадки № 7 к площадке № 5) и рост подвижности при движении в противоположном направлении. Только в зоне III обнаружено превышение среднегородских содержаний Zn. Здесь же зафиксирована наибольшая доля подвижных форм Pb по сравнению со всеми металлами.

На подветренной стороне общественной застройки у ЗСД (зона IV) обнаружено превышение валовых Cd, Pb и Zn на всех пробных площадках № 8–10. Однако наиболее значимо содержание валовой Cu на площадке № 8, ближайшей к эстакаде.

За исключением Cu и Pb характер загрязнения схож с рекреационной зоной I. Содержание подвижных форм меньше в сравнении с прочими частями острова, но все еще выше ПДК у Ni, Pb и Zn. $K_{\text{ПДК}}$ по подвижным формам наименьший у всех элементов среди всех зон. По всем металлам кроме Cu валовые содержания меньше среднегородских. Пробные площадки № 8–9 находятся в пределах ветровой тени, где загрязняющее воздействие ЗСД не столь высоко. Попадание поллютантов на такие площадки происходит с угасающими ветровыми потоками.

По результатам анализа проб почв не подтвердилось предположение, что парковая зона является условно-фоновым участком. Это может быть объяснено рядом причин:

- хроническим характером загрязнения территории острова;
- наличием привозных грунтов;
- остаточным воздействием от ликвидированной в 2017 г. свалки в парковой зоне;
- близким расположением локальных источников загрязнения – промышленных объектов и гаражей.

Для проведения интегральной эколого-геохимической оценки был рассчитан СПЗ по каждой из рассматриваемых пробных площадок (табл. 2). Умеренно опасной категорией загрязнения обладали пробные площадки № 3 и 7 (переходная зона II и наветренная зона общественной застройки у ЗСД III соответственно). В остальных случаях уровень загрязнения соответствовал низкому.

Таблица 2

Коэффициенты суммарного загрязнения

Зона	Номер пробной площадки	Z_c		Зона	Номер пробной площадки	Z_c	
		Подв.	Вал.			Подв.	Вал.
I	1	11,3	8,12	III	6	5,6	8,11
	2	8,7	7,39		7	104,3	55,48
II	3	65,3	44,61	IV	8	2,7	7,49
	4	8,4	8,07		9	3,0	5,31
III	5	4,3	5,98		10	2,5	7,40

Результаты биогеохимических исследований растительного покрова Канонерского острова представлены в табл. 3.

Рассматриваемые металлы по отношению к растениям можно поделить на участвующие в их метаболизме (Cu, Ni, Zn) и ксенобиотики (Cd и Pb) [Пуховская, 2020; Petrova, Rudzish, 2021; Смирнов и др., 2023].

Концентрации Cd в листьях древесной растительности высокие рядом с эстакадой ЗСД (пробная площадка № 7), но еще выше на максимальном удалении от нее. Первое может быть объяснено локальным воздействием в виде питания растений загрязненными стоками с автомобильной дороги. Высокое содержание подвижных форм Cd в почве и его накопление в растительном покрове на пробных площадках № 1 и 2 могут быть совместно связаны с составом привозного плодородного грунта для зеленых насаждений [Malyshkov et al., 2019; Smirnov et al., 2021]. Кроме того, из-за малой площади острова его парковая зона подвергается усиленному аэротехногенному воздействию со стороны производственных предприятий, таких, как Балтийский балкерный терминал, Морской порт и Петербургский нефтяной терминал.

Тогда как в почвах содержание подвижного Pb на большинстве пробных площадок достигает более 10 мг/кг, в растительных пробах оно превышает 2 мг/кг только на площадке № 9.

Повышенная активность накопления наблюдается в растительности для Cu и во многом коррелирует с концентрациями подвижных форм в почвах. В древесной растительности аккумуляция выше на территориях зеленых насаждений, а в травяном ярусе она увеличивается по мере приближения к ЗСД (исключение – площадки с подветренной стороны), где густота деревьев гораздо ниже и значительная часть воздействия приходится на травяной покров. Тогда как Cu связана с процессом фиксации азота растениями, Zn входит в состав ферментативных систем, участвующих в дыхании и синтезе белков. Закономерность его накопления аналогична Cu.

Высокое содержание Ni в растительных пробах с площадок № 3 и 4 объясняется тем, что на момент отбора проб там велись работы по облагораживанию территории и привозной грунт мог быть загрязнен. В таком случае активнее происходит поглощение однолетними растениями, питающимися из менее глубоких слоев. Гипотеза подтверждается низким содержанием Ni в древесных формах данной территории.

Концентрации исследуемых тяжелых металлов в растительных пробах, мг/кг

Зона	Номер пробной площадки	Элемент (Травяной покров / Листья древесной растительности)				
		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
I	1	0,046 / 1,8	1,79 / 11	0,19 / 2,3	0,18 / 1,2	3 / 323
	2	0,022 / 1,6	0,73 / 7,6	0,07 / 1,1	0,17 / 1,5	0,48 / 292
II	3	0,037 / 0,42	2,6 / 4,4	0,80 / 1,2	0,58 / 1,2	29 / 236
	4	0,021 / 0,13	4,5 / 6,5	0,86 / 0,59	0,47 / 1,7	20 / 31
III	5	0,040 / 0,13	6,1 / 8,5	0,53 / 1,1	0,30 / 1,3	22 / 22
	6	0,13 / 0,095	12 / 9,4	0,62 / 1,5	0,74 / 0,59	32 / 21
	7	0,026 / 1,1	3,7 / 9,8	0,52 / 1,2	0,83 / 0,19	23 / 324
IV	8	0,043 / 0,15	14 / 9,2	0,53 / 3,1	0,43 / 1,4	13 / 38
	9	0,026 / 0,52	3,8 / 7,1	0,59 / 2,5	0,30 / 2,2	19 / 352
	10	0,038 / 0,60	4,0 / 13	0,63 / 2,2	0,62 / 1,1	20 / 277

Примечание. Погрешность для всех элементов составляет 30%.

В табл. 4 представлены результаты расчета коэффициента биоаккумуляции.

В соответствии с расчетными данными сделаны следующие выводы:

1. У Cd интенсивность аккумуляции максимальна в рекреационной зоне I как для древесной растительности (2,5–9), так и для травянистой (0,03–0,23), что может указывать на хроническое

загрязнение и повышенное содержание элемента на более глубоких почвенных горизонтах. С северо-восточной стороны ЗСД также были идентифицированы зоны повышенного накопления Cd с K_0 0,83–3,25 и 0,12–0,24 для листового и травяного покрова, соответственно. Это может быть обусловлено ветровой тенью и, следовательно, недостаточной степенью рассеивания.

Таблица 4

Коэффициент биоаккумуляции, %

Зона	Номер пробной площадки	Элемент (Травяной покров / Листья древесной растительности)				
		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
I	1	0,23 / 9	0,11 / 0,68	0,10 / 1,21	0,007 / 0,048	0,10 / 10,8
	2	0,03 / 2,5	0,11 / 1,17	0,07 / 1,05	0,007 / 0,058	0,01 / 6,5
II	3	0,22 / 2,47	0,81 / 1,38	1,18 / 1,76	0,002 / 0,003	0,91 / 7,4
	4	0,06 / 0,38	0,83 / 1,2	0,61 / 0,42	0,019 / 0,068	0,41 / 0,63
III	5	0,19 / 0,62	1,33 / 1,85	0,84 / 1,75	0,029 / 0,126	1,10 / 1,1
	6	0,32 / 0,23	4,8 / 3,76	0,59 / 1,43	0,057 / 0,045	0,59 / 0,39
	7	0,05 / 1,96	0,25 / 0,65	0,21 / 0,48	0,003 / 0,001	0,02 / 0,29
IV	8	0,24 / 0,83	8,92 / 5,86	0,82 / 4,77	0,061 / 0,2	0,65 / 1,9
	9	0,16 / 3,25	1,65 / 3,09	0,89 / 3,79	0,037 / 0,268	1,19 / 22
	10	0,12 / 1,88	4,76 / 15,5	0,70 / 2,44	0,12 / 0,212	0,74 / 10,3

2. Накопление Cu возрастает от рекреационной зоны I в сторону ЗСД и варьирует от 0,11 до 8,92 для травяного покрова и от 0,65 до 15,5 для древесной растительности. При этом наибольшие значения K_0 обоих ярусов отмечены для зон, прилегающих к эстакаде (исключение – пробная площадка № 7), что может быть обусловлено меньшей площадью

проективного покрытия древесных видов и преобладанием травянистой растительности.

3. Аккумуляция Ni наиболее стабильна в сравнении с другими элементами как для травяного (0,07–1,18), так и для листового (0,42–4,77) покровов. Минимальное накопление Ni приходилось на травянистый ярус в пределах рекреационной зоны I, что

может свидетельствовать о значительном влиянии аэротехногенного переноса. Это подтверждается наличием пиков поглощения элемента с подветренной стороны ЗСД (зона IV), где в соответствии с ветровым режимом наблюдается наименьшая интенсивность рассеивания загрязняющих веществ.

4. Для Pb ввиду высокой токсичности характерна низкая степень бионакопления не смотря на высокое содержание подвижных форм в почвах [Alekseenko et al., 2020; Cheremisina et al., 2021]. Для травянистой растительности K_6 составил не более 0,12, что в 2,7 и 9,8 раз меньше, чем максимальные величины данного коэффициента для Cd и Ni соответственно. Аналогичная ситуация для листового покрова: K_6 у Pb варьирует в пределах 0,003–0,27 и в значительной степени уступает величине K_6 для других элементов.

5. У Zn характер поглощения схож с Cu. K_6 травянистого покрова увеличивался постепенно, варьируя в диапазоне 0,01–1,19, достигая максимума

на границе переходной и наветренной зон II–III, где присутствовало возможное влияние привозных грунтов. Исключением вновь является пробная площадка № 7. Для листового покрова схожая тенденция с Ni. В обоих случаях наибольшее поглощение выявлено в рекреационной зоне, в проективном покрытии которой преобладают деревья, а также с подветренной стороны ЗСД (зона IV), находящейся в области ветровой тени.

Степень аккумуляции тяжелых металлов в растениях определяется не только видовой принадлежностью, но и физико-химическими свойствами элемента и его путями поступления в растения. Установлено, что в условиях Канонерского острова интенсивность поглощения тяжелых металлов увеличивается в следующем ряду: $Pb < Cd < Ni < Cu < Zn$. Для большинства из них содержание в листовом покрове выше, чем в травяном, в среднем в 5–15 раз (рис. 6). Сильнее всего это проявляется на пробных площадках № 1–2.

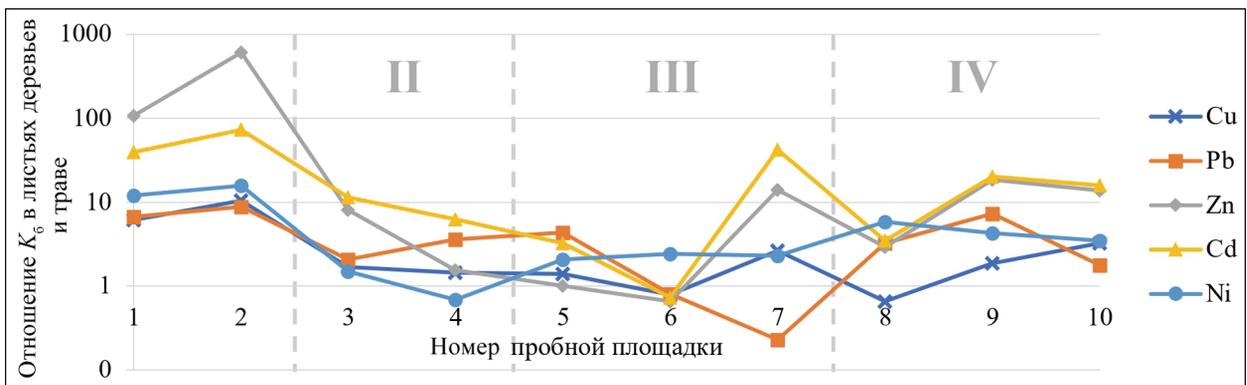


Рис. 6. Отношение K_6 в листьях древесной растительности к K_6 в травяном покрове

Fig. 6. Ratio of K_6 in tree leaves to K_6 in grass cover

В рекреационной зоне I возможно загрязнение более глубоких почвенных горизонтов, с которых осуществляется питание древесной растительности. На пробных площадках № 3–6 K_6 листового и травяного покрова близки, но с небольшим преобладанием в первом. Это можно связать с накоплением в древесных формах тяжелых металлов за более длительный срок за счет прохождения большего числа вегетативных периодов. На пробной площадке № 7 происходит резкий рост K_6 по всем металлам кроме Pb, теоретически связанный с попаданием стоков с эстакады в почву и аэротехногенным переносом. Пробные площадки с подветренной зоны IV, по всей видимости, испытывают продолжительное хроническое воздействие со стороны промплощадки на северо-востоке острова: K_6 и для листового, и для травяного

покрова имеют высокие значения по всем изученным металлам (кроме Cd). У жилой застройки, где плотность древесных насаждений ниже, наблюдается повышенный уровень накопления загрязняющих веществ травяным покровом, что свидетельствует о вероятном высоком влиянии аэротехногенного воздействия и об увеличении фоллиарного пути поступления тяжелых металлов [Масленников и др., 2015].

ВЫВОДЫ

Результаты биогеохимической оценки показали, что:

- наиболее подвижным из изученных тяжелых металлов в почвах Канонерского острова является Pb с 29% (к нему близка подвижность Zn – 25%), а наименее подвижным – Ni (4%);

– на всех пробных площадках с учетом погрешности выявлено превышение допустимых концентраций по валовому содержанию и подвижным формам Pb и Zn;

– на территории острова выделяются две зоны с умеренно опасной категорией загрязнения по СПЗ – переходная зона (а именно, пробная площадка № 3 с Z_c в диапазоне 44,61–65,3) и зона с наветренной стороны ЗСД (в частности, пробная площадка № 7 с Z_c в диапазоне 55,48–204,3);

– при рассмотрении эстакады ЗСД в качестве источника поступления загрязняющих веществ в компоненты окружающей среды заметно большее влияние на почвы с ее наветренной стороны;

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А., Алексеев А.В.* Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов. Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального университета, 2013. 388 с.
- Алексеев В.А., Шведкая Н.В., Бек Д. и др.* Аккумуляция химических элементов почвенно-растительным покровом Северо-Кавказской геохимической провинции // Записки Горного института. 2021. № 247. С. 1–13. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.15.
- Ветчинникова Л.В., Кузнецова Т.Ю., Титов А.Ф.* Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях севера // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2013. № 3. С. 68–73.
- Водяницкий Ю.Н.* Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2008. 85 с.
- Голубева Е.А., Еришова А.А.* Загрязнение побережья Невской губы Финского залива морским мусором и микропластиком в 2022 г. Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022 (Тверь, 2022 г.). Тверь: Изд-во ПолиПРЕСС, 2022. С. 328–331.
- Дроздов В.В., Лисовский А.Я.* Шумовое загрязнение среды при судоходстве и экологическая безопасность экосистем // Безопасность жизнедеятельности. 2021. № 7. С. 41–49.
- Дьячкова О.Н.* Влияние загрязнения почвы на экологическую безопасность городской среды Санкт-Петербурга // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 1. С. 67–71. DOI: 10.31857/S0869780920010044.
- Егорова С.А.* Роль почвы в формировании здоровья городского населения // Вестник современных исследований. 2018. № 8.3(23). С. 39–41.
- Касимов Н.С., Власов Д.В.* Тяжелые металлы и металлоиды в почвах российских городов (по данным ежегодных докладов Росгидромета) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 3. С. 14–22.
- Качор О.Л., Сарапулова Г.И., Богданов А.В.* Исследование возможности иммобилизации подвижных форм мышьяка в техногенных субстратах. Записки горного института. 2019. № 239. 596–602. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.596.
- Коршунов Г.И., Еремеева А.М., Серегин А.С.* Обоснование снижения требуемого расхода воздуха при проветривании горных выработок угольных шахт с работающими дизельными двигателями // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 3. С. 47–59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_47.
- Масленников П.В., Дедков В.П., Куркина М.В. и др.* Аккумуляция металлов в растениях урбоэкосистем // Вестник Балтийского федерального ун-та им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2015. № 7. С. 57–69.
- Медведева М.В., Титова Т.С., Бахмет О.Н. и др.* Исследование влияния аэротехногенного загрязнения на накопление тяжелых металлов в системе растение почва // Экология и промышленность России. 2019. № 23. С. 52–57. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-6-52-57.
- Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / под ред. Н.Г. Зырина, С.Г. Малахова. М.: Гидрометеоздат, 1981. 63 с.
- Мосягина Д.Д., Мысин А.В.* Систематический обзор и анализ данных по содержанию свинца в почвах городских агломераций // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию РАН. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. С. 218–223.
- Норова Л.П., Николаева Т.Н.* Комплексная оценка эколого-геологических условий в селитебных и промышленных районах г. Санкт-Петербурга // Инженерно-экологические изыскания – нормативно-правовая база, современные методы и оборудование: материалы Общероссийской научно-практической конференции. М.: Геомаркетинг, 2020. С. 62–70.
- Опекунова М.Г., Никулина А.Р., Смешко И.В. и др.* Сравнительный анализ эффективности методов биоиндикации при мониторинговых исследованиях состояния окружающей среды в Санкт-Петербурге // Вестник

- Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2023. № 68(2). С. 1–37. DOI: 10.21638/spbu07.2023.207.
- Пашкевич М.А., Бек Д., Матвеева В.А. и др. Биогеохимическая оценка состояния почвенно-растительного покрова в промышленных, селитебных и рекреационных зонах Санкт-Петербурга // Записки Горного института. 2020. № 241. С. 125–130. DOI: 10.31897/rmi.2020.1.125.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрейя-2000, 1999. 768 с.
- Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодegradация, биоремедиация, биоиндикация // Агрехимия. 2020. № 3. С. 83–93.
- Пухова Т.Ю. Накопление тяжелых металлов дикорастущими растениями и оценка возможности их использования в фиторемедиации загрязненных почв. Актуальные проблемы природопользования и природообустройства. Пенза: Изд-во ПГАУ, 2020. С. 122–125.
- Сарапулова Г.И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // Записки Горного института. 2020. № 243. С. 388–392. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.388.
- Смирнов Ю.Д., Матвеева В.А., Яковлев Н.М. и др. Анализ и оценка современных технологий очистки сточных вод на гальваническом производстве // Горный журнал. 2023. № 9. С. 55–60. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.08.
- Хомич В.С., Савченко С.В., Рыжиков В.А. и др. Проблемы обращения с городскими почвами, загрязненными нефтепродуктами и тяжелыми металлами // Природопользование. 2019. № 1. С. 76–90.
- Швец Н.И., Сидорова К.А. Уровень загрязнения почв и овощных культур в условиях городской и сельской среды // Астраханский вестник экологического образования. 2018. № 6. С. 51–56.
- Шилин М.Б., Сычев В.И., Михеев В.Л. и др. Результаты исследований техносферы Невской губы в РГГМУ // Гидрометеорология и экология. 2020. № 60. С. 351–370. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-60-351-370.
- Alekseenko V.A., Alekseenko A.V., Bech D. et al. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress, *Plants*, 2020, no. 10, p. 1–18, DOI: 10.3390/plants10010033.
- Cheremisina O., Litvinova T., Sergeev V. et al. Application of the Organic Waste-Based Sorbent for the Purification of Aqueous Solutions, *Water*, 2021, no. 13(21), p. 3101, DOI: 10.3390/w13213101.
- Dzhevaga N.V., Borisova D.D. Analysis of Air Monitoring System in Megacity on the Example of St. Petersburg, *Journal of Ecological Engineering*, 2021, no. 22(4), p. 175–185, DOI: 10.12911/22998993/134076.
- Malyshkov G.B., Nikolaichuk L.A., Sinkov L.S. Legislative regulation of waste management system development in the Russian federation, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2019, no. 5, p. 631–635.
- Petrova T.A., Rudzish E. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands, *Journal of Mining Institute*, 2021, no. 251, p. 767–776, DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16.
- Smirnov Yu.D., Suchkov D.V., Danilov A.S. et al. Artificial soils for restoration of disturbed land productivity, *Eurasian mining*, 2021, no. 2, p. 92–96, DOI: 10.17580/em.2021.02.19.
- Электронные ресурсы**
- ГН 2.1.7.2041. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901966754?marker=65001L> (дата обращения 08.06.2024).
- ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. URL: <https://fsvps.gov.ru/files/gost-17-4-4-02-2017-mezhgosudarstvennyj-standart/> (дата обращения 08.06.2024).
- ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023556> (дата обращения 08.06.2024).
- Отчет о результатах деятельности Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности в 2020 году. 2021. 11 с. URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ecology/struktura-razmesheniya-svedenij-o-kontrolnoj-nadzornoj-deyatelnosti/kontrolno-nadzornaya-deyatelnost/check_result/arhiv/ (дата обращения 11.09.2024).
- РД 52.18.289-90. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. URL: http://legacy-ipk.meteor.ru/images/stories/literatura/rd/52.18.289_90.pdf (дата обращения 08.06.2024).
- СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901859456?marker=65201M> (дата обращения 08.06.2024).
- Характеристики уровня загрязнения атмосферного воздуха в субъектах РФ. Открытые данные Министерства природных ресурсов и экологии РФ. URL: <https://www.mnr.gov.ru/opendata/7710256289-property> (дата обращения 08.06.2024).

Поступила в редакцию 25.04.2024

После доработки 15.09.2024

Принята к публикации 26.11.2024

BIOGEOCHEMICAL ASSESSMENT OF HEAVY METAL CONTAMINATION OF SOIL AND VEGETATION COVER OF THE KANONERSKY ISLAND

M.A. Chukaeva¹, A.A. Koshenkova², N.A. Malygin³, D.D. Borisova⁴, D.F. Anamov⁵

¹⁻⁴ *Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University*

⁵ *JSC Mekhanobr Engineering*

¹ *Laboratory of Environmental Modeling, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Engineering; email: shellx@bk.ru*

² *Institute for the Development of Interdisciplinary Competences, Engineer; email: koshenkova2000@mail.ru*

³ *Mining Faculty, Department of Geoecology, master student; e-mail: nik.redapple.malygin@mail.ru*

⁴ *Mining Faculty, Department of Geoecology, post-graduate student; e-mail: dashbo2000@gmail.com*

⁵ *Environmental Department, Engineer; e-mail: danyar.anamov@yandex.ru*

The authors have evaluated pollution with heavy metals (Cd, Cu, Ni, Pb and Zn) in the soil and vegetation cover of the Kanonersky Island, St. Petersburg. The reconnaissance survey has identified the Western High Speed Diameter (WHSD) as a significant source of pollution. The territory of the island was divided into 4 zones according to their functional use and wind regime: recreational, transitional, windward and leeward relative to the WHSD. The main soil contaminants are Pb and Zn with concentrations varying from 5 to 376 mg/kg and from 16 to 1131 mg/kg (for mobile forms) and from 46 to 1179 mg/kg and from 64 to 2903 mg/kg (for gross content), respectively. The highest degree of MAC surcharge was found for the mobile forms of metals: Pb (63-fold in the transition zone) and Zn (50-fold on the windward side of the WHSD). The coefficient of total soil pollution with heavy metals ranged from 2 to 104 for the mobile forms and from 5 to 55 for the gross content. Maximum values were recorded in transition and windward zones, therefore soils of these territories were classified as moderately polluted. The highest mobility among the considered heavy metals on the island is for Pb (29% – average percentage for its mobile forms), while the lowest is for Ni (4%). At the same time, the accumulation by plants becomes higher in a row Pb < Cd < Ni < Cu < Zn. The highest values for Zn and Cu were recorded in tree leaves on the leeward side of the WHSD. The general assessment of the state of soil and vegetation cover of the Kanonersky Island revealed a moderate degree of soil contamination with the main localization on the windward side of the WHSD and partially in the transition zone.

Keywords: urban soils, vegetation cover, heavy metals, contrast coefficient, total pollution coefficient, bioaccumulation coefficient

Acknowledgements. The research was carried out within the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSRW-2024-0005).

REFERENCES

- Alekseenko V.A., Alekseenko A.V. *Khimicheskie elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klarki pochv selitebnykh landshaftov* [Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils of residential landscapes], Rostov on Don, Southern Federal Univ. Publ., 2013, 388 p. (In Russian)
- Alekseenko V.A., Alekseenko A.V., Bech D. et al. Element accumulation patterns of native plant species under the natural geochemical stress, *Plants*, 2020, no. 10, p. 1–18, DOI: 10.3390/plants10010033.
- Alekseenko V.A., Shvydkaya N.V., Bek D. et al. Akkumulyatsiya khimicheskikh elementov pochvenno-rastitel'nykh pokrovom Severo-Kavkazskoi geokhimicheskoi provintsi [Accumulation of chemical elements by soil and vegetation cover of the North Caucasus geochemical province], *Journal of Mining Institute*, 2021, no. 247, p. 1–13, DOI: 10.31897/PMI.2021.1.15. (In Russian)
- Cheremisina O., Litvinova T., Sergeev V. et al. Application of the Organic Waste-Based Sorbent for the Purification of Aqueous Solutions, *Water*, 2021, no. 13(21), p. 3101, DOI: 10.3390/w13213101.
- Drozdo V.V., Lisovskii A.Ya. Shumovoe zagryaznenie sredi pri sudokhodstve i ekologicheskaya bezopasnost' ekosistem [Noise pollution from shipping and ecological safety of ecosystems], *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2021, no. 7, p. 41–49. (In Russian)
- D'yachkova O.N. Vliyanie zagryazneniya pochvy na ekologicheskuyu bezopasnost' gorodskoi sredi Sankt-Peterburga [Impact of soil pollution on the environmental safety of the urban environment of St. Petersburg], *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2020, no. 1, p. 67–71, DOI: 10.31857/S0869780920010044. (In Russian)
- Dzhevaga N.V., Borisova D.D. Analysis of Air Monitoring System in Megacity on the Example of St. Petersburg, *Journal of Ecological Engineering*, 2021, no. 22(4), p. 175–185. DOI: 10.12911/22998993/134076.
- Egorova S.A. Rol' pochvy v formirovaniy zdorov'ya gorodskogo naseleniya [The role of soil in shaping the health of urban populations], *Vestnik sovremennykh issledovaniy*, 2018, no. 8.3 (23), p. 39–41. (In Russian)
- Golubeva E.A., Ershova A.A. [Marine debris and microplastics pollution of the coast of the Nevskaya Bay of the Gulf of Finland in 2022], *Trudy "Morskije issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU)-2022"* [Marine Research and Education (MARESEDU)-2022], 2022, p. 328–331. (In Russian)

- Kachor O.L., Sarapulova G.I., Bogdanov A.V. Investigation of the possibility of immobilization of mobile forms of arsenic in anthropogenic substrates, *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 239, p. 596–602, DOI: 10.31897/PMI.2019.5.596.
- Kasimov N.S., Vlasov D.V. Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh rossiiskikh gorodov (po dannym ezhegodnykh dokladov Rosgidrometa) [Heavy metals and metalloids in soils of Russian cities (according to annual reports of Roshydromet)], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 3, p. 14–22. (In Russian)
- Khomich V.S., Savchenko S.V., Ryzhikov V.A. et al. Problemy obrashcheniya s gorodskimi pochvami, zagryaznennymi nefteproduktami i tyazhelymi metallami [Problems of handling urban soils contaminated with oil products and heavy metals], *Prirodopol'zovanie*, 2019, no. 1, p. 76–90. (In Russian)
- Korshunov G.I., Eremeeva A.M., Seregin A.S. Obosnovanie snizheniya trebuemogo rashkoda vozdukh pri provetrivaniy gornykh vyrabotok ugol'nykh shakht s rabotayushchimi dizel'nyimi dvigatelyami [Justification of reduction of the required air flow rate when ventilating mine workings of coal mines with diesel engines in operation], *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2022, no. 3, p. 47–59, DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_47. (In Russian)
- Malyshkov G.B., Nikolaichuk L.A., Sinkov L.S. Legislative regulation of waste management system development in the Russian federation, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2019, no. 5, p. 631–635.
- Maslennikov P.V., Dedkov V.P., Kurkina M.V. et al. Akkumulatsiya metallov v rasteniyakh urboekosistem [Accumulation of metals in plants of urban ecosystems], *Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. Series: Natural and Medical Sciences*, 2015, no. 7, p. 57–69. (In Russian)
- Medvedeva M.V., Titova T.S., Bakhmet O.N. et al. Issledovanie vliyaniya aerotekhnogenogo zagryazneniya na nakoplenie tyazhelykh metallov v sisteme rastenie pochva [Study of influence of aerotechnogenic pollution on accumulation of heavy metals in plant-soil system], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2019, no. 23, p. 52–57, DOI: 10.18412/1816-0395-2019-6-52-57. (In Russian)
- Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu polevyh i laboratornykh issledovaniy pochv i rastenij pri kontrole zagryazneniya okruzhayushej sredy metallami [Methodical recommendations for field and laboratory studies of soils and plants in the control of environmental pollution by metals], N.G. Zyrin, S.G. Malakhov (eds.), Moscow, Hydrometeoizdat Publ., 1981, 63 p. (In Russian)
- Mosyagina D.D., Mysin A.V. Systematic review and analysis of data on lead in urban agglomeration soils, *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of V.G. Shukhov Belarusian State Technical University dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences*, Belgorod, V.G. Shukhov BGTU, 2022, p. 218–223.
- Norova L.P., Nikolaeva T.N. Comprehensive assessment of ecological and geological conditions in residential and industrial areas of St. Petersburg, *Engineering-ecological surveys – normative-legal base, modern methods and equipment: materials of the All-Russian scientific-practical conference*, Moscow, Geomarketing Publishing House, 2020, p. 62–70.
- Opekunova M.G., Nikulina A.R., Smeshko I.V., Kirichenko V.S. Sravnitel'nyi analiz effektivnosti metodov bioindikatsii pri monitoringovykh issledovaniyakh sostoyaniya okruzhayushchei sredy v Sankt-Peterburge [Comparative analysis of the effectiveness of bioindication methods in environmental monitoring studies in St. Petersburg], *Vestn. St. Peterburgskogo un-ta. Nauki o Zemle*, 2023, no. 68(2), p. 1–37, DOI: 10.21638/spbu07.2023.207. (In Russian)
- Pashkevich M.A., Bek D., Matveeva V.A., Alekseenko A.V. Biogeokhimicheskaya otsenka sostoyaniya pochvenno-rastitel'nogo pokrova v promyshlennykh, selitebnykh i rekreatsionnykh zonakh Sankt-Peterburga [Biogeochemical assessment of soil and vegetation cover in industrial, residential and recreational zones of St. Petersburg], *Journal of Mining Institute*, 2020, no. 241, p. 125–130, DOI: 10.31897/pmi.2020.1.125. (In Russian)
- Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry of landscape], Moscow, Astrea-2000, 1999, 768 p. (In Russian)
- Petrova T.A., Rudzish E. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands, *Journal of Mining Institute*, 2021, no. 251, p. 767–776, DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16.
- Polyak Yu.M., Sukharevich V.I. Pochvennye fermenty i zagryaznenie pochv: biodegradatsiya, bioremediatsiya, bioindikatsiya [Soil enzymes and soil pollution: biodegradation, bioremediation, bioindication], *Agrokhiimiya*, 2020, no. 3, p. 83–93. (In Russian)
- Pukhovskaya T.Yu. [Accumulation of heavy metals by wild plants and assessment of their use in phytoremediation of contaminated soils], *Trudy "Aktual'nye problemy prirodopol'zovaniya i prirodooobustroystva"* [Actual problems of nature use and environmental management], 2020, p. 122–125. (In Russian)
- Sarapulova G.I. Geokhimicheskii podkhod v otsenke vozdeystviya tekhnogennykh ob'ektov na pochvy [Geochemical approach in assessing the impact of anthropogenic objects on soils], *Journal of Mining Institute*, 2020, no. 243, p. 388–392, DOI: 10.31897/PMI.2020.3.388. (In Russian)
- Shilin M.B., Sychev V.I., Mikheev V.L. et al. Rezul'taty issledovaniy tekhnosfery Nevskoi guby v RGGMU [Results of research on the technosphere of the Nevskaya Bay at the Russian State Geological University (RSGMU)], *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2020, no. 60, p. 351–370, DOI: 10.33933/2074-2762-2020-60-351-370. (In Russian)
- Shvets N.I., Sidorova K.A. Uroven' zagryazneniya pochv i ovoshchnykh kul'tur v usloviyakh gorodskoi i sel'skoi sredy [Soil and vegetable crop contamination levels in urban and rural environments], *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2018, no. 6, p. 51–56. (In Russian)
- Smirnov Yu.D., Matveeva V.A., Yakovlev N.M., Sakhabudinova E.R. Analiz i otsenka sovremennykh tekhnologii ochistki stochnykh vod na gal'vanicheskom proizvodstve [Analysis and evaluation of modern technologies of wastewater treatment at galvanic works], *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 9, p. 55–60, DOI: 10.17580/gzh.2023.09.08. (In Russian)
- Smirnov Yu.D., Suchkov D.V., Danilov A.S., Goryunova T.V. Artificial soils for restoration of disturbed land productivity, *Eurasian mining*, 2021, no. 2, p. 92–96, DOI: 10.17580/em.2021.02.19.
- Vetchinnikova L.V., Kuznetsova T.Y., Titov A.F. Osobennosti nakopleniya tyazhelykh metallov v list'yah drevesnykh

- rastenij na urbanizirovannyh territoriyah v usloviyah severa [Features of heavy metal accumulation in the leaves of woody plants in urbanised areas in the north], *Proceedings of the Karelian Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2013, no. 3, p. 68–73. (In Russian)
- Vodyanitsky Yu.N. *Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh* [Heavy metals and metalloids in soils], Moscow, V.V. Dokuchaev Soil Institute of Russian Academy of Agricultural Sciences Publ., 2008, 85 p. (In Russian)
- Web sources*
- Characteristics of the level of atmospheric air pollution in the subjects of the Russian Federation. Open data of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, URL: <https://www.mnr.gov.ru/opendata/7710256289-property> (access date 08.06.2024). (In Russian)
- GN 2.1.7.2041. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in soil. Hygienic standards, Electronic fund of legal and normative-technical documents, URL: <https://docs.cntd.ru/document/901966754?marker=6500IL> (date of access 08.06.2024).
- GOST 17.4.4.02-2017. Interstate standard. Nature protection. Soils. Methods of sampling and preparing samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis, URL: <https://fsvps.gov.ru/files/gost-17-4-4-02-2017-mezhgosudarstvennyj-standart/> (date of access 08.06.2024).
- GOST 28268-89. Soils. Methods for Determining Humidity, Maximum Hygroscopic Humidity, and Humidity of Stable Wilting Point of Plants, Electronic Fund of Legal and Normative-Technical Documents, URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023556> (date of access 08.06.2024).
- RD 52.18.289-90. Guidelines. Methodology for Measuring the Mass Fraction of Mobile Forms of Metals (Copper, Lead, Zinc, Nickel, Cadmium, Cobalt, Chromium, Manganese) in Soil Samples by Atomic Absorption Analysis. URL: http://legacy-ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/rd/52.18.289_90.pdf (date of access 08.06.2024).
- Report on the results of the activities of the Committee on Nature Management, Environmental Protection and Environmental Safety in 2020, 2021, 11 p., URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ecology/struktura-razmesheniya-svedenij-o-kontrolnoj-nadzornoj-deyatelnosti/kontrolno-nadzornaya-deyatelnost/check_result/arhiv/ (date of access 11.09.2024).
- SanPiN 2.1.7.1287-03. Sanitary and epidemiological requirements for soil quality, Electronic fund of legal and normative-technical documents, URL: <https://docs.cntd.ru/document/901859456?marker=6520IM> (date of access 08.06.2024).

Received 25.04.2024

Revised 15.09.2024

Accepted 26.11.2024

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные к публикации материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Объем статьи (текст, таблицы, список литературы, рисунки, перевод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы, 5 рисунков), не более 50 тыс. знаков для обзорных статей. Объем кратких сообщений составляет 0,25 а. л. Рекомендуемый список литературы – до 30 наиболее актуальных работ по рассматриваемому вопросу. В обзорных статьях список литературы не должен превышать 60 источников. Для кратких сообщений список литературы может быть до 10 источников. Самоцитирований в списке литературы не должно быть более 10% от общего числа использованных источников.

Статья должна быть четко структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Все материалы статьи компонуется **в единый сводный файл в формате Word** и размещаются в нем в следующей последовательности:

1. УДК;
 2. Название статьи;
 3. Инициалы и фамилия автора(ов);
 4. Для каждого автора приводится полное название учреждения, в котором выполнялось исследование, подразделение (кафедра, лаборатория и т. п.), уч. степень, должность, *e-mail*;
 5. Аннотация статьи;
 6. Ключевые слова;
 7. Текст статьи;
 8. Благодарности, в том числе – финансирование;
 9. Список литературы;
 10. Таблицы;
 11. Подписи;
 12. Рисунки;
 13. Перевод на английский язык пунктов 2–6, 8–9,
11. В пункте 4 просьба использовать в переводе официальное наименование организации на английском языке (а не собственный вариант перевода).

Подготовка текста

Текст набирается 12 кеглем через один интервал, поля слева, сверху и снизу – 2 см, справа – 1,5 см. Не допускается использование табулятора или пробелов для обозначения абзаца, ручных переносов в словах, переносов строк клавишей Enter в рамках одного предложения, разрывов страниц и разделов. В тексте статьи возможно использование полужирного шрифта и курсива для смысловых выделений, однако не должно использоваться подчеркивание. Десятичная часть чисел отделяется запятой.

Формулы набираются в редакторе формул в отдельную строку и имеют сквозную нумерацию по всей статье, выровненную по правому краю строки.

Таблицы набираются в Word, не допускается разделение ячеек косой линией. Ручные переносы не допускаются.

Рисунки представляются отдельными файлами, названными по их номерам (например: рис.1.tiff, рис.2.jpg), в графическом формате (eps, tif, jpg) разрешением не менее 300 dpi для полутоновых и 600 dpi для черно-белых изображений и графиков. Для графиков, выполненных в Excel, дополнительно прилагаются соответствующие файлы Excel. Картинки должны быть полностью готовы к изданию. Представление рисунков в виде схем Word или набранного текста с добавлением графических элементов, наложенных сверху, **не допускается**.

Ссылка на источник в тексте документа указывается в квадратных скобках. В тексте ссылки через запятую указывается фамилия автора и год издания. Если ссылок несколько – они отделяются друг от друга точкой с запятой. Ссылка на источник на иностранном языке указывается на языке оригинала. Список русскоязычной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003, 7.82–2001 и 7.0.5–2008. DOI (при наличии) указывается в конце ссылки. Ссылка на источник на английском языке оформляется единообразно и в русскоязычном, и в переведенном на английский язык списке литературы. **При наличии у русскоязычного издания, которое фигурирует в списке литературы, оригинальной или переводной англоязычной версии в ссылке должна быть указана именно она, а не русскоязычный вариант.**

Более подробные инструкции по подготовке статей для авторов можно найти на сайте журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Статьи, оформленные не по правилам, будут возвращаться автору на переработку.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)9392923. Сайт журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Электронная почта: vestnik_geography@mail.ru.

Плата за публикацию не взимается

У Ч Р Е Д И Т Е Л И :

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ :

С.А. ДОБРОЛЮБОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН (главный редактор)
В.С. ТИКУНОВ, доктор географических наук, профессор (зам. главного редактора)
Е.А. ЕРЕМЕНКО, кандидат географических наук (ответственный секретарь)
А.И. АЛЕКСЕЕВ, доктор географических наук, профессор
С.И. БОЛЫСОВ, доктор географических наук, профессор
А.Н. ГЕННАДИЕВ, доктор географических наук, профессор
К.Н. ДЬЯКОНОВ, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН
С.С. ЗИЛИТИНКЕВИЧ, доктор географических наук, профессор (Метеорологический институт Финляндии)
О.Г. ЗОЛИНА, профессор (Университет Ж. Фурье, г. Гренобль, Франция)
В.Ю. ИВАНОВ, профессор (Мичиганский университет, США)
Н.С. КАСИМОВ, доктор географических наук, профессор, академик РАН
А.В. КИСЛОВ, доктор географических наук, профессор
В.А. КОЛОСОВ, доктор географических наук, профессор
К.П. КОЛТЕРМАНН, профессор
М. КОНЕЧНЫ, профессор (Университет г. Брно, Чешская Республика)
С.Б. КРООНЕНБЕРГ, профессор (Технологический университет г. Делфт, Нидерланды)
С.М. МАЛХАЗОВА, доктор географических наук, профессор
Г. МОУРИ, профессор (Университет г. Токио, Япония)
С.А. СОКРАТОВ, кандидат географических наук, PhD
П.Е. ТАРАСОВ, доктор наук, профессор (Берлинский Свободный университет, Германия)
Н.Л. ФРОЛОВА, доктор географических наук, профессор
В.Е. ШУВАЛОВ, кандидат географических наук, доцент
Т.А. ЯНИНА, доктор географических наук, профессор
В.В. ЯНКО-ХОМБАХ, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Институт прикладных исследований Авалон, г. Виннипег, Канада)

EDITORIAL BOARD :

S.A. DOBROLUBOV, doctor of science, Academician of the Russian Academy of Sciences, professor (Editor-in-chief)
V.S. TIKUNOV, doctor of science, professor (Deputy Editor-in-chief)
E.A. EREMENKO, candidate of science (Secretary-General)
A.I. ALEKSEEV, doctor of science, professor
S.I. BOLYSOV, doctor of science, professor
A.N. GENNADIYEV, doctor of science, professor
K.N. D'YAKONOV, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor
S.S. ZILITINKEVICH, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)
O.G. ZOLINA, professor (Fourier University, Grenoble, France)
V.YU. IVANOV, professor (Michigan University, USA)
N.S. KASIMOV, doctor of science, academician of the Russian Academy of Sciences, professor
A.V. KISLOV, doctor of science, professor
V.A. KOLOSOV, doctor of science, professor
K.P. KOLTERMANN, professor
M. KONECNY, professor (Masaryk University, Faculty of Science, Czech Republic)
S.B. KROONENBERG, professor (Delft University of Technology, Department of Applied Earth Sciences, Netherlands)
S.M. MALKHAZOVA, doctor of science, professor
G. MOURI, professor (University of Tokyo, Japan)
S.A. SOKRATOV, candidate of science, PhD
P.E. TARASOV, professor (Free Berlin University, Germany)
N.L. FROLOVA, doctor of science, professor
V.E. SHUVALOV, candidate of science, associate professor
T.A. YANINA, doctor of science, professor
V.V. YANKO-KHOMBACH, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)

Номер подготовили члены редколлегии
С.И. БОЛЫСОВ, В.С. ТИКУНОВ

Редактор **Е.С. Повалишникова**

Адрес редколлегии:

119992, Москва, Ленинские горы, МГУ,
географический факультет, комн. 2108а. Тел. 7(495) 939-29-23

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 00.00.2016. Формат 60×90/8.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л.
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

Типография МГУ.
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.