

ISSN 0869-6071

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
РУССКОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО



ИЗВЕСТИЯ РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

Том 157, номер 1
январь – март
2025



НАУКА
— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 157, номер 1, 2025

Результаты актинометрических измерений в долине ледника Некрасова <i>М. Р. Кузнецова, Г. В. Пряхина, В. А. Распутина, Д. С. Зырянова</i>	3
Применение технологии ретроспективного сферического видеодокументирования для сбора визуальных данных о последствиях проявления опасных береговых процессов (на примере Таганрогского залива Азовского моря) <i>О. А. Хорошев, А. А. Хорошева</i>	14
Региональная система особо охраняемых природных территорий Крыма: структура и геоэкологические проблемы <i>Е. И. Голубева, Е. С. Каширина, А. А. Новиков</i>	28
Социально-демографический потенциал населения и качество среды в городах Сибири <i>Ю. Н. Дмитриева</i>	44
Пространственное моделирование при оценке ветроэнергетического потенциала южных субъектов Дальневосточного федерального округа РФ <i>М. Ю. Демидионов</i>	61
Сравнение современных свободно распространяемых цифровых моделей рельефа и их применимости для эрозионного моделирования <i>К. А. Мальцев, С. Н. Талипова, И. И. Магзянов, А. А. Сомов, Т. С. Мальцева</i>	79
Особенности кинетических процессов трансформации органического вещества в мезотрофных водоемах Карелии <i>А. В. Леонов, М. В. Зобкова</i>	99
“Политическая география” Винсгейма — отправная точка в развитии российской и мировой научной школы географии и страноведения <i>И. Ю. Окунев</i>	119
Экологическая оценка содержания меди и цинка в объектах окружающей среды и в волосах населения на территории Октябрьского района Ханты-Мансийского автономного округа-Югры Тюменской области <i>А. В. Синдирева, М. А. Белов, Д. О. Пузанов, С. С. Вешкурцева</i>	134

CONTENT

Volume 157, No. 1, 2025

Results of actinometric measurements in the valley of the Nekrasov glacier <i>M. R. Kuznetsova, G. V. Pryakhina, V. A. Rasputina, D. S. Zyryanova</i>	3
Application of Retrospective Spherical Video Documentation Technology to Collect Visual Data on the Consequences of Hazardous Coastal Processes (Based on the Example of the Taganrog Bay of the Sea of Azov) <i>O. A. Khoroshev, A. A. Khorosheva</i>	14
Regional System of Natural Protected Areas of the Crimea: State and Geoecological Problems <i>E. I. Golubeva, E. S. Kashirina, A. A. Novikov</i>	28
Socio-Demographic Potential of the Population and Quality of the Environment in Cities of Siberia <i>Yu. N. Dmitrieva</i>	44
Spatial Modeling in Assessing the Wind Energy Potential of the Russian Federation Far Eastern Federal District Southern Subjects <i>M. Ju. Demidionov</i>	61
Accuracy Analysis of New Freely Available Digital Terrain Models in the European Territory of Russia Comparison of Modern Freely Available Digital Terrain Models and Their Applicability for Soil Erosion Modeling <i>K. A. Maltsev, S. N. Talipova, I. I. Magzyanov, A. A. Somov, T. S. Maltseva</i>	79
Characteristics of Kinetic Processes of Organic Matter Transformation in Mesotrophic Lakes of Karelia <i>A. V. Leonov, M. V. Zobkova</i>	99
Winsheim's "Political Geography" as a Starting Point in the Development of the Russian and World Academic School of Geography and Regional Studies <i>I. Y. Okunev</i>	119
Ecological Assessment of the Content of Copper and Zinc in Environmental Objects and in the Hair of the Population in the Oktyabrsky District of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra of the Tyumen Region <i>A. V. Sindireva, M. A. Belov, D. O. Puzanov, S. S. Veshkurtseva</i>	134

УДК 556.5

РЕЗУЛЬТАТЫ АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ДОЛИНЕ ЛЕДНИКА НЕКРАСОВА

© 2025 г. М. Р. Кузнецова^{а,*}, Г. В. Пряхина^{б,**}, В. А. Распутина^{б,***}, Д. С. Зырянова^{б,****}

^аАрктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

^бСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: rotefliege@mail.ru

**E-mail: g65@mail.ru

***E-mail: lerasputina88@gmail.com

****E-mail: levienche13@gmail.com

Поступила в редакцию 09.11.2023 г.

После доработки 11.12.2024 г.

Принята к публикации 10.03.2025 г.

В статье представлены результаты полевых актинометрических измерений, выполненных в июле 2023 г. в долине горного ледника Некрасова (Южно-Чуйский хребет, Алтай). Измерены величины суммарной поступающей и отраженной солнечной радиации; полевые работы выполнены в период с 14.07.2023 по 27.07.2023, использован пиранометр “Пеленг СФ-06”. Установлен выраженный суточный ход суммарной солнечной радиации, аппроксимиремый параболой; значительные изменения приходящей радиации в утренние (9 часов) и вечерние (18 часов) часы обусловлены затеняющим влиянием рельефа. Определены величины альbedo природных поверхностей долины ледника Некрасова: снежник в долине (0.39), сухая морена без мха (0.10) и со мхом (0.11), снег на леднике (0.44), снежник в краевой части ледника (0.25), влажный фирн (0.27), песок на влажном льду (0.09), ручей на леднике (0.11).

Ключевые слова: солнечная радиация, альbedo поверхностей, горные ледники, пиранометр, Алтай

DOI: 10.31857/S0869607125010012, EDN: LIZNAT

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении разного рода тепло-балансовых расчетов требуются данные актинометрических наблюдений. При расчетах таяния ледников методом теплового баланса необходимы значения величин поступления суммарной солнечной радиации и альbedo поверхностей различного типа. Существуют методики, позволяющие оценивать величины этих характеристик расчетным способом (например, [8; 14]), а в случае альbedo поверхностей — по спутниковым снимкам (например, [1]). Тем не менее подобные расчеты могут требовать оценки применимости для конкретного района (особенно если речь о региональных зависимостях) или верификации. Пригодные спутниковые снимки могут отсутствовать из-за плотной облачности или иметь неудовлетворительное для изучаемого объекта разрешение, а расчет поступления солнечного излучения к земной поверхности будет осложняться из-за необходимости учета состояния атмосферы в конкретное время и в конкретной географической точке. Все это обуславливает актуальность получения материалов фактических измерений: именно

они наиболее достоверно отражают реальные значения величин суммарной солнечной радиации и альbedo поверхностей различного типа. Так, для района Эльбруса силами сотрудников Института географии РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова были получены суточный ход величины приходящей солнечной радиации, суточный ход альbedo поверхности ледника и суточный ход радиационного баланса [9; 10]. В работе [15] сравнивались результаты расчета составляющих теплового баланса по разным методикам с натурными данными для горного ледника Джанкуат (Кавказ). Также для ледника Джанкуат за период 2007–2015 гг. для сезона абляции получен осредненный суточный ход элементов теплового баланса [11]. В исследовании [13] представлен суточный ход приходящей солнечной радиации в течение сезона абляции для ледника французских Альп за отдельные годы. Однако в районе исследования (Алтай) в настоящее время практически отсутствуют данные актинометрических наблюдений. Целью настоящей работы является анализ результатов полевых актинометрических измерений, выполненных в долине ледника Некрасова (Южно-Чуйский хребет, Алтай) в июле 2023 г. Подобные работы в данном районе ранее не проводились.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы получены в ходе комплексной географической экспедиции Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) на Алтай в долину ледника Некрасова летом 2023 г. при участии авторов настоящей статьи. Ледник расположен на территории Южно-Чуйского хребта; относится к горным ледникам карового типа. Общая длина 1.5 км; ширина карового углубления порядка 1.4 км, ширина в нижней краевой части от 300 м и более; абсолютные высотные отметки 2960–3600 м.

Полевые актинометрические работы включали измерение величины поступающей к поверхности суммарной солнечной радиации и отраженной солнечной радиации от природных поверхностей различного типа в долине и на леднике. Первая точка измерений располагалась в центральной части долины вне ледника на высоте 2770 м над уровнем моря, а вторая — на леднике, на высоте 2975 м над уровнем моря (рис. 1).

Измерения суммарной приходящей радиации осуществляли в период с 14.07.2023 по 27.07.2023. В силу организационных причин при отсутствии возможности автоматической записи показаний прибора измерения проводились с различной дискретностью. Наиболее подробные измерения были выполнены 19.07.2023 в период с 9:30 до 19:40 и с интервалом 1 час. В другие дни — 14–15.07.2023, 18.07.2023, 22–25.07.2023, 27.07.2023 — выполнено по 3–5 измерений: интервал составил 2 часа, временной диапазон с 9 до 18 часов. В отдельных случаях (17.07.2023, 20–21.07.2023, 26.07.2023) выполняли 1–2 измерения в период максимальных значений — с 12 до 14 часов. Измерения отраженной солнечной радиации на внеледниковых поверхностях проводили 14–15.07.2023, а на леднике Некрасова — 17.07.2023 и 24.07.2023. Координаты точек измерений были зафиксированы инструментально с помощью приемника GPS; дополнительно на участках измерений были оставлены вешки-маркеры.

Использован пиранометр “Пеленг СФ-06” (Беларусь), данная модель используется и на сети Росгидромета [2]. Относительная погрешность измерения составляет $\pm 10\%$; на момент выполнения работ прибор имел действующее свидетельство о поверке. При выполнении измерений поступающей радиации головка пиранометра размещалась горизонтально, на открытом незатененном пространстве, непосредственно на поверхности. При выполнении измерений отраженной радиации головка пиранометра удерживалась помощником наблюдателя горизонтально, направленной к исследуемой поверхности, на высоте 0.5 м от поверхности и на расстоянии вытянутой руки,

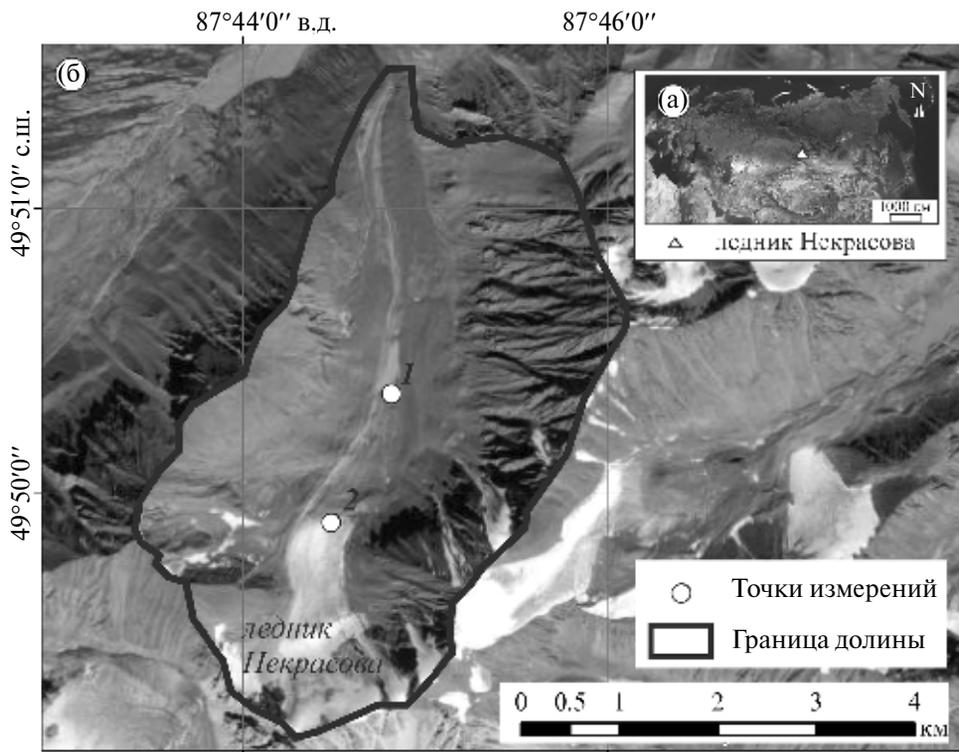


Рис. 1. Схема расположения точек актинометрических измерений.

Fig. 1. The scheme of the location of actinometric measurements points.

при этом помощник располагался с северной стороны, чтобы не затенять поверхность и саму головку прибора. Горизонтальность размещения контролировалась с помощью пузырькового строительного уровня. Измерения и предварительная обработка данных осуществлялись в соответствии с методическими рекомендациями для данного прибора: перед выполнением серии измерений в течение двух минут датчик выдерживался под закрытой крышкой, после чего записывали показания (место нуля, MO); затем не менее двух минут — с открытой крышкой, после чего снимали показания величины солнечной радиации ($Q_{изм}$). Каждый вид показаний снимали трижды, расчет величин солнечной радиации выполняли на основании средних арифметических значений ($Q_{ср. изм}$, $MO_{ср. изм}$), пересчет единиц измерений в $Вт/м^2$ выполняли по формуле:

$$Q = \frac{Q_{ср. изм} - MO_{ср. изм}}{10.34} \times 1000. \quad (1)$$

Аналогичным образом определены величины отраженной радиации (R). Величины альbedo (A) рассчитаны как отношение отраженной солнечной радиации к суммарной:

$$A = \frac{R}{Q}. \quad (2)$$

Для определения альbedo ледника также были использованы спутниковые снимки MODIS MOD10A1.006 Terra Snow Cover Daily Global500m [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В июле в долине Некрасова световой день начинается в 4:30 утра, однако из-за экспозиции долины и крутых высоких бортов солнечные лучи попадают на поверхность западного борта (восточной экспозиции) начиная с 8:00 и полностью освещают долину с 9:00. Вечером освещенность начинает снижаться после 18:00, а полностью исчезает после 20:00; закат происходит после 22:30. При измерениях суммарной солнечной радиации пиранометр находился в центре долины (рис. 1), утром интенсивность поступления солнечной радиации при попадании солнечных лучей на датчик тут же возрастала с 30–35 до 600–700 Вт/м², а вечером, когда солнце уходило за борт долины, резко снижалась с 400 до 70 Вт/м² и менее. Это обстоятельство, выявленное еще на этапе полевых работ, определило средний период выполнения измерений — с 9:00 до 18:00.

Величины суммарной солнечной радиации в долине ледника Некрасова имеют выраженный суточный ход (рис. 2), аппроксимируемый параболой. При аппроксимации использованы результаты измерений при ясном небе, в период с 9 до 18 часов (солнце находится над горизонтом). Максимальные значения зафиксированы в период с 12 до 14 часов и составляют порядка 1050–1100 Вт/м², максимальное измеренное составило 1206 Вт/м² 21.07.2023 в 13:00 (исключено из рассмотрения при аппроксимации как очевидное завышенное). На графике квадратами отмечены измерения, при выполнении которых солнце было перекрыто облаками в той или иной степени; за некоторым исключением, они в несколько раз ниже, чем значения в те же часы при безоблачном небе. Рассчитанная с учетом аппроксимации средняя величина суммарной солнечной радиации за сутки при ясном небе составляет 26.6 МДж/м².

Измерения отраженной от различных поверхностей радиации позволили оценить величины альbedo для различных типов природных поверхностей (рис. 3). В долине

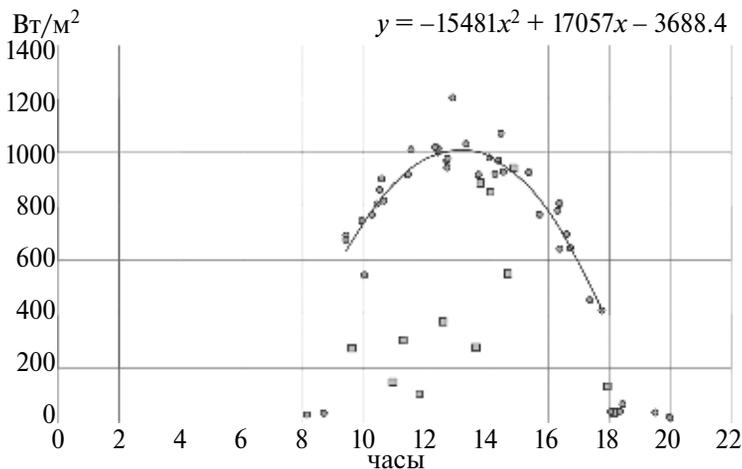


Рис. 2. Суточный ход суммарной солнечной радиации. Точками показаны измерения при солнце, не закрытом облаками; квадратами — при наличии облачности.

Fig. 2. The diurnal variation of solar radiation. Measurements made when the sun was not covered by clouds are shown as dots; when the cloud cover — as squares.

ледника Некрасова наиболее распространенным типом является морена, на отдельных участках перекрытая мхом; также на территории представлены снежники (табл. 1). Внутрисуточные закономерности изменения альбедо не прослеживаются. Наибольшая средняя величина альбедо снежника — 0.39; альбедо сухой морены в 3.5 раза ниже.

Поверхность ледника Некрасова неоднородна, поэтому были выбраны несколько характерных типов: снег на льду, влажный фирн, песок, ручьи, снежник в краевой части ледника (рис. 2, табл. 2). Альбедо снега на леднике наиболее высокое — 0.44, альбедо снежника в краевой части ниже — 0.35. Отражающая способность влажного фирна еще ниже — 0.27, а у ручьев на ледниковой поверхности — 0.11. Величина альбедо песка на влажном льду сопоставима с альбедо сухой морены и составляет 0.09.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные полевые работы показали, что вследствие особенности конфигурации долины ледника Некрасова, ее затеняемости в утренние и вечерние часы, основное поступление солнечной радиации к поверхности в июле приходится на интервал времени с 9 до 18 часов, при этом суточный ход величин суммарной солнечной радиации аппроксимируется параболой. Суточная сумма суммарной солнечной радиации, определенная по этой параболе, составляет 26.6 МДж/м², тогда как максимально возможная суточная сумма суммарной солнечной радиации в июле для 50° с.ш. составляет порядка 31 МДж/м² (Кондратьев, 1965).

Закрытость горизонта в точке измерений суммарной радиации (точка 1 согласно рис. 1) составляет от 9° до 32° (среднее 22°); для сравнения: на леднике в точке 2 закрытость ниже, от 5° до 31° (среднее 18°) (рис. 4). Закрытость горизонта в точках определяли с использованием программы ArcGIS и цифровой модели рельефа района.

Учитывая рассчитанное по полученным данным среднее суточное значение поступающей суммарной радиации, можно оценить величину поступающей радиации за месяц (июль) (Q_B): при отсутствии облачности оно будет составлять порядка 825 МДж/м². Чтобы можно было сопоставить результат с известными в литературе данными фактических наблюдений, необходимо учесть облачность. Общая



Рис. 3. Типы поверхностей на леднике Некрасова и в долине (фото сделано 17.07.2023). а — краевая часть ледника и склон долины; б — ледник Некрасова.

Fig. 3. Types of surfaces on the Nekrasov glacier and in the valley (photo made 17.07.2023). а — edge part of the glacier and the valley slope; б — the Nekrasov glacier.

Таблица 1. Альbedo внеледниковых поверхностей**Table 1.** The albedo of non-glacial surfaces

Дата	Время	Альbedo внеледниковых поверхностей		
		Снежник	Морена (сухая)	Морена и мох
14.07.2023	10:45	0.36	0.10	0.13
	12:48	0.38	0.10	0.11
	14:40	0.41	0.09	0.11
	16:45	0.42	0.11	0.12
	18:36	0.40	0.08	0.09
15.07.2023	10:20	0.35	0.10	0.11
	12:48	0.40	0.09	0.10
	14:50	0.34	0.08	0.07
	18:06	0.49	0.11	0.13
Среднее		0.39	0.10	0.11
<i>max значение</i>		<i>0.49</i>	<i>0.11</i>	<i>0.13</i>
<i>min значение</i>		<i>0.34</i>	<i>0.08</i>	<i>0.07</i>

Таблица 2. Альbedo различных типов поверхностей ледника Некрасова**Table 2.** The albedo of different surface types of the Nekrasov glacier

Дата	Альbedo типов поверхностей на леднике Некрасова				
	Снег на леднике	Влажный фирн	Песок на влажном льду	Ручей на леднике	Снежник
17.07.2023	0.43	0.28	0.09	0.11	0.35
24.07.2023	0.47	0.26	0.11	0.11	-
Среднее	0.44	0.27	0.09	0.11	0.35

облачность (n) за период 11–31.07.2023 (экспедиционные измерения были начаты 11 июля) составляла 4.7 балла (или 0.49 в долях от единицы) — ее же приняли как среднюю за июль. Расчет выполнен по формуле [8]:

$$Q = Q_g \times (1 - 0.38 \times (1 + n)) \times n. \quad (3)$$

Тогда оцененная величина месячной суммы суммарной радиации (Q) за июль с учетом наличия облачности составляет 596 МДж/м². Для сравнения: средняя месячная многолетняя величина суммарной солнечной радиации в Кош-Агаче в июле составляет 690 МДж/м² согласно [7]. В то же время, согласно исследованию (Севастьянов, 2020), месячная сумма суммарной радиации в Кош-Агач достигает 725 МДж/м², а для Алтае-Саянской горной страны в целом варьирует от 570 до 750 МДж/м² в зависимости от конкретного пункта измерений. С учетом горизонтальных градиентов (Севастьянов, 2020) относительно станции Кош-Агач величина

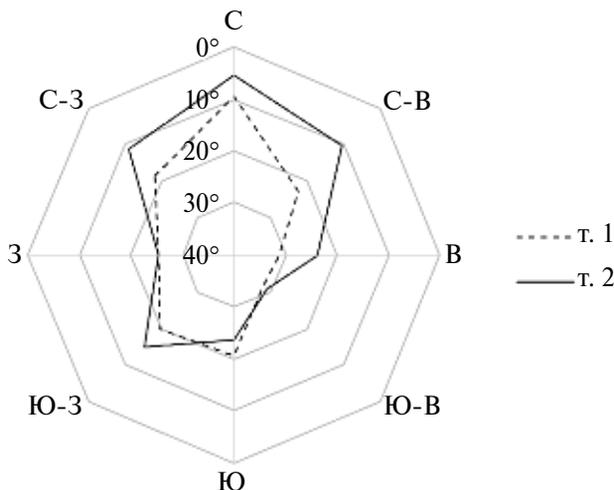


Рис. 4. Закрытость горизонта в точках актинометрических измерений. Нумерация точек соответствует представленной на рис. 1.

Fig. 4. The sky view in actinometric measurements points. The points numbering corresponds to the one shown in Fig. 1.

суммарной солнечной радиации в долине Некрасова в июле будет составлять порядка 742 МДж/м².

Полученные величины альbedo природных поверхностей исследуемой территории варьируют от 0.44 (снег на леднике) до 0.09 (песок на влажном льду). С одной стороны, большая отражательная способность характерна для снежно-ледовых поверхностей, с другой стороны, альbedo сухих поверхностей выше, чем у аналогичных влажных (песок на влажном льду — 0.09, сухая морена — 0.11; снег на леднике — 0.44, влажный фирн — 0.27, ручей на леднике — фактически переувлажненный снег и фирн — 0.11). Различие в величине альbedo снега на леднике и снежников, вероятно, обусловлено следующим: снег на леднике практически не загрязнен, тогда как снежники — и в краевой части ледника, и в долине — покрыты сверху мелкой песчаной пылью, выносимыми с морены частицами. Указанные выводы в целом согласовываются с общеизвестными закономерностями и характерными величинами для типов ледниковых поверхностей [4; 5], хотя и имеются некоторые отличия (табл. 3); также несколько различаются формулировки названий самих типов. Рассчитанное альbedo снежников сопоставимо с представленным в литературе для тающего и загрязненного [5] и влажного [4] снега. Величина альbedo влажного фирна занижена: близка к нижнему значению диапазона по [5]; отметим, что в [4] величина альbedo фирна приводится не для влажного, а для случая слабозагрязненного фирна, что, вероятно, и объясняет такое различие в полученном результате. Альbedo загрязненного льда (песка на льду) в 2 раза ниже литературного значения [4]; это может быть связано с тем, что песок и сам лед на момент измерений, пришедшихся на период активной абляции, находились во влажном состоянии. Альbedo морены практически не отличается от табличных [5] значений. Случай ручья, сформировавшегося на поверхности ледника, в указанных публикациях не рассматривался.

Наибольшую площадь ледника Некрасова, согласно визуальным экспедиционным оценкам, занимали следующие типы поверхностей: влажный фирн, снег

на леднике и снежники; среднее альbedo этих поверхностей будет характеризовать альbedo ледника в целом. Вычисленное по материалам измерений, оно составило 0.35. На момент подготовки статьи спутниковые снимки MODIS за июль 2023 г. отсутствовали в доступе, однако, согласно снимкам за июль 2022 г., также охватывавший период абляции, величина альbedo ледника составляла 0.36. Иными словами, результаты оценок по материалам полевых работ и спутниковым снимкам не противоречат друг другу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в долине ледника Некрасова данные о величине альbedo природных поверхностей и суточном ходе суммарной солнечной радиации не противоречат данным актинометрических наблюдений, представленным в литературе. Величины альbedo, определенные для различных типов природных поверхностей (морена, загрязненный лед, фирн и др.), могут быть полезны при выполнении различных оценок или расчетов как собственно в долине ледника Некрасова, так и в других горных территориях Алтая — в силу большой распространенности указанных поверхностей для этого района. В то же время полученные результаты измерений суммарной солнечной радиации характеризуют ее фактические величины непосредственно в точке измерений в долине ледника Некрасова. Эти данные представляют интерес в том числе потому, что были получены здесь впервые. С одной стороны, они являются уникальными для конкретной точки выбранной долины, с другой стороны — являются некоторым вкладом в общий объем актинометрических измерений в горных областях, расширяя географию измерений в целом, а также дополняя представления о современных природных условиях Алтая.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-67-00020 “Изменения климата, ледников и ландшафтов Алтая в прошлом, настоящем и будущем как осно-

Таблица 3. Соответствие величин альbedo различных типов поверхностей: по данным полевых работ и по литературным данным

Table 3. Correspondence between albedo of different surface types: according to field data and to published data

По данным полевых работ		Альbedo по литературным данным		
Тип поверхности	Альbedo	[5]	[4]	[8]
Снег на леднике	0.44	0.30–0.65		-
Снежник (в долине)	0.39		0.47	-
Снежник (у ледника)	0.35	0.30–0.60		-
Влажный фирн	0.27	0.30–0.45	0.47	-
Ручей на леднике	0.11	-	-	-
Морена и мох (сухие)	0.11		-	13–14
Морена (сухая)	0.10	0.12–0.15	-	-
Песок на влажном льду (загрязненный лед)	0.09	-	0.17	-

ва модели адаптации населения внутриконтинентальных горных районов Евразии к климатообусловленным изменениям среды”. Авторы благодарят Банцева Д.В., Ганюшкина Д.А. и Свирипова С.С. за помощь в организации и выполнении экспедиционных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавский Д. М., Прохорова У. В., Иванов Б. В., Янжура А. С., Куприков Н. М., Куратов М. В. Полевые испытания методики фотограмметрической оценки альbedo снежно-ледниковых поверхностей // Исследование Земли из космоса. 2019. № 4. С. 18–28. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019418-28>
2. Заключение о состоянии и работе метеорологической, актинометрической и теплобалансовой сетей Росгидромета в 2022 году // voeikovmgo.ru: [сайт] / Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. СПб., [2022]. URL: http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2023/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_2022.pdf (дата обращения: 05.11.2023).
3. Кондратьев К. Я. Актинометрия / Монография. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 691 с.
4. Коновалов В. Г. Таяние и сток следников в бассейнах рек Средней Азии. Под ред. Сулова В. Ф. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 238 с.
5. Красс М. С., Мерзликін В. Г. Радиационная теплофизика снега и льда. Монография. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 261 с.
6. Севастьянов В. В. Радиационные факторы климатообразования Алтае-Саянской горной области в период современных изменений климата // Геосферные исследования. 2020. № 1. С. 102–115. <https://doi.org/10.17223/25421379/14/8>
7. Севастьянов В. В., Андрейчик М. Ф. Радиационный режим Алтае-Саянской горной страны // Вестник Тувинского государственного университета. Естественные и сельскохозяйственные науки. 2011. № 2, вып. 9. С. 116–121.
8. Сивков С. И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1968. 232 с.
9. Торопов П. А., Михаленко В. Н., Кутузов С. С., Морозова П. А., Шестакова А. А. Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // Лед и снег. 2016. Т. 56, № 1. С. 5–19.
10. Торопов П. А., Шестакова А. А., Полохов А. А., Семенова А. А., Михаленко В. Н. Особенности летнего метеорологического режима Западного плато Эльбруса // Лед и снег. 2020. Т. 60, № 1. С. 58–76.
11. Торопов П. А., Шестакова А. А., Смирнов А. М., Поповнин В. В. Оценка компонентов теплового баланса ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) в период абляции в 2007–2015 годах // Криосфера Земли. 2018. Т. 22, № 4. С. 42–54.
12. Google Earth Engine, данные спутниковых снимков MODIS MOD10A1.006 Terra Snow Cover Daily Global500m // [Earthengine.google.co](http://earthengine.google.co): [сайт]. URL: <https://earthengine.google.com/> (дата обращения: 28.09.2021).
13. Litt M., Sicart J.-E., Six D., Wagnon P., Helgason W. D. Surface-layer turbulence, energy balance and links to atmospheric circulations over a mountain glacier in the French Alps // The Cryosphere. 2017. Vol. 11. P. 971–987.
14. Rohrer M. B., Braun L. N. Long-Term Records of Snow Cover Water Equivalent in the Swiss Alps // Nordic Hydrology. 1994. № 25. P. 65–78.
15. Toropov P. A., Shestakova A. A., Smirnov A. M. Methodological aspects of heat balance components estimation on mountain glaciers // Russian Journal of Earth Sciences. 2017. Vol. 17, ES4002.

Results of Actinometric Measurements in the Valley of the Nekrasov Glacier

M. R. Kuznetsova^{1, *}, G. V. Pryakhina^{2, **}, V. A. Rasputina^{2, ***}, D. S. Zyryanova^{2, ****}

¹Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*E-mail: rotefliege@mail.ru

**E-mail: g65@mail.ru

***E-mail: lerasputina88@gmail.com

****E-mail: levienche13@gmail.com

Abstract. Results of field actinometric measurements that were obtained in July 2023 in the valley of Nekrasov mountain glacier (the South Chujsky Range, Altai) are shown in the paper. Values of total incoming and of reflected solar radiation were measured; field works were carried out between 14.07.2023 and 27.07.2023, the pyranometer “Peleng SF-06” was used. Expressed daily cycle of the total solar radiation is found and approximated by a parabola; major variations of incoming radiation in the morning (9 a.m.) and in the evening (6 p.m.) are caused by shading of the relief. The albedo values of nature surfaces in the valley of Nekrasov glacier are determined: snowfield in the valley (0.39), dry moraine without moss (0.10) and with moss (0.11), snow cover on the glacier (0.44), snowfield in the edge part of glacier (0.25), wet firn (0.27), sand on wet ice (0.09), stream on the glacier (0.11).

Keywords: solar radiation, albedo of surfaces, mountain glaciers, pyranometer, Altai

REFERENCES

1. Zhuravskij D. M., Proxorova U. V., Ivanov B. V., Yanzhura A. S., Kuprikov N. M., Kurapov M. V. Polevye ispytaniya metodiki fotogrammetricheskoj ocenki al'bedo snezhno-lednikovyx poverxnostej // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2019. № 4. S. 18–28. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019418-28>
2. Zaklyuchenie o sostoyanii i rabote meteorologicheskoy, aktinometricheskoy i teplobalansovoy setej Rosgidrometa v 2022 godu // voeikovmgo.ru: [online] / Glavnaya geofizicheskaya observatoriya im. A. I. Voejkova. SPb, [2022]. URL: http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2023/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_2022.pdf (дата обращения: 05.11.2023).
3. Kondrat'ev K. Ya. Aktinometriya / Monografiya. L.: Gidrometeoizdat, 1965. 691 s.
4. Kononov V. G. Tayanie i stok s lednikov v bassejnax rek Srednej Azii. Pod red. Suslova V. F. L.: Gidrometeoizdat, 1985. 238 s.
5. Krass M. S., Merzlikin V. G. Radiacionnaya teplofizika snega i l'da. Monografiya. L.: Gidrometeoizdat, 1990. 261 s.
6. Sevast'yanov V. V., Andrejchik M. F. Radiacionnyj rezhim Altae-Sayanskoj gornoj strany // Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennyye i sel'skoxozyajstvennyye nauki. 2011. № 2, vyp. 9. S. 116–121.
7. Sevast'yanov V. V. Radiacionnye faktory klimatoobrazovaniya Altae-Sayanskoj gornoj oblasti v period sovremennykh izmenenij klimata // Geosfernye issledovaniya. 2020. № 1. S. 102–115. <https://doi.org/10.17223/25421379/14/8>
8. Sivkov S. I. Metody rascheta karakteristik solnechnoj radiacii. L.: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1968. 232 s.

9. *Toropov P. A., Mixalenko V. N., Kutuzov S. S., Morozova P. A., Shestakova A. A.* Temperaturnyj i radiacionnyj rezhim lednikov na sklonax El'brusa v period ablyacii za poslednie 65 let // *Led i sneg*. 2016. T. 56, № 1. S. 5–19.

10. *Toropov P. A., Shestakova A. A., Polyuxov A. A., Semenova A. A., Mixalenko V. N.* Osobennosti letnego meteorologicheskogo rezhima Zapadnogo plato El'brusa // *Led i sneg*. 2020. T. 60, № 1. S. 58–76.

11. *Toropov P. A., Shestakova A. A., Smirnov A. M., Popovnin V. V.* Ocenka komponentov teplovogo balansa lednika Dzhankuat (Central'nyj Kavkaz) v period ablyacii v 2007–2015 godax // *Kriosfera Zemli*. 2018. T. 22, № 4. S. 42–54.

12. Google Earth Engine, satellite images data MODIS MOD10A1.006 Terra Snow Cover Daily Global500m // *Earthengine.google.co*: [online]. Available at: <https://earthengine.google.com/> (Accessed 28.09.2021).

13. *Litt M., Sicart J.-E., Six D., Wagnon P., Helgason W. D.* Surface-layer turbulence, energy balance and links to atmospheric circulations over a mountain glacier in the French Alps // *The Cryosphere*. 2017. Vol. 11. P. 971–987.

14. *Rohrer M. B., Braun L. N.* Long-Term Records of Snow Cover Water Equivalent in the Swiss Alps // *Nordic Hydrology*. 1994. № 25. P. 65–78.

15. *Toropov P. A., Shestakova A. A., Smirnov A. M.* Methodological aspects of heat balance components estimation on mountain glaciers // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2017. Vol. 17, ES4002.

УДК 551.435.34 : 504.056 : 004.946

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕТРОСПЕКТИВНОГО СФЕРИЧЕСКОГО ВИДЕОДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ СБОРА ВИЗУАЛЬНЫХ ДАННЫХ О ПОСЛЕДСТВИЯХ ПРОЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ БЕРЕГОВЫХ ПРОЦЕССОВ (НА ПРИМЕРЕ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА АЗОВСКОГО МОРЯ)

© 2025 г. О. А. Хорошев^{а, *}, А. А. Хорошева^{а, **}

^аФедеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,
Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: ourregion@mail.ru

**E-mail: a.horosheva@gmail.com

Поступила в редакцию 19.02.2024 г.

После доработки 25.02.2025 г.

Принята к публикации 10.03.2025 г.

Внедрение современных технологий способствует возникновению новых способов получения визуальных данных об особенностях трансформации морских и речных берегов, а также расположенных на них объектов природного и антропогенного происхождения. Приведены результаты разработки и последующего применения в пределах отдельных участков побережья Азовского моря технологии ретроспективного сферического видеодокументирования последствий проявления опасных береговых процессов. Технология базируется на использовании ретроспективного подхода к проведению съемочных работ в 360-градусном формате — панорамной видеофиксации через определенные интервалы времени одних и тех же локаций побережья. Опробование технологии произведено в пределах 13 точек и отрезков береговой зоны Таганрогского залива и дельты р. Дон в ходе экспедиций ЮНЦ РАН в период с 2019 по 2023 г. По итогам экспериментальных работ создано 13 панорамных видеоретроспектив, подробно иллюстрирующих последствия интенсивного проявления морских абразионных, оползневых, а также речных эрозионных процессов в интервале времени от нескольких месяцев до трех лет.

Ключевые слова: опасные береговые процессы, Таганрогский залив Азовского моря, дельта реки Дон, визуальные данные, иммерсивное видео, сферическое видеодокументирование, панорамная видеоретроспектива

DOI: 10.31857/S0869607125010029, EDN: LIZCKP

ВВЕДЕНИЕ

Регистрируемые в последние десятилетия и прогнозируемые в будущем изменения климата и повышение уровня Мирового океана могут способствовать усилению опасных береговых процессов (ОБП) в береговой зоне морей [2, с. 9]. В полной мере этот прогноз касается и Азовского моря — самого маленького по площади из всех морей, омывающих Россию, в пределах береговой зоны которого отмечаются активное проявление абразионных и оползневых процессов, размывы аккумулятивных тел, затопление прибрежных территорий при нагонном повышении уровня морских вод и пр. [6, с. 483]. Наибольшее влияние на разрушение берегов оказывают при-

родные факторы, наиболее значимыми из которых являются геологические условия, а также динамика вод в береговой зоне [2, с. 11]. При этом воздействие природных факторов усиливается на фоне возрастающего антропогенного воздействия, в том числе такими его проявлениями, как распашка сельскохозяйственных угодий, строительство капитальных сооружений и добыча полезных ископаемых в пределах прибрежных защитных полос [14, с. 95].

Самым крупным заливом Азовского моря является Таганрогский, протянувшийся с северо-востока на юго-запад почти на 140 км. Только в пределах Ростовской области его побережье подвержено воздействию активных абразионных и оползневых процессов на протяжении почти 90 км (без учета береговой зоны г. Таганрога и Миусского лимана) [2, с. 180], из которых 50.9 км приходится на берега, для которых характерна среднемноголетняя скорость абразии, превышающая 1 м/год. Последствия проявления ОБП выражаются в причиняемом материальном ущербе объектам жилищного строительства, хозяйственного назначения, культурного наследия и пр. При этом исследования процессов трансформации берегов, динамики разрушения расположенных на них объектов необходимы для планирования берегоукрепительных и прочих мероприятий, направленных на обеспечение безопасности населения, сохранение материальных, культурных и природных ценностей прибрежных территорий.

Необходимо отметить, что экспедиционное изучение ОБП и последствий их проявления является трудоемким и, в отдельных случаях, рискованным для полевых специалистов процессом. Внедрение новейших технологий и технических средств для сбора визуальных данных о береговых ландшафтах, природных и антропогенных процессах (спутниковые технологии, беспилотные системы, лазерное сканирование и пр.) одновременно расширяет возможности получения новой информации, повышает оперативность работ и, что немаловажно, обеспечивает безопасность труда исследователей. Перспективным для применения в натурных береговых исследованиях является и сферический (панорамный) формат VR 360° (virtual reality 360°), представляющий из себя одно из динамично развивающихся направлений в семействе технологий виртуальной реальности (VR). Его популярность, востребованность в различных хозяйственных отраслях и сферах объясняется высокой степенью визуальной достоверности передаваемых образов, запечатленных, в том числе в динамике, объектов и явлений, наличием эффекта присутствия и пр.

Применительно к рассматриваемой тематике видится актуальной разработка алгоритмов использования VR-технологий для сбора и визуализации сферической, в частности ретроспективной, видеоинформации о последствиях проявления ОБП в пределах береговой зоны поверхностных водных объектов. Таким образом, цель представленного исследования заключается в разработке и опробовании экспериментальным путем технологии ретроспективного сферического (панорамного) видеодокументирования последствий проявления ОБП в пределах отдельно взятых участков побережья Таганрогского залива Азовского моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

К традиционным методам сбора визуальной информации о компонентах окружающей среды можно отнести видеодокументирование, в результате применения которого создаются видеодокументы (видеофонограммы), считающиеся в документоведении и источниковедении разновидностью кинодокументов [3, с. 36].

В процессе проведения полевых работ в береговой зоне морей и рек на протяжении десятилетий активно используется фото- и видеодокументирование в двумерном (2D) формате. Однако, учитывая многозадачность и динамичный темп проведения комплексных экспедиций, масштабность проявления отдельных природных и антропогенных процессов в береговой зоне, неблагоприятные факторы среды и другие трудности, не всегда удается быстро и правильно выбрать подходящий ракурс 2D-съемки, зафиксировать все детали за короткий промежуток времени, отведенный для работы на точках маршрутов. В свете активного внедрения VR-технологий и создания доступных технических средств сферической видеофиксации — компактных цифровых видеокамер, позволяющих снимать иммерсивное видео в формате VR 360°, — появилась возможность расширения линейки методов сбора визуальной информации о берегах. К примеру, метод панорамного видеодокументирования состояния берегов и последствий проявления ОБП, разработанный в 2019 г. и опробованный в экспедициях ЮНЦ РАН по побережью Азовского моря (2019–2023 гг.) [2, с. 84; 13, с. 166; 14, с. 95], предполагает проведение репортажной видеосъемки в формате VR 360°, позволяющей захватывать объективами VR-видеокамер с функцией 360-градусного обзора все видимые элементы береговых ландшафтов. При необходимости из сферического видео можно извлекать 2D-фотоизображения интересующих локаций (скрин-кадры приемлемого качества). Таким образом, даже начинающий оператор получает возможность со всех ракурсов, в движении, легко и быстро документировать последствия проявления ОБП, одновременно фиксируя отдельные условия и процессы, влияющие на интенсивность разрушения берегов (направленность морских волн, проявления антропогенного воздействия, активность представителей животного мира в прибрежной полосе и др.).

В процессе изучения берегов Азовского моря на станциях наблюдения за абразией, а также на отдельных точках в пределах аккумулятивных форм рельефа, в период с 2018 по 2021 г. была впервые осуществлена видеофиксация последствий проявления ОБП с применением метода панорамного видеодокументирования [2, с. 84]. Работы были продолжены в 2022–2023 гг. в рамках экспедиционных исследований, проведенных в том числе при поддержке РГО на отдельных участках побережья Таганрогского залива, а также в дельтовой части р. Дон [7, с. 48]. Их пятилетним итогом, среди прочего, стала реализация в 2023 г. научно-просветительского мультимедийного проекта “Виртуальные видеоатласы Азовского моря: дорогами береговых экспедиций” [12], [13, с. 167], а также разработка серии сферических видеоэкскурсий [11].

Необходимо отметить, что сферическая видеосъемка эффективно используется не только в береговых исследованиях. С момента своего возникновения непривычный для многих формат VR 360° стал активно внедряться в мировую киноиндустрию [17, с. 184], области культуры и искусства [18, с. 567] и др. Обрел он свое признание и в России, будучи успешно используемым как в перечисленных выше сферах, так и в образовании, познавательном туризме [9, 10], практике криминалистики [4, с. 60], в области популяризации науки [8, 12], военной журналистике и пр.

Принимая во внимание различные, в том числе современные, сущностные трактовки понятия “технология”, изложенные в работе З.А. Литовой [5, с. 166], применительно к цели исследования более всего подходит производственное определение технологии как системы способов и средств, использование которых ведет к заданным результатам, гарантирует их количество и качество. Представленная техно-

логия ретроспективного сферического видеодокументирования должна стать простым и относительно безопасным инструментом для сбора визуальных данных о последствиях проявления ОБП. В общем виде она базируется на применении метода панорамного видеодокументирования берегов [7, с. 48; 13, с. 166], а также ретроспективном подходе к его использованию, предполагающем съемку в формате VR 360° через определенные интервалы времени одних и тех же локаций побережья, подверженных активному воздействию ОБП. Результатом опробования технологии является подготовка панорамных видеоретроспектив, визуально иллюстрирующих трансформацию берегов и состояние расположенных на них объектов. При проведении съемочных работ на побережье Азовского моря использовались коммерческие модели компактных цифровых панорамных экшен-камер. Съемки производились статичным и динамическим способами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Реализация технологии ретроспективного сферического видеодокументирования последствий проявления ОБП включает три последовательных этапа: подготовительный (полевой рекогносцировочный), полевой (съемочный) и камеральный. В рамках первого этапа проводится визуальное натурное обследование предполагаемых участков проведения съемок, в ходе которого изучаются ограничивающие работы факторы, выбираются оптимальные способы съемки, оформляются все необходимые разрешительные документы и пр. В определенных случаях первый этап может быть совмещен со вторым, к примеру, если видеодокументирование берегов предполагается осуществлять на дальних и ограниченных по времени экспедиционных маршрутах.

Второй этап реализации технологии включает ряд шагов по проведению полевых съемочных работ. Так, в процессе видеодокументирования фиксируются географические координаты начальных и конечных точек линейных отрезков берегов, в пределах которых планируется собрать визуальные данные динамическим способом, или отдельных точечных локаций. Качественная привязка к местности позволит по прошествии времени с точностью осуществить повторную видеофиксацию выбранного участка берега, который, в свою очередь, может быть изменен до неузнаваемости воздействием береговых процессов.

Съемочные работы производятся статичным или динамическим способами (в пешем ходу, с авто-, мото- или велотранспорта, маломерных судов, а также с беспилотных аппаратов). К примеру, в августе 2021 г. была осуществлена панорамная видеофиксация последствий проявления ОБП на точке в пределах восточного коренного берега песчано-ракушечной косы Азовского моря — Долгой (рис. 1).

Наиболее оптимальной на данной локации представлялась съемка в пешем ходу со стороны моря, от которой пришлось отказаться из соображений безопасности. Поэтому сбор видеоинформации был произведен альтернативными способами: статичным с берега (рис. 1а, б) при помощи компактной цифровой VR 360°-видеокамеры Insta360 One X, закрепленной на моноштативе, и динамическим (рис. 1в) — с помощью надводного беспилотника “Водомерка”, оснащенного аналогичным съемочным оборудованием. В результате удалось зафиксировать со всех ракурсов не только последствия абразионного разрушения берега, но и ряд

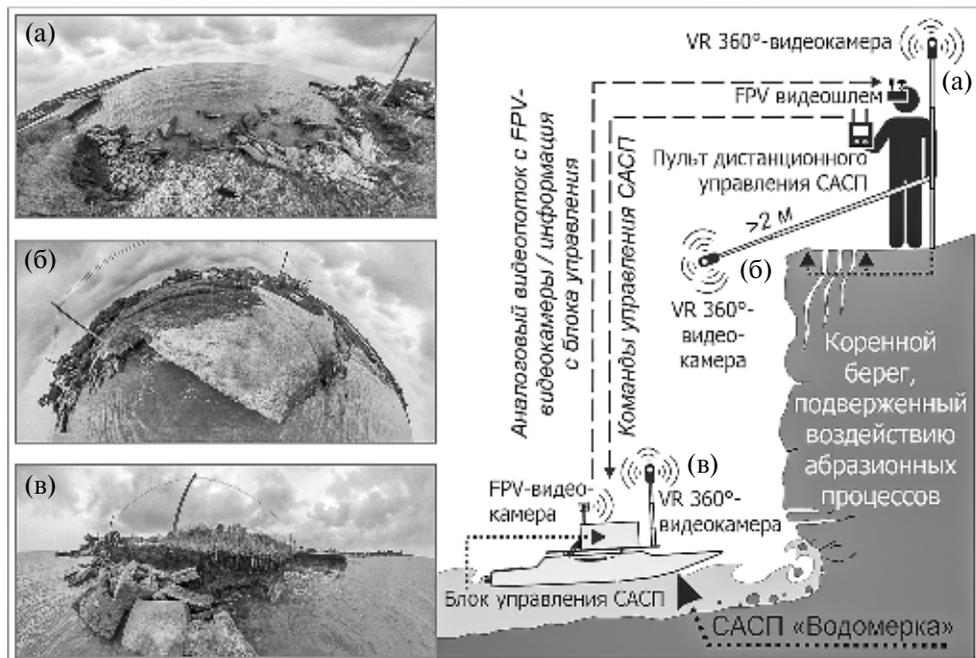


Рис. 1. Пример различных способов панорамного видеодокументирования последствий абразии на участке восточного коренного берега косы Долгой и результаты съемки в виде скрин-кадров: (а), (б) — съемки в статичном режиме с моноштатива; (в) — съемки в динамическом режиме со сверхмалого автономного самоходного плавсредства (САСП) “Водомерка”.

Fig. 1. Examples of different methods of panoramic video documentation of the consequences of abrasion on the eastern root bank of the Dolgaya Spit and the results of shooting in the form of screen-captures: (a), (b) — shooting in static mode from a mono tripod; (c) — shooting in dynamic mode from the ultra-small autonomous self-propelled watercraft “Vodomerka”.

процессов, влияющих на его интенсивность, вызванных как природными, так и антропогенными факторами.

Съемки рекомендуется производить на максимальных настройках детализации и частоты изображения, а продолжительность отснятых видеофрагментов для удобства обработки желательно ограничивать 3–5 минутами. При видеодокументировании верхних ярусов клифов и находящихся на них объектов удобно использовать телескопические моноштативы длиной не менее двух метров, позволяющие обезопасить от падения с высоты оператора, работающего в близости от кромок береговых уступов (рис. 16).

Третий — заключительный — этап предполагает выполнение работ по конвертации отснятого видеоматериала в формат выбранного медиаконтейнера, его обработку, монтаж и озвучивание, добавление к видеоролику элементов дополнительной визуализированной информации [15, с. 47], метаданных и размещение готового видеофайла панорамной видеоретроспективы в электронном пространстве.

Первым делом отснятое камерами линейки Insta в INSV-формате сферическое видео конвертируется, например, в формат медиаконтейнера MPEG-4, при этом оригинальные видеофайлы сохраняются на полупроводниковых или магнитных носителях для возможности их использования в будущем. С помощью одной

из программ видеомонтажа, к примеру Wondershare Filmora, съемочный материал объединяется в хронологической последовательности по заранее подготовленному сценарию в единый видеоролик (видеоретроспективу), который при необходимости дополняется фрагментами 2D-видео, фотоизображениями, картосхемами, элементами 3D-графики, текстовыми титрами, звуковым сопровождением и пр. В смонтированный VR 360°-видеофайл с помощью программы Spatial Media Metadata Injector записываются метаданные, без которых он не будет корректно воспроизводиться в электронном пространстве. Финишным шагом является размещение панорамной видеоретроспективы на площадках онлайн-сервисов, поддерживающих потоковое воспроизведение сферического видео (к примеру, Rutube или YouTube), тематических интернет-сайтах или в облачных хранилищах и ГИС-приложениях. С примером размещения сферического видео можно ознакомиться на YouTube-странице студии DonCyberGeo ЮНЦ РАН [11].

Экспериментальные работы по применению технологии были произведены в ходе экспедиций ЮНЦ РАН по береговой зоне Азовского моря и дельте р. Дон (2018–2023) [2, с. 84; 7, с. 48; 14, с. 95]. Для локаций № 1–7 (рис. 2а), расположенных на участках берегов Таганрогского залива (со среднемноголетней скоростью абразии более 1 м/год) в пределах Ростовской области, и № 8–10 (рис. 2б), находящихся в Краснодарской части его побережья, разработаны разновременные — как двух-трехлетние, так и с более коротким интервалом съемки, панорамные видеоретроспективы, иллюстрирующие трансформацию берегов и состояние расположенных на них объектов. Еще две видеоретроспективы, отражающие последствия речных эрозионных процессов, были смонтированы для локаций № 11–12 (рис. 2в), расположенных в Донской дельте. С использованием собранных в 2020–2022 гг. визуальных данных о береговых ландшафтах [7, с. 49] создана видеоретроспектива двухкилометрового участка линейного водоема в дельте р. Дон — гирла Свиное (рис. 2в), позволившая зафиксировать особенности трансформации береговых ландшафтов за трехлетний период.

На скрин-кадрах панорамной видеоретроспективы (рис. 3) представлена информация о трансформации берегового обрыва в с. Петрушино Ростовской области (локация № 4 на рис. 2), а также состоянии объектов рекреационной инфраструктуры на прилегающих к нему участках. Съемки были выполнены у подножия берегового уступа (клифа) с декабря 2022 по декабрь 2023 г. Сравнение первого (рис. 3а) и второго снимков (рис. 3б) показывает, что задернованный, поросший деревьями склон, как и прилегающая к нему терраса, сохраняли свою целостность, несмотря на регулярное воздействие волн и ледовых образований. Также удалось зафиксировать детали, казавшиеся во время полевой фотофиксации в ноябре 2023 г. несущественными, в частности, факт размещения на прилегающих к склону участках беседок. Последующими съемками (06.12.2023), проведенными на данной точке после сильного штормового нагона, случившегося 26–27.11.2023, выявлены как факты разрушения самого клифа с образованием волноприбойных ниш и полного размыва прилегающей к нему террасы, так и свидетельства уничтожения расположенных западнее беседок (рис. 3в).

В мае — июне 2023 г. были произведены работы по сферическому видеодокументированию на протяжении 50,9 км всех выявленных специалистами ЮНЦ РАН участков побережья Таганрогского залива в пределах Ростовской области (за исключением берегов г. Таганрога и Миусского лимана), для которых характерна среднемноголетняя скорость абразии более 1 м/год, с созданием непрерывных динамических VR 360°-видеобразов береговых клифов (от начальной до конечной точки

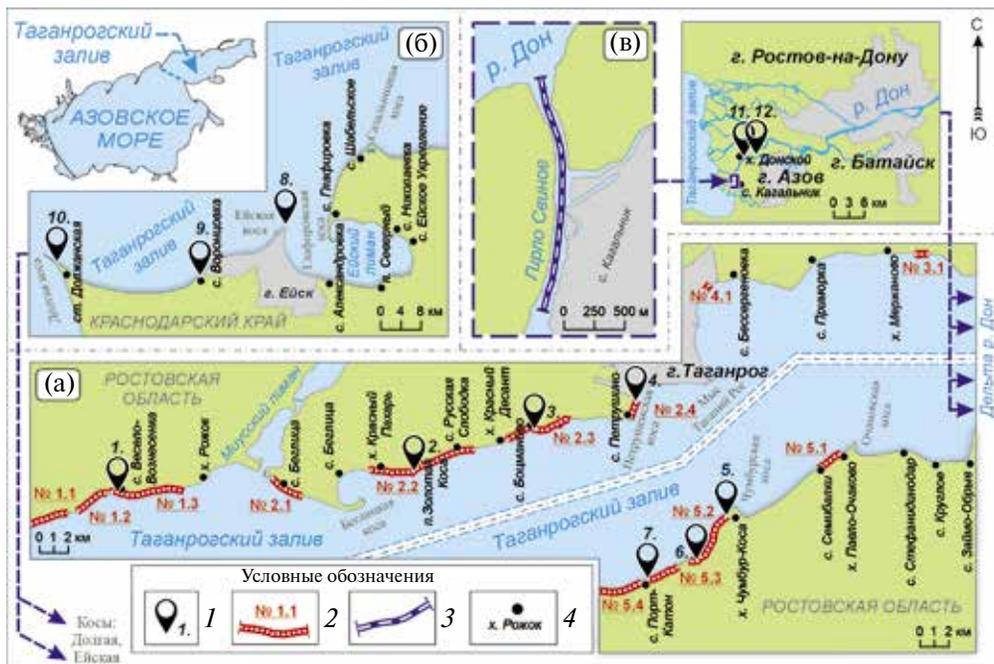


Рис. 2. Схема расположения отдельных локаций и участков побережья, для которых были разработаны разновременные панорамные видеоретроспективы и непрерывные динамические VR 360°-видеообразы, иллюстрирующие последствия проявления ОБП: (а) — береговая зона Таганрогского залива в пределах Ростовской области; (б) — береговая зона Таганрогского залива в пределах Краснодарского края; (в) — дельта р. Дон. 1 — локации береговой зоны Таганрогского залива и дельты р. Дон, для которых были разработаны панорамные видеоретроспективы; 2 — участки береговой зоны Таганрогского залива со среднегоголетней скоростью абразии более 1 м/год; 3 — участок гирла Свиного; 4 — сельские населенные пункты.

Fig. 2. Layout of individual locations and coastal areas for which multi-temporal panoramic video retrospectives and continuous dynamic VR 360° video images were developed, illustrating the consequences of hazardous coastal processes: (а) — coastal zone of the Taganrog Bay within the Rostov Region; (б) — coastal zone of the Taganrog Bay within the Krasnodar Region; (с) — Don River delta. 1 — locations of the coastal zone of the Taganrog Bay and the Don River delta, to which panoramic video retrospectives were developed; 2 — areas of the coastal zone of Taganrog Bay with an average annual abrasion rate of more than 1 m/year; 3 — section of the Svinoye girlo; 4 — rural settlements.

каждого участка) (рис. 2а). Серия панорамных видеоретроспективов, которые планируется создать после повторного проведения съемок на данных участках побережья, позволит проанализировать информацию о видимых последствиях проявления абразионных и оползневых процессов.

В процессе рекогносцировочного обследования берегов залива в 2023 г. метод панорамного видеодокументирования также применялся для сбора визуальных данных о состоянии отдельных типов конструкций берегоукрепительных сооружений. С помощью закрепленной на моноштативе экшен-камеры Insta360 One X3, передающей потоковое цифровое сферическое видеоизображение в режиме реального времени через Wi-Fi соединение, удалось обследовать и видеодокументировать образовавшиеся полости в сооружениях (откосах) из железобетонных плит и блоков, защищающих морские берега в г. Таганроге и с. Петрушино Ростовской области (рис. 4).

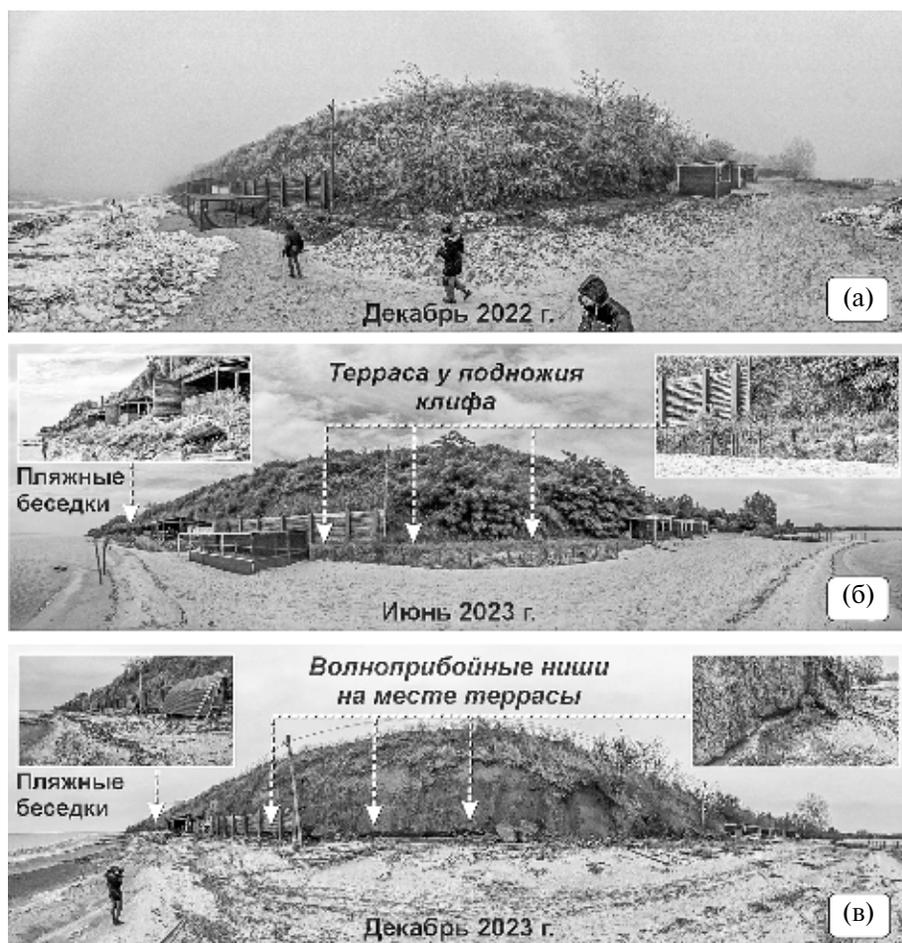


Рис. 3. Скрин-кадры панорамной видеоретроспективы, иллюстрирующей годовую динамику абразионного разрушения участка берега в с. Петрушино: (а, б) — 24.12.2022 и 02.06.2023 — обрыв задернован, берег не подвержен активной абразии, присутствие террасы у подножия клифа; (в) — 06.12.2023 — значительное разрушение берега с образованием волноприбойных ниш, терраса у подножия клифа полностью смыта штормовым нагоном вод 26–27.11.2023, также разрушена большая часть пляжных беседок.

Fig. 3. Screenshots from a panoramic video retrospective illustrating the annual dynamics of abrasion destruction of a section of the coast in the Petrushino village: (a, b) — 12/24/2022 and 06/02/2023 — the cliff is turfed, the coast is not subject to active abrasion, the terrace is present at the foot of the cliff; (c) — 12/06/2023 — significant destruction of the coast with the formation of wave-breaking niches, the terrace at the foot of the cliff was completely washed away by the storm surge of water on 11/26–27/2023, most of the beach pavilions were also destroyed.

Необходимо отметить, что некоторые из полученных сферических видеодокументов имели ряд недостатков. От появления первой в истории кинематографической системы, позволяющей снимать 360-градусные фильмы [1, с. 21], до выхода в 2016 г. на рынок высоких технологий [4, с. 60] массовых, удобных для использования в условиях полевых работ цифровых панорамных видеокамер прошло больше века. При опробовании технологии ретроспективного сферического видеодокументирования авторами использовались модели современных (2016–2022 гг. выпуска), относящихся к сегменту любительских экшен-камер. На кадрах видеодокументов, отсня-

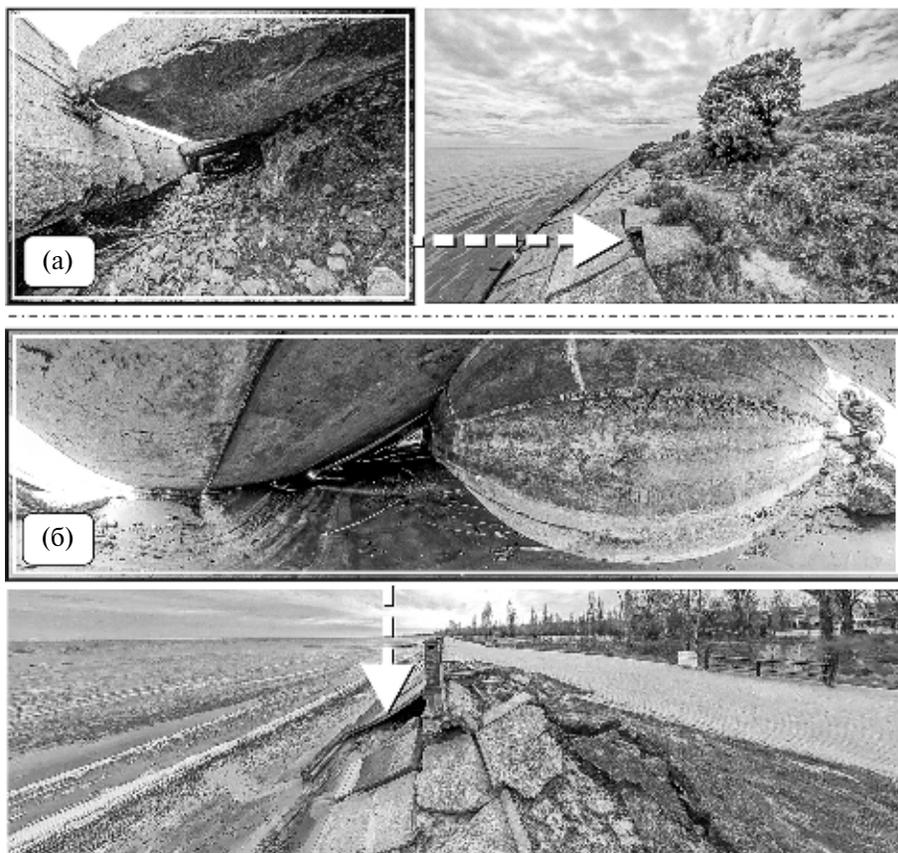


Рис. 4. Скрин-кадры сферического видео, на которых отражены последствия разрушения морем конструкций берегоукрепительных сооружений: (а) — внутренние полости, образовавшиеся в откосе из железобетонных плит в с. Петрушино (02.06.2023); (б) — внутренние полости, образовавшиеся в откосе из железобетонных плит на набережной в г. Таганроге (06.12.2023).

Fig. 4. Screenshots of a spherical video shows the consequences of the sea destruction of bank protection structures: (a) — internal cavities formed in a slope of reinforced concrete slabs in the Petrushino village (06/02/2023); (b) — internal cavities formed in a slope made of reinforced concrete slabs on the embankment in Taganrog (12/06/2023).

тых в 2018–2022 гг. с их помощью, в отдельных случаях был отмечен ряд недостатков: цифровой шум на видеоизображениях, полученных в условиях недостаточной освещенности; искажение изображений по периметру угла обзора объективов; присутствие “стыков” на сшиваемых процессором камер видеоизображениях. Некоторые из перечисленных дефектов можно заметить и на кадрах первой, созданной в 2021 г. видеоретроспективы (рис. 5). Данный видеоролик демонстрирует в хронологической последовательности морфологические изменения за четырехлетний период крайней точки дистальной оконечности косы Долгой (локация № 10 на рис. 2).

С учетом того, что информативность сферического видео напрямую зависит от его четкости и детализации, что, в свою очередь, обеспечивается настройками разрешения камеры (рекомендуется не менее 4096×2048 пикселей), возникают сложности с потоковой передачей и хранением видеофайлов, обладающих большим размером. В настоящее время над данной проблемой активно работают, в частности,



Рис. 5. Пример панорамной видеоретроспективы, иллюстрирующей морфологические изменения оконечности косы Долгой в период с 2018 по 2021 г. (со сферическим видеороликом можно ознакомиться, отсканировав QR-код).

Fig. 5. Example of panoramic video retrospective illustrating morphological changes at the tip of the Dolgaya Spit in the period from 2018 to 2021 (you can view the spherical video by scanning the QR code).

ирландские специалисты [16, с. 29379], изучающие вопросы применения различных приемов, в том числе цифрового кодирования, для сжатия иммерсивного видео с сохранением его качества.

Несмотря на относительную новизну формата VR 360° и имеющиеся у сферического видео недостатки, создаваемые с его помощью видеоретроспективы могут стать полезным источником одновременных визуальных данных о последствиях трансформации берегов, дополняющих материалы, полученные с помощью фото- и видеофиксации в двумерном формате. Экспериментальным путем отмечено, что в условиях введения временных ограничений на гражданское использование беспилотных летательных аппаратов панорамное видеодокументирование верхних ярусов береговых клифов и расположенных на них сооружений является достаточно информативным способом сбора визуальной информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования была разработана и опробована экспериментальным путем технология ретроспективного сферического видеодокументирования, представляющая собой простой, оперативный и безопасный для работы в близости от кромок береговых уступов способ сбора визуальных данных о последствиях проявления ОБП: поверхностных особенностях трансформации береговых ландшафтов, текущем состоянии объектов жилищного строительства, хозяйственного назначения, культурного наследия, берегоукрепительных сооружений и пр.

Опробование технологии было произведено в период с 2019 по 2023 г. на 13 локациях (точках и отрезках) береговой зоны Таганрогского залива и дельты р. Дон в ходе экспедиций ЮНЦ РАН. По итогам экспериментальных работ разработана серия из 13 панорамных видеоретроспектив, иллюстрирующих последствия интенсивного проявления морских абразионных, оползневых, а также речных эрозионных процессов.

Видеодокументирование в формате VR 360° в совокупности с применением ретроспективного подхода к проведению съемочных работ позволяет расширить возможности получения визуальной информации о последствиях ОБП традиционными способами. На кадрах сферических видеодокументов фиксируются в движении и одновременно со всех ракурсов отдельные условия и процессы, влияющие на интенсивность проявления, к примеру, абразионных процессов. При этом через знакомство с визуальными образами берегов, собранных в разновременные видеоретроспективы, можно отметить неприметные на первый взгляд детали, помогающие выявить предпосылки и факторы, влияющие на активизацию отдельных типов склоновых процессов. Панорамное видеодокументирование также позволяет получать визуальные данные о состоянии верхних ярусов береговых клифов и расположенных на них объектов, что имеет актуальность на фоне временного запрета на гражданское использование в регионах Приазовья и Нижнего Дона беспилотных летательных аппаратов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке ВОО “Русское географическое общество” (проекты: № 07/2020-И, № 40/2022-И, № 04/2024-И “География малых рек и лиманов Приазовья:...”), а также в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № государственной регистрации 125011700416-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беленький И. В.* Лекции по всеобщей истории кино: Годы беззвучия: Кн. 1, 2: Учеб. пособие. М.: ГИТР, 2008. 416 с.
2. *Бердников С. В., Беспалова Л. А., Хаванский А. Д., Хорошев О. А., Магаева А. А., Мисиров С. А., Меринова Ю. Ю., Кулыгин В. В., Цыганкова А. Е., Иошпа А. Р., Сорокина В. В., Лихтанская Н. В., Булышева Н. И., Шохин И. В., Савикин А. И., Оганесян А. А., Смирнова Е. А.* Опасные абразионные и оползневые процессы в береговой зоне Азовского моря и социально-экономические последствия их проявлений. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2022. 288 с.
3. *Еременко В. Т., Усачева О. И.* Документоведение: учебное пособие для высшего профессионального образования. Орел: Госуниверситет — УНПК, 2015. 254 с.
4. *Еремченко В. И.* Сферическая видеофиксация как перспективное направление развития криминалистической видеозаписи // Общество и право. 2020. Т. 73, вып. 3. С. 59–63.
5. *Литова З. А.* Сущность понятия “Технология” на современном этапе. Ученые записки // Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2019. Т. 50, вып. 2. С. 164–172.
6. *Матишов Г. Г., Беспалова Л. А., Ивлиева О. В., Цыганкова А. Е., Кропянко Л. В.* Азовское море: современные абразионные процессы и проблемы берегозащиты // Доклады академии наук. М.: Изд-во “Российская академия наук”. 2016. Т. 471, вып. 4. С. 483–486. <https://doi.org/10.7868/S086956521634020X>
7. *Матишов Г. Г., Хорошев О. А., Сушко К. С., Степаньян О. В., Малик Ю. В.* Нижний Дон: уникальная речная артерия и ее экологические проблемы // Природа. 2023. Т. 1291, вып. 3. С. 36–50. <https://doi.org/10.7868/S0032874X23030043>
8. Наука в формате 360° // Мультимедийный проект Российского научного фонда: [сайт]. URL: <https://360.rscf.ru/#projects> (дата обращения: 20.01.2024).
9. Образовательные экскурсии VR 360: канал YouTube. [2018]. URL: <https://www.youtube.com/c/Путешествия360/videos> (дата обращения: 20.01.2024)

10. Русское географическое общество: [сайт]. URL: <https://rgo.ru/activity/360-vr/> (дата обращения: 20.01.2024).
11. Студия DonCyberGeo Южного научного центра РАН: канал YouTube. [2018]. URL: <https://www.youtube.com/@dncybergegeo4840/videos> (дата обращения: 05.12.2023).
12. Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук: [сайт]. URL: https://www.ssc-ras.ru/virtualnye_vr_360_videoatlas/?search_keywords=видео (дата обращения: 05.12.2023).
13. *Хорошев О. А.* Об экспериментальном научно-просветительском проекте ЮНЦ РАН “Виртуальные (VR 360°) видеoaтласы Азовского моря: дорогами береговых экспедиций” // Материалы IV Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова “Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории Российской Федерации (Евразии)”, г. Ростов-на-Дону, 5–9 сентября 2022 г. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2022. С. 166–170.
14. *Хорошев О. А., Сушко К. С., Мисиров С. А.* Результаты выявления участков с проявлением нерационального природопользования в береговой зоне Азовского моря // Наука Юга России. 2021. Т. 17, вып. 3. С. 94–96.
<https://doi.org/10.7868/S25000640210311>
15. *Шабалин В. В.* Конструкт сферической визуализации пространства события. Развитие технологий создания современного телевизионного материала // Наука телевидения. 2019. Т. 15, вып. 3. С. 35–54.
<https://doi.org/10.30628/1994-9529-2019-15.3-35-54>.
16. *Abid Y., Togou M. A., and Muntean G.-M.* Dynamic viewport selection-based prioritized bitrate adaptation for tile-based 360° video streaming // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 29377–29392.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3157339>
17. *Godde M., Gabler F., Siegmund D., Braun A.* Cinematic Narration in VR—Rethinking Film Conventions for 360 Degrees // VAMR. 2018. Vol. 10910. P. 184–201.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-91584-5_15
18. *Hakulinen J., Keskinen T., Mäkelä V., Saarinen S., and Turunen M.* Omnidirectional video in museums — authentic, immersive and entertaining // ACE. 2017. Vol. 10714. P. 567–587.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-76270-8_39

Application of Retrospective Spherical Video Documentation Technology to Collect Visual Data on the Consequences of Hazardous Coastal Processes (Based on the Example of the Taganrog Bay of the Sea of Azov)

O. A. Khoroshev^{1,*}, A. A. Khorosheva^{1,}**

¹*Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,*

Rostov-on-Don, Russia

**E-mail: ourregion@mail.ru*

***E-mail: a.khorosheva@gmail.com*

Abstract — The introduction of modern technologies contributes to the emergence of new ways to obtain visual data on the features of the transformation of sea and river banks, as well as objects of natural and anthropogenic origin located on them. The article shows the results of the development and subsequent application of technology for retrospective spherical video documentation of the consequences of hazardous coastal processes in some areas of the Sea of Azov coast. The technology is based on the use of a retrospective approach to conducting filming work in 360-degree format — panoramic video

recording at certain intervals of time of the same coastal locations. The technology was tested on 13 points and sections of the coastal zone of the Taganrog Bay and the Don river delta during expeditions of the SSC of the RAS in the period from 2019 to 2023. Based on the results of experimental work 13 panoramic video retrospectives were created that show in detail the consequences of intensive manifestations of marine abrasion, landslide and river erosion processes in a period of time from several months to three years.

Keywords: hazardous coastal processes, Taganrog Bay of the Sea of Azov, Don River delta, visual data, immersive video, spherical video documentation, panoramic video retrospective

REFERENCES

1. *Belen'kij I. V.* Lekcii po vseobshhej istorii kino: Gody' bezzvuchiya: Kn. 1, Kn. 2: Ucheb. posobie. M.: GITR, 2008. 416 s.
2. *Berdnikov S. V., Bepalova L. A., Xavanskij A. D., Xoroshev O. A., Magaeva A. A., Misirov S. A., Merinova Yu. Yu., Kulygin V. V., Cygankova A. E., Ioshpa A. R., Sorokina V. V., Lixtanskaya N. V., Bulysheva N. I., Shoxin I. V., Savikin A. I., Oganessian A. A., Smirnova E. A.* Opasnye abraziionnye i opolznevyje processy v beregovoju zone Azovskogo morya i social'no-ekonomicheskie posledstviya ix proyavlenij. Rostov n/D: Izd-vo YuNCz RAN, 2022. 288 s.
3. *Eremenko V. T., Usacheva O. I.* Dokumentovedenie: uchebnoe posobie dlya vysshego professional'nogo obrazovaniya. Orel: Gosuniversitet — UNPK, 2015. 254 s.
4. *Eremchenko V. I.* Sfericheskaya videofiksaciya kak perspektivnoe napravlenie razvitiya kriminalisticheskoi videozapisi // *Obshhestvo Iroblo*. 2020. T. 73, vyp. 3. S. 59–63.
5. *Litova Z. A.* Sushhnost' ponyatiya "Texnologiya" na sovremennom etape. Uchenye zapiski // *Elektronnyj nauchnyj zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2019. T. 50, vyp. 2. S. 164–172.
6. *Matishov G. G., Bepalova L. A., Ivlieva O. V., Cygankova A. E., Kropyanko L. V.* Azovskoe more: sovremennye abraziionnye processy i problemy beregozashhity // *Doklady akademii nauk. M.: Izd-vo "Rossijskaya akademiya nauk"*. 2016. T. 471, vyp. 4. S. 483–486. <https://doi.org/10.7868/S086956521634020X>
7. *Matishov G. G., Xoroshev O. A., Sushko K. S., Stepan'yan O. V., Malik Yu. V.* Nizhnij Don: unikal'naya rechnaya arteriya i ee ekologicheskie problemy // *Priroda*. 2023. T. 1291, vyp. 3. S. 36–50. <https://doi.org/10.7868/S0032874X23030043>
8. *Nauka v formate 360°* // Mul'timedijnyj proekt Rossijskogo nauchnogo fonda: [sajt]. URL: <https://360.rscf.ru/#projects> (data obrashheniya: 20.01.2024).
9. *Obrazovatel'nye ekskursii VR 360: kanal YouTube*. [2018]. URL: <https://www.youtube.com/c/Путешествия360/videos> (data obrashheniya: 20.01.2024)
10. *Russkoe geograficheskoe obshhestvo: [sajt]*. URL: <https://rgo.ru/activity/360-vr/> (data obrashheniya: 20.01.2024).
11. *Studiya DonCyberGeo Yuzhnogo nauchnogo centra RAN: kanal YouTube*. [2018]. URL: <https://www.youtube.com/@doncybergeo4840/videos> (data obrashheniya: 05.12.2023).
12. *Federal'nyj issledovatel'skij centr Yuzhnyj nauchnyj centr Rossijskoj akademii nauk: [sajt]*. URL: https://www.ssc-ras.ru/virtualnye_vr_360_videoatlasy/?search_keywords=видео (data obrashheniya: 05.12.2023).
13. *Xoroshev O. A.* Ob eksperimental'nom nauchno-prosvetitel'skom proekte YuNCz RAN "Virtual'nye (VR 360°) videoatlasy Azovskogo morya: dorogami beregovyx ekspeditsij" // *Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii pamyati chlena-korrespondenta RAN D. G. Matishova "Razvitie vodnyx transportnyx magistralej v usloviyax global'nogo izmeneniya klimata na territo-*

rii Rossijskoj Federacii (Evrazii)”, g. Rostov-na-Donu, 5–9 sentyabrya 2022 g. Rostov n/D: Izd-vo YuNCz RAN, 2022. S. 166–170.

14. *Xoroshev O. A., Sushko K. S., Misirov S. A.* Rezul'taty vy'yavleniya uchastkov s proyavleniem neracional'nogo prirodopol'zovaniya v beregovoj zone Azovskogo morya // *Nauka Yuga Rossii*. 2021. T. 17, vyp. 3. S. 94–96.

<https://doi.org/10.7868/S25000640210311>

15. *Shabalin V. V.* Konstrukt sfericheskoj vizualizacii prostranstva sobytiya. Razvitie texnologij sozdaniya sovremennogo televizionnogo materiala // *Nauka televideniya*. 2019. T. 15, vyp. 3. S. 35–54. <https://doi.org/10.30628/1994-9529-2019-15.3-35-54>

16. *Abid Y., Togou M. A., and Muntean G.-M.* Dynamic viewport selection-based prioritized bitrate adaptation for tile-based 360° video streaming // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 29377–29392. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3157339>

17. *Godde M., Gabler F., Siegmund D., Braun A.* Cinematic Narration in VR—Rethinking Film Conventions for 360 Degrees // *VAMR*. 2018. Vol. 10910. P. 184–201.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-91584-5_15

18. *Hakulinen J., Keskinen T., Mäkelä V., Saarinen S., and Turunen M.* Omnidirectional video in museums — authentic, immersive and entertaining // *ACE*. 2017. Vol. 10714. P. 567–587.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-76270-8_39

УДК 502.4 (911.52)

РЕГИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ КРЫМА: СТРУКТУРА И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

© 2025 г. Е. И. Голубева^{а, *}, Е. С. Каширина^{б, **}, А. А. Новиков^{с, ***}

^аМГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

^бФилиал МГУ в г. Севастополе; Севастополь, Россия

ФИЦ Институт биологии южных морей, Севастополь, Россия

^сФилиал МГУ в г. Севастополе; Севастополь, Россия

*E-mail: egolubeva@gmail.com

**E-mail: e_katerina.05@mail.ru

***E-mail: a_novik@bk.ru

Поступила в редакцию 18.03.2024 г.

После доработки 07.01.2025 г.

Принята к публикации 10.03.2025 г.

В статье анализируются особенности системы особо охраняемых природных территорий (ООПТ) на региональном уровне на примере Крымского полуострова, отличающегося высоким биологическим и ландшафтным разнообразием. Цель исследования — оценка современной структуры региональной системы ООПТ Крымского полуострова, перспектив ее развития и выявление основных геоэкологических проблем, преимущественно связанных с последствиями значительного рекреационного и сельскохозяйственного природопользования. Для исследования геоэкологических проблем региональной ООПТ в модельных заказниках “Мыс Айя” и “Байдарский” проведены полевые геоботанические описания, оценены запасы наземной фитомассы, пространственные особенности природопользования, стадия рекреационной дигрессии и уровень загрязнения. Картограмма ООПТ полуострова позволила определить репрезентативность региональной системы территориальной охраны природы. ООПТ тяготеют преимущественно к горным и южнобережным районам Крыма, тогда как в степных ландшафтах охраняемых объектов не хватает. Выявлено, что ведущими угрозами сохранению биоразнообразия на ООПТ Крыма являются нерегулируемая рекреация и сопутствующее загрязнение, расширение видов природопользования и сокращение местообитаний. Максимальная трансформация почвенно-растительного покрова отмечена в прибрежной полосе заказника “Мыс Айя” в условиях ненормируемых рекреационных нагрузок — до третьей стадии рекреационной дигрессии. В условиях межгорных котловин заказника “Байдарский” происходит расширение селитебных зон и фрагментация местообитаний. Для снижения остроты геоэкологических проблем рекомендуется увеличение площади ООПТ за счет создания новых объектов и расширения имеющихся, нормирование антропогенных нагрузок и соблюдение режима охраны.

Ключевые слова: ООПТ, картографический анализ, биоразнообразие, местообитание, геоэкологические проблемы, рекреационная дигрессия, Крымский полуостров

DOI: 10.31857/S0869607125010033, EDN: LIWFPE

ВВЕДЕНИЕ

Создание ООПТ — один из эффективных путей охраны природы и сохранения природного наследия. За последние 50 лет количество ООПТ в мире увеличилось более чем в 20 раз, а их площадь — в 13 раз. В 2020 г. около 16% поверхности суши и 8% акваторий относились к ООПТ при целевом показателе 10% [1, 21]. Они создаются для сохранения типичных и уникальных природных комплексов, их биологического разнообразия.

Цели создания ООПТ достигаются при построении взаимосвязанной системы [2]. Количество, площадь, конфигурация ООПТ отражают региональные особенности природы, социально-экономического развития, истории освоения и нормативно-правовой базы [8]. Как результат — национальные и региональные системы ООПТ разнообразны, как и регионы разных стран. В мире насчитывается более 10 тысяч категорий ООПТ, для удобства сведенных в 6 основных категорий [23].

Региональные системы ООПТ создаются с учетом принципиальных требований к общему соотношению охраняемых и антропогенно преобразованных территорий, которые изменяются в разных ландшафтных условиях: от абсолютной охраны экосистем Арктики до использования 75% территории широколиственных лесов [12, 14, 18]. Внутренняя структура региональных систем ООПТ и отдельных объектов зависит от целей сохранения того или иного вида или экосистемы, поэтому размеры и форма ООПТ могут варьироваться в широких пределах [16, 22]. Так, “идеальной” формой ООПТ считается круг, позволяющий сократить угрозы и обеспечить необходимое пространство охраняемым таксонам [20]. Для сохранения видов и экосистем в течение длительного периода более эффективно создание крупных по площади ООПТ; если цель — сохранение как можно большего числа видов, то рекомендуется создавать значительное количество небольших по площади объектов (single large or several small, SLOSS) [19, 21].

Природопользование в пределах ООПТ и возле их границ снижает их природоохранную эффективность. Угрозами для сохранения биоразнообразия в ООПТ являются нарушение режима охраны, загрязнение, расширение хозяйственной деятельности, в том числе туризма, фрагментация биотопов [17]. Среди негативных антропогенных факторов, влияющих на эффективность функционирования ООПТ, ведущее место принадлежит фрагментации местообитаний — разделению единой экосистемы сетью автодорог, троп, а также размещению построек и коммуникаций внутри природного комплекса. Более того, постоянная хозяйственная деятельность, сопровождающаяся проездом автотранспорта и передвижением людей, на таких участках приводит к деградации растительного покрова из-за выбросов выхлопных газов автомобилей, рекреационной дигрессии почвенно-растительного покрова из-за нерегулируемой рекреации и пастбищной дигрессии из-за нерегулируемого выпаса скота. В результате нарушаются связи между компонентами экосистем, формируются изолированные “острова” природы, которые быстро деградируют и трансформируются человеком. Концепции сохранения биоразнообразия на ООПТ базируются на разработке механизмов снижения антропогенной нагрузки и поддержания естественных процессов [2]. По этой причине геоэкологическое состояние ООПТ определяется влиянием региональной структуры природопользования.

Крымский полуостров выделяется на территории России как небольшой по площади, но отличающийся разнообразием ландшафтов и флоры регион. Полуостров характеризуется близким к изолированному положению: он почти полностью омывается морями, соединяясь с Русской равниной узким перешейком шириной 8 км. Крым расположен на крайнем юго-западе России, на границе умеренного и суб-

тропического климатических поясов, сочетает равнинные ландшафты и высотную поясность гор (до высоты 1545 м). Длительное изолированное и полуизолированное развитие, а также положение на границе флористических областей, разнообразие рельефа и климатических условий способствовали формированию на полуострове оригинальных природных комплексов с высоким биологическим и ландшафтным разнообразием, эндемизмом флоры. Флористическое разнообразие полуострова насчитывает более 2500 видов растений [5], что ставит его в ряд российских ядер флористического разнообразия (hotspot) вместе с Кавказом, Приморьем и Алтаем.

Крым как один из европейских центров высокого ландшафтного разнообразия, флористический хотспот России, можно отнести к ключевым территориям для территориальной охраны. Вместе с тем регион относится к староосвоенным с исторически сложившейся структурой природопользования и длительным воздействием на природные комплексы. В результате в районах с высокой природоохранной ценностью возникают конфликты с другими видами хозяйственного освоения, что приводит к формированию острых геоэкологических проблем.

Цель исследования — оценка современной структуры региональной системы ООПТ Крымского полуострова, перспектив ее развития и выявление основных геоэкологических проблем, преимущественно связанных с последствиями значительного рекреационного и сельскохозяйственного природопользования.

К задачам работы относится оценка категории, площади и приуроченности ООПТ к ландшафтным условиям, изучение геоэкологических проблем, обусловленных развитием рекреации, на примере модельных ООПТ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования региональной системы ООПТ Крыма проведены в 2000–2023 гг. Работы включали сбор фондовых, картографических материалов, статистических данных, а также полевые обследования проявлений наиболее острых геоэкологических проблем — рекреационной и пастбищной дигрессии почвенно-растительного покрова, трансформации ландшафтов в результате пожаров, загрязнения от населенных пунктов и автотранспорта. В качестве модельных объектов нами выбраны ландшафтные заказники “Байдарский” и “Мыс Айя”, расположенные в юго-западной части Крыма. Заказник “Байдарский” охватывает низкогорные и среднегорные лесные ландшафты, а также яйлинские лугово-степные ландшафты горного Крыма. Нижние части котловин заняты лугово-степной растительностью. На примере заказника “Байдарский” изучены геоэкологические проблемы ООПТ горных лесных, лугово-степных яйлинских и котловинных ландшафтов. Заказник “Мыс Айя” репрезентативен для южнобережных низкогорных средиземноморских ландшафтов с редколесьями и вторичными кустарниковыми сообществами типа шибляк.

Рекреационная дигрессия определена на основе совокупности показателей состояния почвы и растительности: плотность верхнего горизонта почвы, флористический состав и фитоценогическая структура, запасы наземной фитомассы растительного сообщества на стандартных геоботанических площадках. Состояние древесных растений определено по степени их повреждения. К сильным относят облом веток и повреждения на более чем одной трети кроны, ствола, лапах корней. Остальные повреждения относят к слабым.

Состояние поверхности почвы оценено по пяти категориям: 0 — поверхность не нарушена, 1 — единичные проходы, подстилка разрыхлена, 2 — тропы на подстилке; 3 — тропы без подстилки; 4 — тропы и дороги с размывом; 5 — наносы мел-

козема, камней. На основе полевых работ оценена степень нарушенности почвенно-растительного покрова по пятистадийной шкале рекреационной дигрессии [7].

Пробы наземной фитомассы для травяных экосистем отобраны в трехкратной повторности с помощью рамки 50×50 см. Высушены при температуре 105°C до постоянного веса. Результаты пересчитаны в запасы в граммах на м^2 .

Заложено 50 пробных площадей: 40 в заказнике “Байдарский” и 10 — в заказнике “Мыс Айя” и на прилегающей территории перспективного заказника “Спилия”. В заказнике “Мыс Айя” 7 пробных площадей заложены на туристской тропе с высокой рекреационной нагрузкой возле моря, 3 пробные площади — на участках выше по склону при меньшем воздействии рекреации. В заказнике “Байдарский” пробные площади заложены с учетом ландшафтной структуры вдоль туристских троп от котловины по склонам гор к вершинам яйлы. Отдельно 5 пробных площадей заложены в нижней части котловины, подверженной воздействию выпаса скота и сельскохозяйственному использованию.

Для создания карт использованы программы MapInfo Professional 15.0 и QGIS.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Количественный состав ООПТ и их площадь. Система ООПТ Крымского полуострова находится в постоянном развитии и по состоянию на начало 2023 г. включала 221 объект федерального, регионального и местного значения, которые занимали 251 578.96 га, что составляет около 8% его площади. Более 90% площади ООПТ приходится на Республику Крым, остальные 10% — на г. Севастополь. С 2000 г. число ООПТ на полуострове увеличилось со 120 до 221 объекта, а доля площади — почти наполовину. Это связано с созданием новых охраняемых территорий: одним национальным парком, 11 ландшафтно-рекреационными парками, 26 заказниками, 5 природными парками, 41 памятником природы, природной территорией и прочими объектами. Площадь и количество ООПТ увеличивались быстрыми темпами с 2000 по 2013 г. (рис. 1).

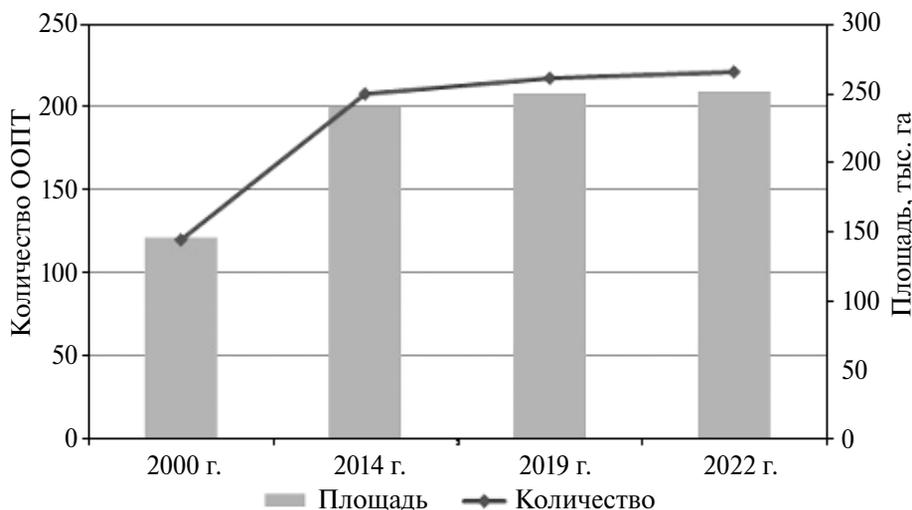


Рис. 1. Динамика количества и площади ООПТ Крыма, 2000–2022 гг. (построено авторами по данным [3, 4]).

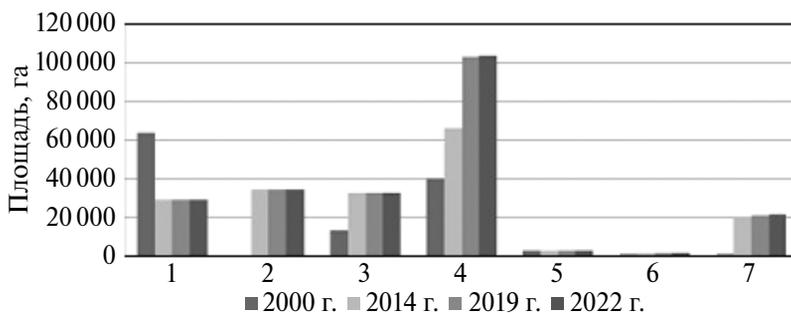
Fig. 1. The dynamics of the number and the area of protected areas in Crimea, 2000–2022 (constructed by the authors according to [3, 4]).

За период 2000–2022 гг. количество ООПТ на Крымском полуострове увеличилось на 54%, площадь — на 57%. В последние годы создано несколько новых ООПТ. В 2020 г. созданы природные заказники “Озеро Бараколь” (243.3 га), “Парпачский гребень” (417.4 га), в 2022 г. — ландшафтно-рекреационный парк “Ойбурский” (620.3 га), памятник природы “Каменные грибы Малого Салгира” (9.27 га), дендрологический парк “Парк им. М. В. Печенкина” (55.54 га), в 2023 г. — заказник “Каламитский” (81.6 га) и др. При этом необходимо отметить, что некоторые объекты были утрачены: например, заказник “Южнобережные дубравы” (10.8 га) исключен из перечня ООПТ в 2018 г.

Категории объектов и их статус. Основу системы ООПТ Крыма составляют заповедники (Ялтинский, Крымский, Карадагский, Олукский и Казантипский), Крымский национальный парк и крупные заказники (Байдарский, Горный карст Крыма и др.). Велика доля природных парков (рис. 2).

Федеральный статус закреплен за 9 объектами: 5 заповедниками, Крымским национальным парком и 3 заказниками (Каркинитский, Малое филофорное поле, Казантипский морской), которые в сумме составляют 52% площади ООПТ Крыма. Остальные ООПТ (212 объектов, 48% площади) имеют региональный статус. Большинство из них — небольшие по площади (до 10 га) заказники и памятники природы. Один объект — природная территория “Пещера ‘Таврида’” (Белогорский район) — созданный в 2019 г., имеет местный статус, но его площадь незначительна — 0.0713 га. По количеству абсолютно преобладают региональные ООПТ, по площади — федеральные.

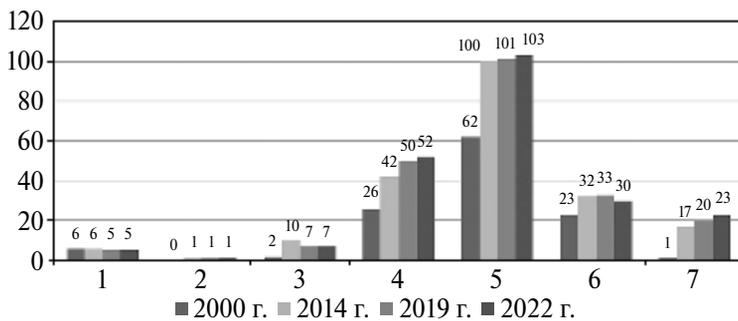
В структуре системы ООПТ по категориям ведущее место по числу объектов принадлежит памятникам природы, которых насчитывается 103 единицы (рис. 3). Однако они занимают всего лишь 1.6% ООПТ полуострова, т.к. представлены главным образом деревьями-памятниками, сопками грязевых вулканов, пещерами и небольшими урочищами. При этом четверть площади ООПТ Крыма приходится на заповедники и национальный парк.



1 — заповедники, 2 — национальные парки, 3 — природные парки, 4 — заказники, 5 — памятники природы, 6 — ботанические сады и парки-памятники, 7 — прочие категории.

Рис. 2. Динамика площади ООПТ Крыма по категориям, 2000–2022 гг. (построено авторами по данным [3, 4]).

Fig. 2. The dynamics of the protected areas in Crimea by category, 2000–2022 (constructed by the authors according to [3, 4]).



1 — заповедники, 2 — национальные парки, 3 — природные парки, 4 — заказники, 5 — памятники природы, 6 — ботанические сады и парки-памятники, 7 — прочие категории.

Рис. 3. Динамика числа ООПТ Крыма по категориям, 2000–2022 гг. (построено авторами по данным [3, 4]).

Fig. 3. The dynamics of the protected areas number in Crimea by category, 2000–2022

(constructed by the authors according to [3, 4]).

Помимо количественных показателей необходимо отметить трансформацию структуры и изменения категорий и статуса отдельных ООПТ Крыма. Так, заповедник “Мыс Мартьян” и национальный парк “Прекрасная гавань (Гарханкутский)” после 2014 г. переведены в категорию природных парков, а большая часть Крымского природного заповедника переведена в категорию “национальный парк”.

Пространственное распределение ООПТ Крыма неоднородное и, как показал анализ, наибольшая ландшафтная репрезентативность обеспечена в поясе горных лесов и нагорной луговой степи яйлы среднегорного ландшафтного уровня (табл. 1).

Более трети площади ландшафтов среднегорного уровня отнесены к ООПТ, что объясняется приоритетами в сохранении лесов и создании относительно крупных по площади заповедников. С другой стороны, горные леса наименее освоены хозяйственной деятельностью человека.

Территория предгорных ландшафтов охраняется только на 6.6% площади. Это основная зона расселения с трансформированными ландшафтами. Плакорные и гидроморфные ландшафты представлены степями и полупустынями Присивашья,

Таблица 1. Ландшафтная репрезентативность системы ООПТ Крымского полуострова (составлено авторами по данным: [15])

Table 1. Landscape representativeness of the protected area system of the Crimean Peninsula (Compiled by the authors based on data from: [15])

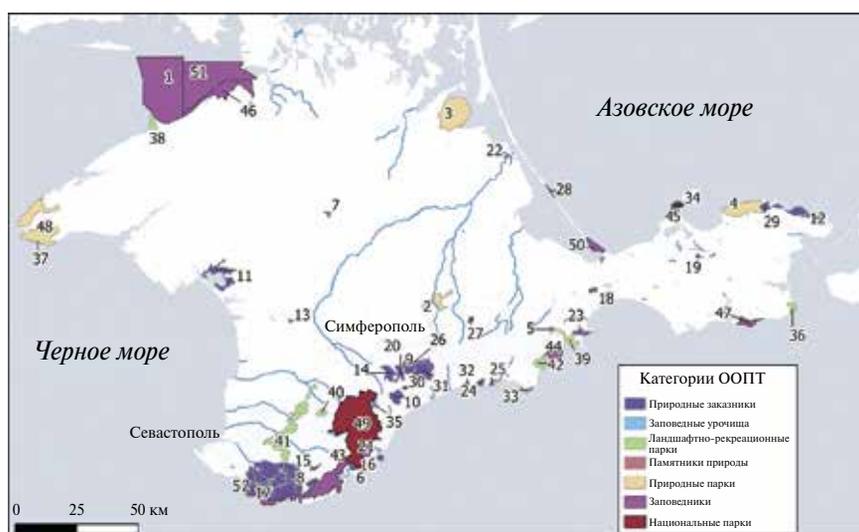
Ландшафтный уровень	Доля от площади ООПТ, %	Доля ООПТ в ландшафтном уровне, %
Гидроморфный	15.4	3.9
Плакорный	17.2	3.5
Предгорный	23.8	6.6
Среднегорный	43.6	30.3
Всего	100	7.2

с крайне низким охватом территориальной охраной природы — 3.5 и 3.9% соответственно.

Необходимо отметить высокий уровень охраны прибрежных комплексов: 82 из 221 ООПТ выходят к побережью, а 50 имеют аквальные части. Около 20% побережья Севастополя занимают ООПТ. Для Республики Крым эта цифра составляет около 9.2%.

Недостаточно охвачены территориальной охраной степные ландшафты равнинного Крыма [13]. В Советском, Первомайском и Красноперекопском районах ООПТ отсутствуют.

В результате длительных полевых исследований установлено, что наиболее острыми проблемами для ООПТ горно-лесной зоны Крыма являются последствия рекреации, включая фрагментация ландшафтов от рекреационной застройки; для



Заказники: 1. Малое филофорное поле. 7. Целинная степь у с. Григорьевка. 8. Ай-Петринская яйла, 9. Караби-яйла. 10. Демерджи яйла. 11. Сасыкский. 12. Осовинская степь. 13. Степной участок у с. Школьное. 14. Долгоруковская яйла. 15. Большой каньон Крыма. 16. Аю-Даг. 17. Байдарский. 18. Озера Ачи и Камышинский луг. 19. Парпачский гребень. 20. Тырке. 21. Урочище Парагильмен. 22. Присивашский. 23. Горный массив Тепе-Оба. 24. Папая-Кая. 25. Новый Свет. 26. Урочище Караби-Яйла. 27. Урочище Кубалач. 28. Арабатский. 29. Озеро Чокрак. 30. Хапхальский. 31. Горный карст Крыма. 32. Аунлар. 34. Прибрежный аквальный комплекс у мыса Казантип. 50. Арабатский. 51. Каркинитский. 52. Мыс Айя.

Природные парки: 2. Белая скала. 3. Калиновский. 4. Караларский. 5. Гора Клементьева. 6. Мыс Мартьян. 48. Тарханкутский.

Памятники природы: 33. Полуостров Меганом. 35. Яйла Чатырдага.

Ландшафтно-рекреационные парки: 36. Мыс Такиль. 37. Атлеш. 38. Бакальская коса. 39. Тихая бухта. 40. Научный. 41. Бахчисарай. 42. Лисья бухта — Эчки-Даг.

Заповедники: 43. Ялтинский горно-лесной. 44. Карадагский. 45. Казантипский. 46. Крымский. 47. Опускский.

Национальный парк: 49. Крымский.

Рис. 4. Пространственное размещение основных ООПТ Крыма.

Fig. 4. Spatial location of the main protected areas of Crimea.

степных и лугово-степных ООПТ — перевыпаса скота, сельскохозяйственной деятельности без соблюдения нормативов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на меры по усилению территориальной охраны ландшафтов Крымского полуострова, геоэкологические проблемы ООПТ сохраняют свою остроту, в особенности это характерно для региональных объектов со слабым контролем за соблюдением природоохранного режима.

Основными угрозами для сохранения биоразнообразия на ООПТ Крыма являются нерегулируемая рекреация, приводящая к дигрессии почвенно-растительного покрова, активизация различных видов природопользования, приводящих к конфликтам, сокращение, трансформация и фрагментация местообитаний, загрязнение компонентов экосистем. Перечисленные геоэкологические проблемы проявляются в заказниках “Байдарский” и “Мыс Айя”, что позволяет их рассматривать в качестве модельных.

Заказник “Байдарский” (24 295 га) создан в 1991 г. для сохранения ландшафтов межгорных котловин и яйлы, в пределах которых расположен водосбор реки Черной — основного источника водоснабжения г. Севастополя. Здесь сформировались высотная дифференциация ландшафтов, включающая мезоксерофитные пушистодубовые, грабовые, буковые леса и высокоможевеловые редколесья, поднимающиеся по склонам от 250–300 до 600–800 м. Выше, на плосковершинных закарстованных плато Ай-Петринской яйлы, расположена нагорная луговая степь. Нижняя, наиболее освоенная часть котловины занята сельскохозяйственными угодьями, лугами и преобразованными сообществами типа шибляк (*Carpinus orientalis*, *Juniperus deltoids*, *Paliurus spina-christy*, *Rubus* Sp.) и др. Вдоль рек сохранились пойменные леса (*Quercus pubescens*, *Populus* Sp., *Salix* Sp.) на аллювиальных почвах. Флористическое разнообразие заказника составляет более 1000 видов растений, около 100 из которых занесены в Красную книгу. Ландшафтное разнообразие заказника включает 37 типов местности [10]. Антропогенное воздействие на природные комплексы заказника определяется наличием 15 населенных пунктов с населением около 7000 человек, автодорог, в т.ч. федеральной трассы Севастополь — Ялта, ведением сельскохозяйственной деятельности (выращивание зерновых, выпас скота) и рекреационным использованием лесов.

Заказник “Мыс Айя” (1320 га) создан на прибрежных склонах для охраны лесных средиземноморских ландшафтов (*Pinus brutia* var. *pityusa*, *Juniperus excelsa*, *Arbutus andracane*, *Pistacia mutica*), сохранившихся в нижнем прибрежном поясе. Следующий пояс сформирован широколиственными лесами (*Quercus petraea*, *Carpinus orientalis*, *Fraxinus excelsior*, *Acer campestre*) и др. В заказнике насчитывается более 500 видов растений, не менее 20 из которых относятся к охраняемым (Багрова и др., 2004). В аквально-прибрежном комплексе заказника преобладают ландшафты абразионных склонов, сложенные глыбово-валунными отложениями с преобладанием видов цистозиры (*Cystoseira barbata*, *C. crinita*) [10]. Ведущими факторами антропогенного воздействия на природные комплексы заказника “Мыс Айя” является рекреация и сопутствующее ей использование автотранспорта.

Рекреационная дигрессия почвенно-растительного покрова изучена в модельных заказниках в совокупности на 50 пробных площадях. Участки, подверженные рекреационной дигрессии, расположены вдоль туристских троп и дорог, турстоянок, смотровых площадок. В заказнике “Мыс Айя” проложено 28 км троп и дорог.

Максимальная концентрация троп и дорог составляет около 10 км/км^2 , превышая оптимальную ($4\text{--}6 \text{ км/км}^2$) более чем вдвое. Такие участки отмечены локально возле побережья: на самом рекреационно освоенном отрезке берега шириной 100 м и длиной 1 км площадь выбитых участков составила около 0.77 га, или 7.7% его площади.

Значительно увеличивают негативное влияние на растительность и почвы заказника палаточные кемпинги, широко распространенные в прибрежной зоне.

Максимальная нагрузка составляла 388 палаток (примерно 1160 чел.) в 2012 г. В 2019 г. количество палаток снижается до 334 ед. (около 1000 чел.). Кроме межгодовой изменчивости необходимо отметить неравномерное распределение рекреационной нагрузки по месяцам с выраженным летним туристским сезоном — в июле и августе. В летний период широко представлен длительный (до нескольких недель) палаточный отдых, в остальные сезоны — однодневный пешеходный туризм.

Отмечены изменения состава и структуры растительности, снижение наземной фитомассы и высоты травяного яруса (рис. 5). На первой стадии рекреационной дигрессии в заказнике “Мыс Айя” отмечено расширение тропинойной сети и выбитых участков, сокращение общего проективного покрытия травяного яруса (ОПП) на 10–15%.

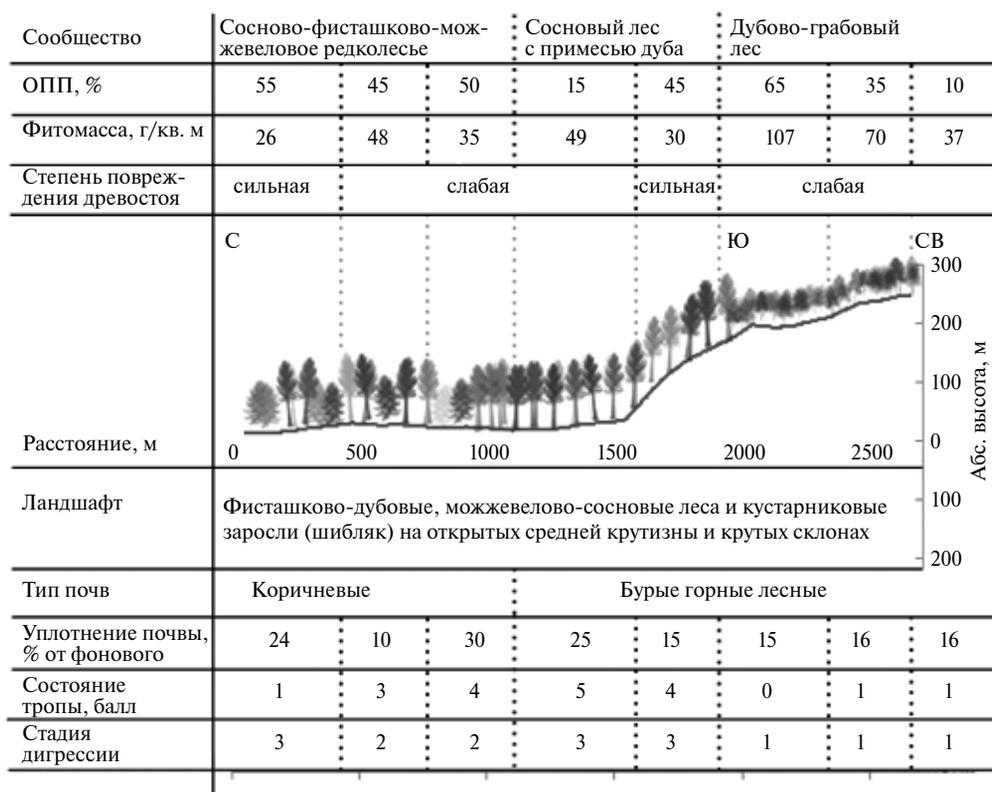


Рис. 5. Рекреационная дигрессия по профилю в заказнике “Мыс Айя” в районе урочища Айязма.

Fig. 5. The recreational digression according to the profile in the Cape Aya nature reserve in the area of the Ayazma tract.

Вторая стадия сопровождается расширением площади выбитых участков и снижением видового разнообразия травяного яруса. На второй стадии доля подроста и молодых деревьев в возрастной структуре сообщества снижается в 2–3 раза.

На участках, подверженных третьей стадии рекреационной дигрессии, снижается видовое разнообразие. Индикаторным видом является чий костеровидный (*Achnatherum bromoides*), обилие которого снижается при рекреационных нагрузках. Фитомасса травяного яруса снижается почти в 2 раза: с 48 до 26 г/кв. м. В вертикальной структуре сообщества сомкнутость кустарникового яруса (*Ruscus aculeatus*, *Jasminum fruticans*) снижается с 0.8 до 0.1, низкорослые кустарники практически полностью отсутствуют.

Необходимо отметить, что третья стадия дигрессии в рассматриваемых условиях не сопровождается заметным увеличением числа и доли сорных видов, а также их фитомассы, что характерно для рекреационной дигрессии в бореальных лесах. Указанная особенность, возможно, объясняется сухостью, высокой плотностью почвы и слабой всхожестью занесенных туристами семян чужеродных растений. С другой стороны, период высокого рекреационного воздействия на мысе Айя составляет около 20 лет, что недостаточно для распространения сорных видов, и многие районы заказника недоступны для транспортных средств. Для четвертой и пятой стадии рекреационной дигрессии в полусубтропических ландшафтах характерно значительное уплотнение почвы, расширение выбитых участков, превращение леса в отдельные куртины из взрослых деревьев. Для “Мыса Айя” такие участки

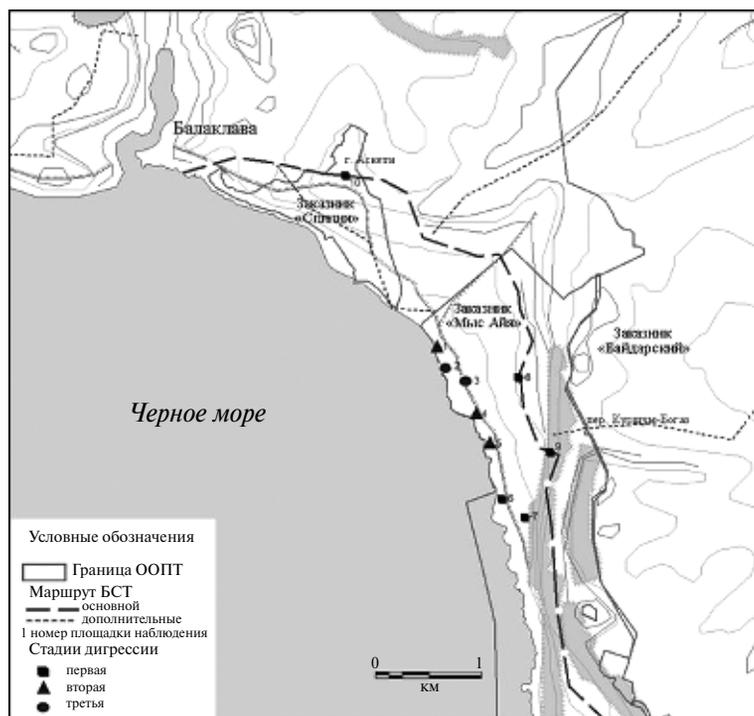


Рис. 6. Картограмма рекреационной дигрессии по ключевым участкам в заказнике “Мыс Айя”.

Fig. 6. The scheme of recreational digression on key sites in the Cape Aya nature reserve.

не зафиксированы (рис. 6), но при длительном сохранении рекреационных нагрузок можно прогнозировать их появление уже через 5 лет.

“Байдарский” заказник характеризуется значительной рекреационной освоенностью, о чем свидетельствует наличие 268 км туристских троп и дорог со средней густотой 1.05 км/км². Через заказник проходит маршрут Большой Севастопольской тропы. Для преобладающей части лесных сообществ заказника “Байдарский” не характерны сверхнормативные рекреационные нагрузки. Использование ландшафтов заказника “Байдарский” для рекреации приводит к изменению, главным образом, растительности. Во флористическом составе растительных сообществ отмечается высокая доля рудеральных видов.

Рекреация сопровождается загрязнением компонентов экосистем, что особенно выражается на территории Байдарского заказника. Источниками загрязнения являются населенные пункты, сельское хозяйство, автотранспорт, а также трансграничный перенос.

Снизить остроту геоэкологических проблем, связанных с рекреацией, позволяет управление рекреационным природопользованием на ООПТ. Прежде всего управление турпотоками заключается в создании экологических маршрутов и инфраструктуры отдыха. Внедрение таких мер позволит регулировать число туристов и увеличить рекреационную емкость территории.

Постагрогенные процессы. Центральные части Байдарской и Варнутской котловин столетиями использовались для сельского хозяйства, что привело к трансформации ландшафтов. В процессе длительной истории природопользования естественная растительность в основном не сохранилась, за исключением небольших участков рощ дуба пушистого: в с. Озерное сохранились крупные деревья, диаметр стволов которых достигает 1.5–2 м. Лесная и лесостепная растительность была заменена сельскохозяйственными угодьями. На участках близкого залегания грунтовых вод сформировались луговые сообщества. В последнее десятилетие на участки луговых степей наступает сорная растительность, где на заброшенных сельскохозяйственных угодьях сформировались залежи и пустоши, происходит неконтролируемый выпас скота. Наземная фитомасса травяного яруса в котловинах характеризуется незначительными показателями и составляет от 0.1 до 1.7 т/га, что ниже продуктивности травяных сообществ Гераклеийского полуострова с более засушливыми условиями и степных сообществ Крыма. В травостое заметна роль сорных видов, индицирующие длительный выпас: синеголовник полевой (*Eryngium campestre*), пырей и др. На участках выпаса по сравнению с водоохранной зоной Чернореченского водохранилища (условно фоновые условия) снижается общее проективное покрытие с 70–80 до 30–40%.

Сельскохозяйственные угодья, которые длительное время (10–25 лет), не подвергались распашке, сенокосению и интенсивному выпасу, постепенно зарастают. Анализируя пространственные особенности растительности бывших пастбищ и пашни Байдарской и Варнутской долин, по стадиям зарастания нами выделены три типа растительных сообществ, отражающие сукцессионные и динамические процессы: I — угодья, заброшенные менее 10 лет назад, с разнотравно-злаковыми, местами луговыми, степями; II — угодья, заброшенные приблизительно от 10 до 20 лет, с разреженными кустарниками и подростом деревьев (до 1 м); III — угодья, заброшенные более 20 лет назад, с древесно-кустарниковыми сообществами с высотой деревьев до 5–7 м.

Перспективы развития системы ООПТ Крыма определяются высоким биологическим разнообразием полуострова и недостаточным территориальным охватом.

Для оптимизации территориальной структуры ООПТ необходимо создание новых объектов в Советском, Первомайском и Красноперекопском районах в степных ландшафтах. Также можно рекомендовать создание ООПТ в рекреационно привлекательной прибрежной зоне.

Структуру ООПТ по статусу рекомендуется дополнить объектами муниципального (местного) значения, которые на полуострове представлены одним объектом — природная достопримечательность пещера “Таврида”. Примером сохранившегося природного комплекса на Южном берегу Крыма является роща можжевельника в долине р. Лименка. В Лименской долине представлены хвойные и широколиственные леса субсредиземноморского и центрально-европейского типа. Главными лесообразующими породами являются виды, занесенные в Красную книгу РФ: *Juniperus excelsa*, *Pistacia mutica*, *Pinus nigra* subsp. *pallasiana*, а также *Quercus pubescens*. Также для южного макросклона типичными представителями растительного мира являются охраняемые *Arbutus andrachne* и *Ruscus aculeatus* L. На территории отмечены занесенные в Красную книгу Республики Крым виды: овес бородачатый (*Avena barbata* subsp. *barbata*) и молочай жесткий (*Euphorbia rigida*). Сообщества можжевельника высокого отличаются сложной вертикальной структурой, высокой сохранностью, естественным возобновлением. Для Лименской долины рекомендуется создание ландшафтного заказника муниципального значения.

В 2020 г. с участием авторов проведено комплексное экологическое обследование прибрежной территории возле озера Аджиголь (Феодосийский муниципальный округ) для обоснования создания ООПТ местного значения — природный рекреационный комплекс “Золотой пляж” в с. Береговое. Уникальным и редким ландшафтом для исследуемой территории является ландшафт аккумулятивных недренированных низменностей с формированием эоловых форм рельефа (дюн), занятых псаммофитной растительностью на примитивных песчаных почвах. Территория отличается сохранностью псаммофитных комплексов растительности, которая представлена облигатными псаммофитами — видами, приспособленными к произрастанию только на песчаных субстратах, и не может существовать в других экотопах.

Среди степных участков, требующих охраны, исследователями отмечаются ландшафты Юго-Восточного Крыма, в частности холмы Феодосийского низкогогорья [9], степи Керченского полуострова, Центрального Крыма (урочище Степное Первомайского района, 132 га, единственное место произрастания караганы скифской, Степная балка южнее с. Славное (Раздольненский район), Беки-Элинские (Ливенские), Осминские, Русаковские дубки, Сары-Башская степь), Западного Крыма (Южный Тарханкутский вал, озеро Кизил-Яр) [6] и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Региональная система ООПТ Крыма имеет длительную историю формирования и в настоящее время состоит из более 220 объектов, однако этого недостаточно для обеспечения на высоком уровне охраны биоразнообразия и уникальных природных объектов полуострова. ООПТ Крыма покрывают всего лишь 8% его площади, не достигая даже среднероссийского показателя в 13.5%.

Анализ региональной сети ООПТ Крыма показал неравномерность территориальной охраны природы полуострова со значительным преобладанием объектов в горной и южнобережной ландшафтах и недостатком — в степных и равнинных приморских. Для повышения эффективности территориальной охраны природы Крыма

рекомендуется создать новые объекты в Советском, Первомайском и Красноперекопском районах в степных ландшафтах, а также в рекреационно привлекательной прибрежной зоне. К перспективным территориям для ООПТ отнесены Лименская долина, побережье у озера Аджиголь, холмы Феодосийского низкогорья и др.

Среди проблем, препятствующих реализации функций ООПТ Крыма, максимальной остротой отличаются массовая рекреация и фрагментация экосистем в курортных районах горно-лесных и южнобережных ландшафтов, неконтролируемый выпас скота и сельскохозяйственная трансформация в степных ландшафтах.

Негативные последствия рекреации на ООПТ Крыма выражаются в снижении общего проективного покрытия травяного и кустарникового ярусов, флористического разнообразия сообществ, запасов наземной фитомассы, уплотнением верхнего горизонта почвы. Отмечается фрагментация местообитаний, приводящая к снижению числа представителей флоры и фауны.

Оптимизация системы управления ООПТ, включающая создание туристской инфраструктуры, позволит снизить негативное воздействие рекреации на ландшафты и обеспечить их устойчивое развитие.

БЛАГОДАРНОСТИ

Публикация подготовлена в рамках: научной темы Госзадания кафедры рационального природопользования географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова “Теория и практика рационального природопользования для устойчивого развития территорий” (№ АААА-А16-116032810096-3); Государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ гос. регистрации 124030100030-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобальная перспектива в области биоразнообразия 5 // [сайт]. Конвенция о биоразнообразии. URL: <https://www.cbd.int/gbo/gbo5/publication/gbo-5-spm-ru.pdf> (дата обращения: 16.12.2023).
2. Дурбанский аккорд: Материалы Пятого всемирного конгресса по особо охраняемым природным территориям. Пер. с англ. // Отв. ред. Ю. Л. Мазуров — М.: Институт Наследия, 2004. 272 с.
3. Департамент природных ресурсов и экологии города Севастополя // [сайт]. URL: <https://spn.sev.gov.ru/deyatelnost/osobo-okhranyaemye-prirodnye-territorii-sevastopolya/obshchie-svedeniya/> (дата обращения: 16.12.2023).
4. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2022 году. Симферополь: ООО “Принт”, 2023. 448 с.
5. Ена А. В. Природная флора Крымского полуострова. Симферополь: Н. Орианда, 2012. 232 с.
6. Епихин Д. В., Вахрушева Л. П. Эколого-биоморфологические особенности степных сообществ центральной части Предгорного Крыма // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2019. Т. 149. С. 65–77.
7. Казанская Н. С. Изучение рекреационной дигрессии естественных группировок растительности // Известия АН СССР. Сер. геогр. 1972. № 1. С. 46–60.
8. Каширина Е. С., Голубева Е. И. Природопользование на особо охраняемых природных территориях Крымского полуострова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2016. № 5. С. 91–97. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-91-97>
9. Миронова Л. П., Нухимовская Ю. Д. Степные экосистемы Феодосийского низкогорья: что мы теряем // Экосистемы. 2022. № 31. С. 39–60.
10. Особо охраняемые природные территории Севастополя / Е. И. Голубева, Е. А. Позаченюк, Ю. А. Гаврилова и др. ИТ Ариал Симферополь, 2020. 140 с.

11. Позаченюк Е. А., Панкеева А. Ю., Панкеева Т. В. Современные ландшафты природного заказника "Байдарский" // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2020. Т. 6. № 1. С. 144–155.
12. Пузаченко Ю. Г., Дроздова Н. Н. Площадь охраняемых территорий // Итоги и перспективы заповедного дела в СССР. М.: Наука, 1986. С. 72–109.
13. Рудык А. Н., Прокопов Г. А. Анализ современной структуры ООПТ Республики Крым // Научные труды национального парка "Хвалынский". Сборник научных статей V Международной научно-практической конференции. 2018. Саратов: ООО "Амирит". 2018. С. 142–149.
14. Сдасюк Г. В., Тишков А. А. Ключевые регионы устойчивого развития // Оценка качества окружающей среды и экологическое картографирование / Рук. Н. Ф. Глазовский, отв. редакторы Г. В. Сдасюк, А. С. Шестаков. М.: ИГ РАН, 1995 С. 107–116.
15. Современные ландшафты Крыма и сопредельных территорий / под науч. ред. Е. А. Позаченюк. Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. — 672 с.
16. Allan J. R., Possingham H. P., Atkinson S. C., Waldron A., Di Marco M., Butchart S. H., Adams V. M., Kissling W. D., Worsdell T., Sandbrook C., Gibbon G., Kumar K., Mehta P., Maron M., Williams B. A., Jones K. R., Wintle B. A., Reside A. E., Watson J. E. M., 2022. The minimum land area requiring conservation attention to safeguard biodiversity. *Science* 376 (6597), 1094–1101. <https://doi.org/10.1126/science.ab19127>
17. Bontempi A., Venturi P., Del Bene D., Scheidel A., Zaldo-Aubanell Q., Maneja Zaragoza R. Conflict and conservation: On the role of protected areas for environmental justice // *Global Environmental Change*. Vol.82. 2023. PP. 102740 <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102740>
18. Bennett G., Wit P. The Development and Application of Ecological Networks. A Review of Proposals, Plans and Programmes. — Amsterdam: AIDEnvironment, 2001. 132 pp.
19. Bicknell J. E., Collins M. B., Pickles R. S. A., McCann N. P., Bernar C. R., Fernandes D. J., Miller M. G. R., James S. M., Williams A. U., Struebig M. J., Davies Z. G., Smith R. J. Designing protected area networks that translate international conservation commitments into national action. *Biological Conservation*. 214. 2017. P. 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.08.024>
20. Fahrig L., Watling J. I., Arnillas C. A., Arroyo-Rodríguez V., Jörger-Hickfang T., Müller J., Pereira H. M., Riva F., Rösch V., Seibold S., Tschardt T., May F. Resolving the SLOSS dilemma for biodiversity conservation: a research agenda // *Biological Reviews*. 2022. Vol. 97, Is.1 P. 99–114. <https://doi.org/10.1111/brv.12792>
21. Lindenmayer D. B., Wood J, McBurney L., Blair D., Banks S. C. (2015b) Single large versus several small: the SLOSS debate in the context of bird responses to a variable retention logging experiment. *For Ecol Manag* 339:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.027>
22. Maiorano L., Falcucci A., Boitani L. Size-dependent resistance of protected areas to land-use change // *Proc Biol Sci*. 2008 Jun 7; 275(1640): 1297–1304. Published online 2008 Mar 4. <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.1756>
23. UNEP-WCMC and IUCN, 2023 [сайт]. Protected Planet Website/ URL: <https://www.protectedplanet.net/en> (дата обращения 10.08.2023).

Regional System of Natural Protected Areas of the Crimea: State and Geocological Problems

E. I. Golubeva^{1, *}, E. S. Kashirina^{2, **}, A. A. Novikov^{3, ***}

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²*Branch of MSU in Sevastopol, Sevastopol, Russia
Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

³*Institute of Natural Engineering Systems, Russia*

**E-mail: egolubeva@gmail.com*

***E-mail: e_katerina.05@mail.ru*

****E-mail: a_novik@bk.ru*

Abstract — The article analyzes the features of the system of specially protected natural territories (protected areas) at the regional level on the example of the Crimean Peninsula, as a high biological and landscape diversity. The purpose of the study is to assess the current structure of the regional system of protected areas of the Crimean Peninsula, the prospects for its development and identify the main geocological problems, mainly related to the consequences of significant recreational and agricultural environmental management. To study the geocological problems of regional protected areas in the model reserves “Cape Aya” and “Baydarsky”, field geobotanical descriptions were carried out, reserves of terrestrial phytomass, spatial features of nature management, the stage of recreational digression and the level of pollution were estimated. The mapping scheme of the protected areas of the peninsula made it possible to determine the representativeness of the regional system of territorial nature protection. Protected areas tend mainly to the mountainous and south-coastal regions of Crimea, while there are not enough protected sites in steppe landscapes. It has been revealed that the leading threats to the conservation of biodiversity in the protected areas of Crimea are unregulated recreation and associated pollution, the expansion of nature management and habitat reduction. The maximum transformation of the soil and vegetation cover was noted in the coastal strip of the Cape Aya nature reserve under conditions of abnormal recreational loads — up to the third stage of recreational digression. In the conditions of the intermountain basins of the Baydarsky reserve, residential zones are expanding and habitats are fragmenting. To reduce the severity of geocological problems, it is recommended to increase the area of protected areas by creating new facilities and expanding existing ones, rationing anthropogenic loads and observing the regime of facilities.

Keywords: protected areas, natural reserve, geo-environmental problems, recreational digression, the Crimean peninsula

REFERENCES

1. Global'naya perspektiva v oblasti bioraznoobraziya 5 // [sajt]. Konvenciya o bioraznoobrazii. URL: <https://www.cbd.int/gbo/gbo5/publication/gbo-5-spm-ru.pdf> (data obrashcheniya: 16.12.2023).
2. Durbanskij akkord: Materialy Pyatogo vseirnogo kongressa po osobo ohranyaemym prirodnyim territoriyam. Per. s angl. // Otv. Red. Yu. L. Mazurov — M.: Institut Naslediya, 2004. 272 s.
3. Departament prirodnyh resursov i ekologii goroda Sevastopolya // [sajt]. URL: <https://spn.sev.gov.ru/deyatelnost/osobo-okhranyaemye-prirodnye-territorii-sevastopolya/obshchie-svedeniya/> (data obrashcheniya: 16.12.2023).
4. Doklad o sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy na territorii Respubliki Krym v 2022 godu. Simferopol': OOO “Print”, 2023. 448 s.
5. *Ena A. V.* Prirodnaya flora Krymskogo poluostrova. Simferopol': N. Orianda, 2012. 232 s.

6. *Epihin D. V., Vahrusheva L. P.* Ekologo-biomorfologicheskie osobennosti stepnyh soobshchestv central'noj chasti Predgornogo Kryma // Sbornik nauchnyh trudov Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada. 2019. T. 149. S. 65–77.

7. *Kazanskaya N. S.* Izuchenie rekreacionnoj digressii estestvennyh gruppirovok rastitel'nosti // Izvestiya AN SSSR. Ser. geogr. 1972. № 1. S. 46–60.

8. *Kashirina E. S., Golubeva E. I.* Prirodopol'zovanie na osobo ohranyaemyh prirodnyh territoriyah Krymskogo poluostrova // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2016. № 5. S. 91–97.

<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-91-97>

9. *Mironova L. P., Nukhimovskaya Yu. D.* Stepnye ekosistemy Feodosiyskogo nizkogorya: chto my teryaem // Ekosistemy. 2022. No. 31. S. 39–60.

10. Osobo ohranyaemye prirodnye territorii Sevastopolya / E. I. Golubeva, E. A. Pozachenyuk, Yu. A. Gavrilova i dr. IT Arial Simferopol', 2020. 140 s.

11. *Pozachenyuk E. A., Pankeeva A. Yu., Pankeeva T. V.* Sovremennye landshafty prirodnogo zakaznika “Bajdarskij” // Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2020. T. 6. № 1. S. 144–155.

12. *Puzachenko Yu. G., Drozdova N. N.* Ploshchad' ohranyaemyh territorij // Itogi i perspektivy zapovednogo dela v SSSR. M.: Nauka, 1986. S. 72–109.

13. *Rudyk A. N., Prokopov G. A.* Analiz sovremennoj struktury OOPT Respubliki Krym // Nauchnye trudy nacional'nogo parka “Hvalynskij”. Sbornik nauchnyh statej V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2018. Saratov: OOO “Amirit”. 2018. S. 142–149.

14. *Sdasyuk G. V., Tishkov A. A.* Klyuchevye regiony ustojchivogo razvitiya // Ocenka kachestva okruzhayushchej srede i ekologicheskoe kartografirovanie / Ruk. N. F. Glazovskij, otv. redaktory G. V. Sdasyuk, A. S. SHestakov. M.: IG RAN, 1995. S. 107–116.

15. Sovremennye landshafty Kryma i sopredelnyh territorij Pod nauch. red. E. A. Pozachenyuk. Simferopol: Biznes Inform. 2009. 672 s.

16. *Allan J. R., Possingham H. P., Atkinson S. C., Waldron A., Di Marco M., Butchart S. H., Adams V. M., Kissling W. D., Worsdell T., Sandbrook C., Gibbon G., Kumar K., Mehta P., Maron M., Williams B. A., Jones K. R., Wintle B. A., Reside A. E., Watson J. E. M.* The minimum land area requiring conservation attention to safeguard biodiversity. *Science* 376 Vol.6597. 2022, PP. 1094–1101. <https://doi.org/10.1126/science.abl9127>

17. *Bontempi A., Venturi P., Del Bene D., Scheidel A., Zaldo-Aubanell Q., Maneja Zaragoza R.* Conflict and conservation: On the role of protected areas for environmental justice // *Global Environmental Change*. Vol.82. 2023, PP. 102740 <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102740>

18. *Bennett G., Wit P.* The Development and Application of Ecological Networks. A Review of Proposals, Plans and Programmes. — Amsterdam: AIDEnvironment, 2001. 132 pp.

19. *Bicknell J. E., Collins M. B., Pickles R. S. A., McCann N. P., Bernar C. R., Fernandes D. J., Miller M. G. R., James S. M., Williams A. U., Struebig M. J., Davies Z. G., Smith R. J.* Designing protected area networks that translate international conservation commitments into national action. *Biological Conservation*. 214. 2017. P. 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.08.024>

20. *Fahrig L., Watling J. I., Arnillas C. A., Arroyo-Rodríguez V., Jörger-Hickfang T., Müller J., Pereira H. M., Riva F., Rösch V., Seibold S., Tscharnkte T., May F.* Resolving the SLOSS dilemma for biodiversity conservation: a research agenda // *Biological Reviews*. 2022. Vol. 97, Is.1 P. 99–114. <https://doi.org/10.1111/brv.12792>

21. *Lindenmayer D. B., Wood J., McBurney L., Blair D., Banks S. C.* (2015b) Single large versus several small: the SLOSS debate in the context of bird responses to a variable retention logging experiment. *For Ecol Manag* 339:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.027>

22. *Maiorano L., Falcucci A., Boitani L.* Size-dependent resistance of protected areas to land-use change // *Proc Biol Sci*. 2008; 275(1640): PP. 1297–1304. <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.1756>

23. UNEP-WCMC and IUCN, 2023. Protected Planet Website. [WWW document] Available at <https://www.protectedplanet.net/en> (accessed 10.08.2023).

УДК 911.3 (571.1/.5)

СОЦИАЛЬНО-ДЕМОГРАФИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ НАСЕЛЕНИЯ И КАЧЕСТВО СРЕДЫ В ГОРОДАХ СИБИРИ

© 2025 г. Ю. Н. Дмитриева*

*Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

E-mail: Yuliya.dmitr@mail.ru

Поступила в редакцию 16.03.2024 г.

После доработки 05.12.2024 г.

Принята к публикации 10.03.2025 г.

В работе указаны особенности размещения сибирских городов, их значительная региональная дифференциация (количественная, статусу по людности и др.). Автором проанализированы индексы качества городской среды с целью оценки влияния природного и социально-экономического факторов на формирование демографического потенциала. Выявлено, что на индекс качества городской среды оказывают влияние статус города по людности, специализация и его социально-экономические особенности. Так, наиболее высокие показатели указанного индекса имеют города с ресурсной направленностью экономики, преимущественно в экспортно ориентированных субъектах Сибири: Тюменской области, Ханты-Мансийском (Югре) и Ямало-Ненецком автономных округах. В работе подчеркивается, что региональные центры моногородов отличаются стабильный рост населения, высокие значения качества городской среды и значительный диапазон концентрации населения региона (от 30 до 60%). Выявлены три типа возрастных структур в сибирском городском пространстве (прогрессивный, стационарный и регрессивный). В основу членения положены особенности естественных и миграционных процессов. В ряде республиканских городов (Кызыл, Горно-Алтайск, Улан-Удэ, Якутск) “молодость” возрастных структур обеспечивается высокими многолетними показателями рождаемости; в экономически состоятельных экспортно ориентированных городах (Ханты-Мансийск, Салехард, Тюмень) наблюдается естественный прирост и миграционный приток населения. Выявлено, что для городов со стационарной возрастной структурой (Иркутск, Красноярск, Новосибирск, Томск, Чита, Абакан), которые являются развитыми многофункциональными центрами, притягивающими население, характерна естественная убыль населения. В городах с регрессивным типом возрастной структуры (Барнаул, Кемерово и Омск) происходят процессы естественной и миграционной убыли населения. Автором проанализирована и графически отображена взаимосвязь качества городской среды и показателей социально-демографического потенциала. Применен метод балльной оценки.

Ключевые слова: качество городской среды, воспроизводство населения, социально-демографический потенциал, регионы и города Сибири

DOI: 10.31857/S0869607125010045, EDN: LISHSS

ВВЕДЕНИЕ

Особенности формирования демографической ситуации на различных территориальных уровнях являются актуальной темой изучения в зарубежных и отечественных работах. В научных трудах подчеркивается роль городского пространства

на формирование благоприятности экономической, социальной-демографической, экологической среды для общества, во многом определяющей особенности уровня и качества жизни населения. Современное развитие городов и их значительная дифференциация по людности, функциям, социально-экономическому развитию обуславливает интерес представителей различных дисциплин: историков, экономистов, географов, демографов, социологов и др. При оценке городской среды исследователями чаще учитывается комплекс параметров. Предложение о первом мониторинге с использованием интегральных индексов городского развития было выдвинуто на международной конференции программы ООН по населенным пунктам "Хабибат II" [39]. В настоящее время существует более десятка международных индексов, оценивающих качество городской среды и его влияния на жизнь человека. Приведем примеры индексов с позиции оценки качества жизни населения, особенностью которых являются индивидуальные оценки, полученные при опросах: 1) Рейтинг городов по качеству жизни [34, 35]. 2) Рейтинг качества городской среды: Livability Top 100 Best Places to Live ("100 лучших мест для жизни") [33]. 3) Рейтинг журнала Economist Intelligence Unit World's Most Liveable Cities ("Наиболее пригодные для жизни города мира") [31]. Данные рейтинги построены на основе большого количества индикаторов, что выстраивает города больше искусственно по наличию или отсутствию определенного набора показателей. Анализ отдельных зарубежных исследований показывает интерес авторов по следующим вопросам: оценка влияния городской среды на процессы рождаемости [32, 40], старения и смертности населения [41]; оценка влияния экономического фактора на процессы урбанизации [26, 27]. В других трудах анализируется рост экономики в городах и миграционное притяжение населения [30, 37], а также опосредованное влияние миграции на рост рождаемости [25]. Классическим примером исследований в разрезе медицинской географии является анализ мест проживания и здоровья населения [29, 36], а также зонирования внутригородской среды по комфортности проживания [28]. Современные и интересные работы по планировке городов с учетом концентрации демографических групп и их потребностей [38]. В данных работах учитываются не только определенный статус поселения (ЭГП, социально-экономическое развитие, развитие сфер здравоохранения и образования и т.д.), но и выявление причинно-следственных связей при взаимодействии элементов "среда — влияние — население — влияние — среда".

В России большинство работ посвящены социальным исследованиям в развитии общества, чаще рассматриваются отдельные демографические аспекты (показатели естественного и миграционного движения населения) [1, 3, 22] либо формирование половозрастных структур населения и социально-демографического потенциала [4, 6, 14]. Другие исследователи уделяют внимание влиянию региональных исторических, природных, экономических факторов на демографические процессы [5, 7, 10, 12] либо, наоборот — демографической ситуации на экономику региона [15]. В географических исследованиях при анализе методических подходов ученые отмечают: "составление многомерных интегральных индексов городов уже широко распространилось и успешно зарекомендовало себя в мире, тогда как в России число работ по построению индексов городов остается небольшим" [9, с. 22]. Так, комплексные оценки и многофакторность анализа качества жизни на локальном уровне городов обобщены и представлены в работах Б. Н. Порфильева, Б. А. Ревич и др. [16, 18]. Интерес вызывают экономгеографические работы, посвященные изучению урбанизационных процессов локального уровня [8, 13, 21]. Исследований взаимосвязи меж-

ду структурно-демографическими характеристиками городов и качеством городской среды по Сибирским регионам практически нет. При этом для территорий Сибири, население которой размещено крайне неравномерно, существует значительная кратность различий уровня урбанизации в разрезе регионов (от 29.2 до 92.8%), а для городов характерна значительная дифференциация по социально-экономическому статусу и людности (от 1064 чел. до 1136 тыс. чел.). Поэтому автором использован комплексный подход при анализе факторов, оказывающих влияние на формирование и особенности социально-демографического потенциала на локальном уровне. В работе акцентируется, что демографический фактор (естественное воспроизводство населения, миграционные процессы, возрастная структура) является значимым элементом устойчивого функционирования городов.

Цель выполненного исследования — выявление взаимосвязи между структурно-демографическими характеристиками городов и качеством городской среды при формировании социально-демографического потенциала урбанизированного пространства Сибири. В представленном исследовании демографический потенциал рассматривается в широком смысле — “это потенциал общего движения населения (потенциал воспроизводства населения и миграционный потенциал), включающий возможные изменения численности и структуры населения за счет рождаемости, смертности, эмиграции и иммиграции” [20, с. 17].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе проанализированы показатели индекса качества городской среды (КГС) по данным исследований Минстроя РФ за 2022 г. Индекс КГС учитывает комфортность шести городских пространств (жилье, общественно-деловая инфраструктура, социально-досуговая инфраструктура, общегородское пространство, озелененные пространства и улично-дорожная сеть) по шести критериям (безопасность, комфортность, экологичность и здоровье, идентичность и разнообразие, современность и актуальность среды, эффективность управления). В результате КГС по каждому городу складывалось из суммы 36 индикаторов (по шкале от 0 до 10 баллов). Городская среда считается благоприятной при значении выше 180 баллов [11].

При анализе индикаторов качества среды в городах Сибири автор опирался на две предыдущие работы, где применялись указанные показатели: Т. Г. Ратьковской “Сибирские и дальневосточные города в общероссийском индексе качества городской среды” [17] и Е. В. Будиловой с соавторами “Влияние качества городской среды на демографические показатели здоровья населения” [3].

Далее в работе автором проанализированы основные демографические показатели: прирост населения за десятилетний период и половозрастные структуры населения (2012–2022) в городах — региональных центрах 16 регионов Сибири: Тюменской области с автономными округами — Ханты-Мансийским (ХМАО-Югра) и Ямало-Ненецким (ЯНАО), Республике Саха (Якутия), Республике Бурятия, Забайкальском крае и регионах Сибирского федерального округа на основе базы данных Федеральной службы государственной статистики. В работе учтено, что в связи с пенсионной реформой верхняя граница трудоспособного возраста сдвинулась, поэтому численность людей пенсионного возраста составили мужчины в возрасте от 62 лет и старше (начиная с 1960 г. рождения) и женщины от 57 лет и старше (начиная с 1965 г. рождения) за 2022 г. На основе анализа данных статистического наблюдения по городам Сибири выявлены следующие типы возрастных структур: прогрессивный тип (доля лиц младше трудоспособного населения превышает долю

лиц старше трудоспособного возраста); стационарный тип (доли лиц младше и старше трудоспособного возраста равны); регрессивный тип (доля лиц старше трудоспособного населения превышает долю лиц младше трудоспособного).

На основе демографических показателей и индекса КГС автором предложены группировки городов по показателям социально-демографического потенциала и индекса качества городской среды. Каждая группа разбита на три уровня: со значениями выше среднего (3 балла), средними (2 балла) и низкими показателями (1 балл), что позволило провести корреляцию между факторами КГС и показателями социально-демографического потенциала.

При написании работы использованы описательные, статистические, сравнительно-географические, картографические методы. Автором визуализирована сложившаяся ситуация по качеству городской среды (благоприятная, неблагоприятная) в городах Сибири с учетом классификации их по людности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика городов Сибири. Особенностью размещения населения Сибири является тяготение к главным транспортным магистралям. “Велико градобразующее влияние железнодорожных линий, на которых проживает в сумме 90.3% городского населения. Уникальна в этом отношении роль Транссиба как главной экономической оси Сибири, вдоль которого располагаются 125 городских поселений, в том числе 51 город, и проживает 44% городского населения макрорегиона” [2, с. 7].

На территории Сибирского макрорегиона (в составе указанных 16 регионов) проживает 23.7 млн человек, что составляет 16% населения России (за 2023 г.). Субширотную зону южных более благоприятных для проживания территорий, где сосредоточена большая часть сибирских поселений, называют по праву основной полосой расселения. При этом более половины населения Сибири (12.8 млн чел.) сосредоточено в пяти регионах: Красноярском крае (2.85), Новосибирской (2.78), Кемеровской (2.60), Иркутской (2.35) областях и Алтайском крае (2.26 млн чел.) соответственно [23].

Городское население в Сибири составляет 17.64 млн чел. (74.4%), сельское — 6.07 млн (25.6%), что практически соответствует уровню среднероссийского показателя (74.8%). В разрезе регионов наблюдается значительная дифференциация данного показателя: от минимума в Республике Алтай (уровень урбанизации 29.2%) до максимального показателя по ХМАО-Югре (92.8%).

Для Сибири также характерна значительная разница по числу городов в разрезе регионов. Наибольшее количество городов среди 16 регионов сосредоточено в трех: Красноярском крае, Кемеровской и Иркутской областях (соответственно 23, 23 и 22), наименьшее — в четырех регионах: республиках Тыве и Хакасии, Тюменской области (по 5 городов) и Республике Алтай (1 город).

Сибирские города имеют различный статус по людности — от микрогородов до городов-миллионеров. Наибольшую группу составляют полусредние города, малые и микрогорода, в которых в целом проживает около 11% населения Сибири (табл. 1).

Около 1/3 жителей Сибири сосредоточены в 9 городах: городах-миллионерах — Новосибирске, Омске, Красноярске (вместе 16.5%), и крупных городах — Тюмени, Барнауле, Иркутске, Томске, Кемерово и Новокузнецке (вместе — 15.6% от общей численности населения).

Таблица 1. Распределение городов Сибири по людности, на 01.01.2023 г.**Table 1.** Distribution of Siberian cities according to population quantity, for 01.01.2023

Группа	С численностью населения, тыс. чел.	Число городов	Общая численность населения в данных городах, тыс. чел.	Доля населения, проживающего в городах, % (от всех городских жителей)	Доля населения, проживающего в городах, % (от общей численности)
Города-миллионеры	свыше 1000	3	3850.5	24.0	16.5
Крупные города	500–999.9	6	3732.4	23.3	15.6
Большие города	100–499.9	20	4036.0	25.2	17.0
Средние города	50–99.9	24	1714.3	10.7	7.2
Полусредние города	20–49.9	63	2058.5	12.8	8.9
Малые города	10–19.9	38	528.1	3.3	2.1
Микроргорода	до 10	18	111.4	0.7	0.4
Итого	-	172	16031.2	100	67.7

Составлено автором по [23].

Региональные центры представлены городами различного статуса: от средних (г. Горно-Алтайск, г. Салехард) до городов-миллионеров (г. Красноярск, г. Новосибирск, г. Омск). Несколько региональных столиц представляют собой своеобразные “моноцентры”, в которых сосредоточены 30–60% населения от общей численности всего региона. Лидером по данному критерию является Омская область. В региональном центре, городе-миллионере Омске (с численностью населения 1126.2 тыс. чел.), сосредоточено 60% жителей всей области. Сходная картина размещения населения характерна для нескольких регионов: Новосибирской области — в г. Новосибирске (1621.3 тыс. чел.) сосредоточено 58.3% населения региона; в Тюменской и Томской областях — в региональных центрах сосредоточено по 50% людей от общей численности региона.

Качество городской среды в городах Сибири. Значение индекса качества городской среды за 2022 г. по территории Сибирского макрорегиона варьировалось в пределах от 109 (г. Алзамай Иркутской области) до 247 баллов (г. Ханты-Мансийск) [11]. Региональные центры имеют максимальное значение качества городской среды почти в половине регионов; это города Ханты-Мансийск (247 баллов), Тюмень (240), Абакан (214), Кемерово (212), Новосибирск (204), Улан-Удэ (185) и Якутск (185).

Среди регионов максимальные индексы качества городской среды имеют некоторые города ХМАО-Югра, ЯНАО и Тюменской области — более 240 баллов. В этих регионах нижние показатели индекса качества среды в городах составляют 180 баллов, что близко по значению для городов с максимальными значениями (Улан-Удэ, Калачинск, Якутск) в своих регионах (Республика Бурятия, Омская область, Республика Саха (Якутия)). В региональном разрезе более значительную разницу между максимальными и минимальными показателями индекса благоприятности городской среды имеют города Иркутской области и Красноярского края (рис. 1).

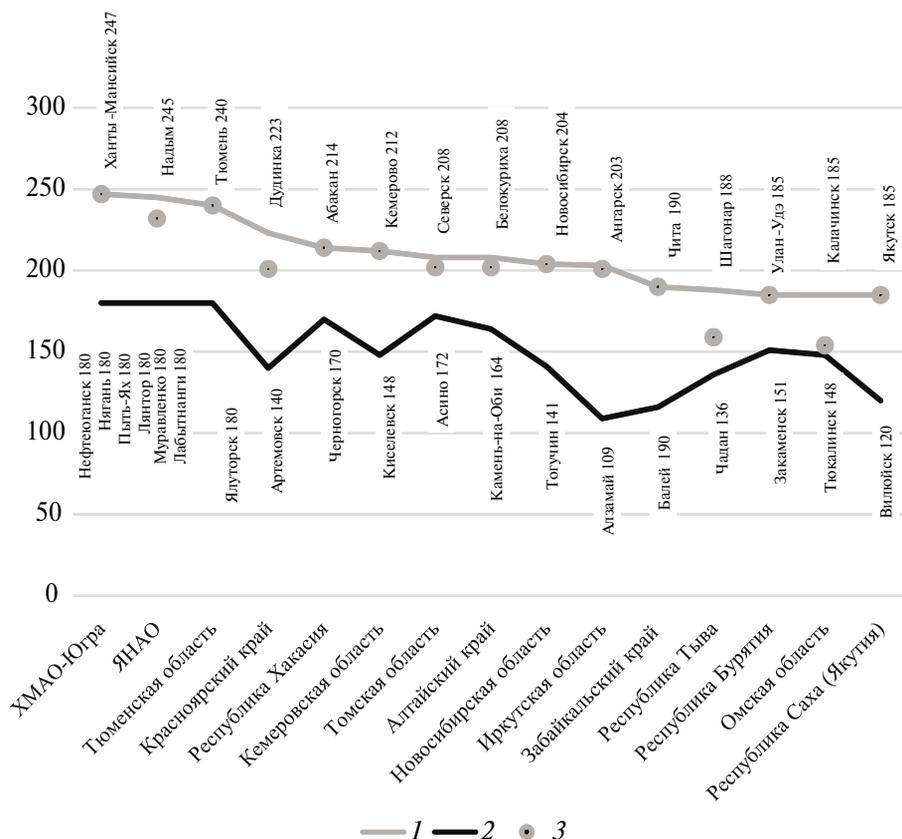


Рис. 1. Дифференциация качества городской среды в регионах Сибири, 2022 г. Значение индекса качества городской среды: 1 — максимальное среди городов в регионе, 2 — минимальное среди городов в регионе, 3 — в региональном центре.

Fig. 1. Differentiation of quality of city environment in regions of Siberia, 2022. Meaning of city environment quality index: 1 — maximal among cities of region, 2 — minimal among cities of region, 3 — in regional center.

Данные регионы в сравнении с остальными регионами Сибири имеют наибольшее количество полусредних, малых и микрогородов: Красноярский край — 15 из 23, Иркутская область — 17 из 22. В группе городов такого статуса по людности зарегистрированы наиболее низкие показатели КГС.

Среди регионов на рисунке не представлена Республика Алтай, так как все городское население в ней сосредоточено в единственном городе — Горно-Алтайске (индекс КГС составляет 198 баллов), что обуславливает стопроцентный показатель благоприятности качества городской среды.

При региональном анализе городов Сибири выявлена практически прямая зависимость статуса города по людности и благоприятности качества городской среды — в городах с большей численностью населения наблюдается более высокое значение качества городской среды: 1) среди трех городов-миллионеров в двух (Новосибирск и Красноярск) выявлена благоприятная городская среда, что в процентах составило 67 против 33% (г. Омск); 2) для всех шести крупных городов Сибири характерна благоприятная среда (или 100%); 3) из 20 больших городов благоприятная среда

характерна для 15, что составило 75%; 4) из 24 средних городов благоприятная среда выявлена в 9 городах, или 37%; 5) из 63 полусредних городов благоприятная среда характерна для 21 города, или 33%; 6) среди 38 малых городов — благоприятная среда выявлена в 8 (или 21%); среди 18 микрогородов нет городов с благоприятным значением индекса городской среды.

При анализе территориальной демографической ситуации необходимо учитывать размещение населения по городам с благоприятным и неблагоприятным качеством среды, что дает более объективную оценку, по сравнению с количеством городов. Доля населения, проживающего в населенных пунктах с благоприятной оценкой качества городской среды, варьируется от 96 (Тюменская область) до 3% (Омская область). В целом выделяются 4 региона с максимальными значениями данного показателя (в пределах 84–96%): Тюменская, Томская, Новосибирская области и ЯНАО. В группу со средними значениями в пределах 60–79% вошли большинство регионов Сибири. В Республике Тыва и Омской области наиболее низкий показатель — 6 и 3% населения проживают в городах с благоприятной городской средой.

Социально-демографический потенциал в городах и регионах Сибири. Анализ динамики общей численности населения в разрезе региональных столиц за период 2011–2022 гг. выявил значительные изменения. За десятилетний период произошел рост общей численности во всех городах, кроме г. Омска [23]. В абсолютных показателях наибольший рост произошел в г. Тюмень на 243.7 тыс. чел., что составило прирост на 41.7%, в г. Красноярске — на 125.5 тыс. чел. (или на 12.8%), в г. Новосибирске — на 122.5 тыс. чел. (или на 8.2%). С учетом неравномерного размещения в городах следует отметить рост в относительных показателях в г. Ханты-Мансийске на 31.7% (на 25.5 тыс. чел.), в г. Салехарде — на 22% (на 9.4 тыс. чел.), в г. Якутске — на 18.9% (на 54.2 тыс. чел.) (табл. 2).

Выявлено, что для региональных центров характерны три типа возрастных структур. Прогрессивный тип возрастных структур выявлен в городах: Кызыл (28 : 61 : 11), Горно-Алтайск (25 : 59 : 16), Улан-Удэ (23 : 60 : 17), Якутск (23 : 64 : 13), Ханты-Мансийск (22 : 65 : 13), Салехард (25 : 64 : 11) и Тюмень (22 : 60 : 18). В первых четырех городах “молодость” возрастных структур обеспечивается высокими многолетними показателями рождаемости. В остальных городах особенностью является более высокая доля населения в трудоспособных возрастах по причине занятости людей в сферах добычи нефти и газа. В частности, в ЯНАО на долю промышленности приходится 53.5% ВВП, основу хозяйства составляет нефтегазодобывающая отрасль.

В группу со стационарным типом возрастных структур вошли несколько региональных столиц с практически равным соотношением численности людей в группах младше и старше трудоспособных возрастов: г. Иркутск (21 : 60 : 19), г. Красноярск (19 : 62 : 19), г. Новосибирск (19 : 59 : 22), г. Томск (18 : 61 : 21); г. Чита (20 : 63 : 17), г. Абакан (22 : 59 : 19). В данном случае региональные столицы являются развитыми многофункциональными центрами, притягивающими население, но в то же время в них происходит естественная убыль населения.

В городах с регрессивным типом возрастных структур доля пенсионеров превышает долю детей: г. Барнаул (18 : 60 : 22), г. Кемерово (18 : 59 : 23) и г. Омск (18 : 57 : 25). В данных городах сложилась неблагоприятная демографическая ситуация — естественная и миграционная убыль населения. Следует отметить, что типы возрастных структур регионального центра на большинстве территорий соответствуют общим показателям возрастной структуры, сложившейся в регионе (рис. 2).

Таблица 2. Динамика численности населения по возрастным группам в городах Сибири, 2011–2022 гг.**Table 2.** Dynamic of population according to age groups in cities of Siberia, 2011–2022

Региональная столица, город	Общая численность, тыс. чел		Прирост		Численность населения по возрастным группам, тыс. чел.			
	2011 г.	2022 г.	тыс.	%	МТ	ТВ	СТ	ПС
					2022 г.			
Горно-Алтайск	57.1	64.6	7.5	13.1	16.2	38.1	10.3	П
Кызыл	110.2	123.3	13.1	11.9	34.9	75.2	13.2	П
Абакан	164.5	187.1	22.6	13.7	41.5	109.5	36.1	С
Барнаул	671.2	692.1	20.9	3.1	123.5	415.0	153.6	Р
Красноярск	978.8	1103.8	125.0	12.8	209.0	683.3	211.5	С
Иркутск	590.0	617.2	27.2	4.6	130.4	370.4	116.4	С
Кемерово	532.7	549.3	16.6	3.1	98.6	325.5	125.2	Р
Новосибирск	1498.9	1621.4	122.5	8.2	299.1	963.7	358.6	С
Омск	1154.1	1139.9	−14.2	−1.2	206.4	651.2	282.3	Р
Томск	526.0	558.7	32.7	6.2	100.2	339.3	119.2	С
Тюмень	584.9	828.6	243.7	41.7	181.7	495.6	151.2	П
Ханты-Мансийск	80.5	106.0	25.5	31.7	23.4	69.0	13.6	П
Салехард	42.8	52.2	9.4	22.0	13.1	33.3	5.8	П
Улан-Удэ	405.9	436.4	30.5	7.5	99.1	259.5	77.8	П
Чита	325.5	350.0	24.5	7.5	70.3	221.0	58.7	С
Якутск	287.0	341.2	54.2	18.9	77.1	219.3	44.8	П

Примечание: МТ — младше трудоспособного; ТВ — трудоспособного возраста; СТ — старше трудоспособного; ПС — прогрессивность возрастной структуры: П — прогрессивная, С — стационарная, Р — регрессивная.

Note: UW — under working age; WA — working age; OW — older working age; PS — progressiveness of age structure; P — progressive; S — stationary, R — regressive.

Исключениями являются г. Новосибирск (стационарный тип) и Новосибирская область (регрессивный тип), г. Томск (стационарный тип) и Томская область (регрессивный тип), г. Тюмень (прогрессивный тип) и Тюменская область без автономных округов (стационарный тип). Данные города обладают несколькими преимуществами для населения: разнообразием рынков труда, возможностями обучения для детей и молодежи, широким выбором товаров и услуг, что сказывается на притоке людей в города-центры.

Взаимосвязь качества городской среды и демографических показателей

Для выявления взаимосвязи между демографическими показателями и условиями проживания в городе региональные столицы распределены автором по уровням в разрезе трех индикаторов: прироста населения, прогрессивности возрастной структуры и индекса качества городской среды.

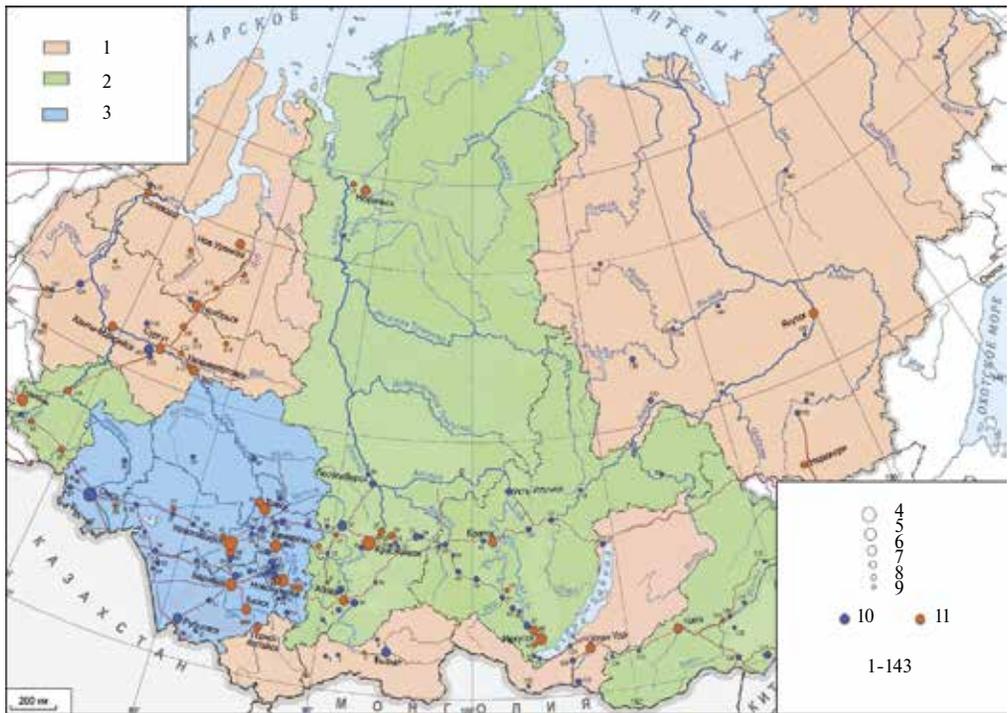


Рис. 2. Качество среды и прогрессивность возрастных структур в Сибири. Обозначения: тип возрастной структуры в регионе. 1 — прогрессивный, 2 — стационарный, 3 — регрессивный. Города по людности. 4 — город-миллионер, 5 — крупный, 6 — большой, 7 — средний, 8 — полусредний, 9 — малый и микрогорода. Качество городской среды. 10 — благоприятная, 11 — неблагоприятная.

Цифрами на карте обозначены города: Республика Тыва — 1. Ак-Довурак, 2. Чадан, 3. Шагонар, 4. Туран; Республика Хакасия — 5. Черногорск, 6. Саяногорск, 7. Абаза; Алтайский край — 8. Новоалтайск, 9. Заринск, 10. Белокуриха, 11. Алейск, 12. Змеиногорск, 13. Горняк, 14. Яровое, 15. Славгород, 16. Каменьна-Оби; Красноярский край — 17. Дудинка, 18. Игарка, 19. Енисейск, 20. Козинск, 21. Боготол, 22. Шарыпово, 23. Ужур, 24. Назарово, 25. Ачинск, 26. Дивногорск, 27. Железногорск, 28. Сосновоборск, 29. Зеленогорск, 30. Уяр, 31. Заозерный, 32. Бородино, 33. Канск, 34. Иланский, 35. Артемовск, 36. Минусинск; Иркутская область — 37. Бирюсинск, 38. Тайшет, 39. Алзамай, 40. Нижнеудинск, 41. Вихоревка, 42. Тулун, 43. Саянск, 44. Зима, 45. Черемхово, 46. Свирск, 47. Усолье-Сибирское, 48. Ангарск, 49. Шелехов, 50. Слодянка, 51. Байкальск, 52. Железногорск-Илимский, 53. Усть-Кут, 54. Киренск, 55. Бодайбо; Кемеровская область — 56. Мариинск, 57. Анжеро-Судженск, 58. Тайга, 59. Юрга, 60. Березовский, 61. Топки, 62. Ленинск-Кузнецкий, 63. Полысаево, 64. Белово, 65. Гурьевск, 66. Салаир, 67. Киселевск, 68. Прокопьевск, 69. Мыски, 70. Междуреченск, 71. Осинники, 72. Калтан, 73. Таштагол; Новосибирская область — 74. Карасук, 75. Купино, 76. Татарск, 77. Куйбышев, 78. Барабинск, 79. Каргат, 80. Чулым, 81. Обь, 82. Болотное, 83. Тогучин, 84. Бердск, 85. Искитим, 86. Черепаново; Омская область — 87. Исилькуль, 88. Называевск, 89. Тюкалинск, 90. Тара, 91. Калачинск; Томская область — 92. Стрежевой, 93. Кедровый, 94. Колпашево, 95. Асино, 96. Северск; Тюменская область — 97. Ишим, 98. Заводоуковск, 99. Ялуторовск, 100. Тобольск; ХМАО-Югра — 101. Урай, 102. Югорск, 103. Советский, 104. Нягань, 105. Белоярский, 106. Лянтор, 107. Нефтеюганск, 108. Пыть-Ях, 109. Когалым, 110. Радужный, 111. Покачи, 112. Лангепас, 113. Мегион; ЯНАО — 114. Муравленко, 115. Губкинский, 116. Тарко-Сале, 117. Надым, 118. Лабитнанги; Республика Бурятия — 119. Северобайкальск, 120. Бабушкин, 121. Гусиноозерск, 122. Закаменск, 123. Кяхта; Забайкальский край — 124. Петровск-Забайкальский, 125. Хилок, 126. Борзя, 127. Краснокаменск, 128. Балей, 129. Шилка, 130. Нерчинск, 131. Сретенск, 132. Могоча; Республика Саха (Якутия) — 133. Алдан, 134. Томмот, 135. Покровск, 136. Олекминск, 137. Ленск, 138. Мирный, 139. Нюрба, 140. Вилюйск, 141. Удачный, 142. Верхоянск, 143. Среднеколымск.

Fig. 2. Environmental quality and progressiveness of age structures in Siberia. Designation: The type of age structure in the region. 1 — progressive, 2 — stationary, 3 — regressive; Cities according to population quantity. 4 — millionaire city, 5 — large, 6 — big, 7 — average, 8 — halfmiddle, 9 — small and microcities; Environment quality. 10 — favorable, 11 — unfavorable.

The cities pointed by numbers: *the Republic of Tyva* — 1. Ak-Dovurak, 2. Chadan, 3. Shagonar, 4. Turan; *the Republic of Khakassia* — 5. Chernogorsk, 6. Sayanogorsk, 7. Abaza; *Altai Territory* — 8. Novoaltaysk, 9. Zarinsk, 10. Belokurikha, 11. Aleysk, 12. Zmeinogorsk, 13. Gornyyak, 14. Yarovoeye, 15. Slavgorod, 16. Kamen-na-Ob; *Krasnoyarsk Territory* — 17. Dudinka, 18. Igarka, 19. Yeniseisk, 20. Kodinsk, 21. Bogotol, 22. Sharypovo, 23. Uzhur, 24. Nazarovo, 25. Achinsk, 26. Divnogorsk, 27. Zheleznogorsk, 28. Sosnovoborsk, 29. Zelenogorsk, 30. Uyar, 31. Zaozerny, 32. Borodino, 33. Kansk, 34. Ilansky, 35. Artemovsk, 36. Minusinsk; *Irkutsk Region* — 37. Biryusinsk, 38. Tayshet, 39. Alzamai, 40. Nizhneudinsk, 41. Vikhorevka, 42. Tulun, 43. Sayansk, 44. Winter, 45. Cheremkhovo, 46. Svirsk, 47. Usolye-Sibirskoye, 48. Angarsk, 49. Shelekhov, 50. Slyudyanka, 51. Baikalsk, 52. Zheleznogorsk-II-imsky, 53 Ust-Kut, 54. Kirensk, 55. Bodaibo; *Kemerovo Region* — 56. Mariinsk, 57. Anzhero-Sudzhensk, 58. Taiga, 59. Jurga, 60. Berezovsky, 61. Topki, 62. Leninsk-Kuznetsky, 63. Polysaev, 64. Belovo, 65. Guryevsk, 66. Salair, 67. Kiselevsk, 68. Prokopyevsk, 69. Myski, 70. Mezhdurechensk, 71. Osinniki, 72. Kaltan, 73. Tashtagol; *Novosibirsk Region* — 74. Karasuk, 75. Kupino, 76. Tatarsk, 77. Kuibyshev, 78. Barabinsk, 79. Kargat, 80. Chulym, 81. Ob, 82. Bolotnoye, 83. Toguchin, 84. Berdsk, 85. Iskitim, 86. Cherepanovo; *Omsk Region* — 87. Isilkul, 88. Zyvaevsk, 89. Tyukalinsk, 90. Tara, 91. Kalachinsk; *Tomsk Region* — 92. Strezhevoy, 93. Kedrovyy, 94. Kolpashevo, 95. Asino, 96. Seversk; *Tyumen Region* — 97. Ishim, 98. Zavodoukovsk, 99. Yalutorovsk, 100. Tobolsk; *KhMAO-Yugra* — 101. Urai, 102. Yugorsk, 103. Sovetsky, 104. Nyagan, 105. Beloyarsky, 106. Lyantor, 107. Nefteyugansk, 108. Pyt-Yakh, 109. Kogalym, 110. Raduzhny, 111. Pokachi, 112. Langepas, 113. Megion; *YANA O* — 114. Muravlenko, 115. Gubkinsky, 116. Tarko-Sale, 117. Nadym, 118. Labytnangi; *Republic of Buryatia* — 119. Severobaikalsk, 120. Babushkin, 121. Gusinoozersk, 122. Zakamensk, 123. Kyakhta; *Zabaikalsky Krai* — 124. Petrovsk-Zabaikalsky, 125. Khilok, 126. Borzya, 127. Krasnokamensk, 128. Baley, 129. Shilka, 130. Nerchinsk, 131. Sretensk, 132. Mogocha; *Republic of Sakha (Yakutia)* — 133. Aldan, 134. Tommot, 135. Pokrovsk, 136. Olekminsk, 137. Lensk, 138. Mirny, 139. Nyurba, 140. Vilyuysk, 141. Successful, 142. Verkhoyansk, 143. Srednekolymsk.

По значениям прироста численности населения (за период 2011–2022 гг.) исследуемые города возможно распределить по возрастанию показателя на уровни: первый уровень с отрицательным приростом населения в процентах (оценка 1 балл) — г. Омск (–1.2); второй уровень с приростом населения до 10% (оценка 2 балла) — города: Барнаул (3.1), Кемерово (3.1), Иркутск (4.6), Томск (6.2), Улан-Удэ (7.5), Чита (7.5), Новосибирск (8.2); третий уровень с приростом выше 10% (оценка 3 балла) — города: Кызыл (11.9), Красноярск (12.8), Горно-Алтайск (13.1), Абакан (13.7), Якутск (18.9), Салехард (22.0), Ханты-Мансийск (31.7), Тюмень (41.7).

Показатели прогрессивности возрастной структуры в городах также распределены на уровни: первый уровень характерен для городов с регрессивным типом (оценка 1 балл) — города: Барнаул, Кемерово, Омск; второй уровень со стационарным типом (оценка 2 балла) — города: Абакан, Красноярск, Иркутск, Новосибирск, Томск, Чита; третий уровень с прогрессивным типом (оценка 3 балла) — города: Горно-Алтайск, Кызыл, Тюмень, Ханты-Мансийск, Салехард, Улан-Удэ, Якутск.

Соответственно, показатели качества городской среды распределены: первый уровень с неблагоприятной городской средой, в которых значение индекса составляет от 150 до 180 (оценка 1 балл) — города Омск (154), Кызыл (159); второй уровень с благоприятной городской средой, со значением индекса от 181 до 210 (оценка 2 балла) — города Улан-Удэ (185), Якутск (185), Чита (190), Горно-Алтайск (198), Красноярск (201), Иркутск (201), Барнаул (202), Томск (202), Новосибирск (204); третий уровень с наиболее благоприятной городской средой, со значением индекса более 210 (оценка 3 балла) — города Кемерово (212), Абакан (214), Салехард (232), Тюмень (240), Ханты-Мансийск (247).

Согласно балльной оценке по группам, выявлено, что показатели демографического потенциала (прирост и прогрессивность возрастной структуры)

совпадают в большинстве регионов (в 10 из 15). В остальных городах: Абакан, Барнаул, Красноярск и Кемерово — наблюдается естественная убыль населения, а основой увеличения численности является миграционный прирост, что отражается на возрастной структуре (стационарная или регрессивная), что проявляется в увеличении групп населения в трудоспособных возрастах, либо старением населения. В г. Улан-Удэ, наоборот, показатели естественного прироста за несколько лет превышали миграционные значения, что в результате обеспечило прогрессивность возрастных структур в Республике Бурятия и г. Улан-Удэ (рис. 3).

Линия графика, отражающая качество среды, полностью коррелирует со средними значениями показателей демографического потенциала в городах: Иркутск, Новосибирск, Омск, Томск, Тюмень, Ханты-Мансийск, Салехард, Чита. На одну единицу ниже значение качества городской среды по сравнению с демографическими показателями в городах Горно-Алтайск и Якутск, и на 2 единицы ниже в г. Кызыл, что, возможно, объясняется сохранением в них многолетних высоких уровней рождаемости.

Таким образом, можно сделать вывод, что качество городской среды является одним из ключевых факторов формирования социально-демографического потенциала. Региональные центры Западной Сибири (Тюмень, Ханты-Мансийск, Салехард) лидируют практически по всем позициям качества городской среды и показателям демографического потенциала. Среди других регионов и городов Сибири в них наблюдаются наиболее высокие уровни заработных плат и уровня качества жизни населения: ХМАО — 9-е место в РФ, Тюменская область — 16-е место, ЯНАО — 17-е место соответственно [19].

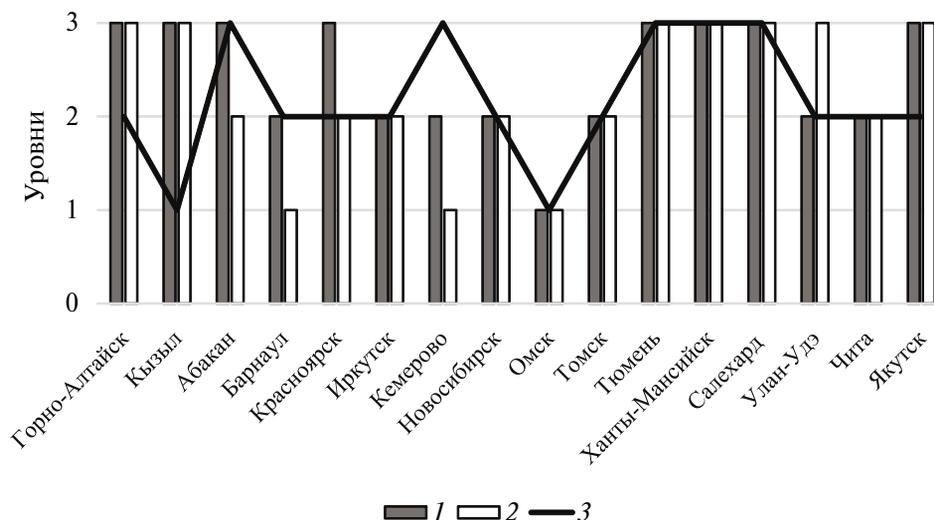


Рис. 3. Корреляция прироста населения, прогрессивности возрастных структур и качества городской среды по уровням в регионах Сибири, 2022 г. Обозначения: 1 — прирост населения, 2012–2022 гг., 2 — прогрессивность возрастной структуры, 3 — качество городской среды.

Fig. 3. Correlation of population growth, progressiveness of age structures and quality of city environment by levels in regions of Siberia, 2022. Designation: 1 — population growth, 2012–2022, 2 — progressiveness of the age structure, 3 — quality of the urban environment.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа расширила исследования российских регионов по анализу качества среды городов на уровне Сибири. В частности, вычислены значения дифференциации индекса качества городской среды в разрезе шестнадцати регионов и указана доля населения, проживающего на территориях с благоприятной городской средой. Дифференциация индекса качества городской среды в разрезе регионов составляет 2.1 раза (от 247 до 120 баллов). Более низкие значения качества городской среды характерны для малых и микрогородов Красноярского края и Иркутской области. С учетом высокой концентрации населения в региональных центрах варьируется и показатель доли населения, проживающего на территориях с благоприятной оценкой качества городской среды в целом, варьируясь от 96% жителей (Тюменская область) до 3% (Омская область).

Анализ показателей социально-демографического потенциала: прироста населения за десятилетний период и прогрессивности возрастных структур — позволил отразить последствия основных демографических процессов — рождаемости, смертности, т.е. естественного воспроизводства населения и миграционных процессов в разрезе региональных центров. В работе автором впервые предложена и выполнена корреляция по показателям прироста населения, прогрессивности возрастных структур и качеством городской среды при разбивке городов по уровням с применением бальной оценки, что является дополнением к близким по тематике работам.

Автором в работе акцентируется, что малые города ХМАО (Югра) и ЯНАО имеют высокие индексы благоприятной городской среды, что указывает на большее влияние экономического статуса в регионах с развитой отраслью добычи природных ископаемых, чем статуса города по людности. Этим автор опровергает предположения в подобных исследованиях, в которых указывается на основную роль статуса города людности: чем выше численность населения, тем выше оценка благоприятности городской среды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ темы — ААА-А-А21-121012190019-9) в рамках научного проекта “Дифференциация и закономерности эколого-социально-экономического пространства сибирского макрорегиона с позиций восточного вектора развития в условиях глобальной нестабильности”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аюшеева В. Г., Батомункаев В. С., Зангеева Н. Р., Емельянова Н. В. Пространственный анализ возрастной структуры населения Азиатской России и сопредельных территорий // География и природные ресурсы. 2021. № 42(1). С. 25–32. <https://doi.org/10.15372/GIPR20210103>
2. Безруков Л. А. Особенности территориальной хозяйственно-расселенческой структуры и перспективы пространственного развития Сибири // Интернет-журнал “Наукovedение”. 2014. № 6. С. 1–20. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/05EVN614.pdf> (дата обращения: 14.01.2024).
3. Будилова Е. В., Лагутин М. Б., Мигранова Л. А. Влияние качества городской среды на демографические показатели здоровья населения // Народонаселение. 2021. Т. 24. № 1. С. 44–53. <https://doi.org/10.19181/population.2021.24.1.5>
4. Бюраева Ю. Г. Анализ демографической ситуации в регионах Сибирского федерального округа // Вестник БНЦ СО РАН. 2018. № 3(31). С. 113–117. <https://doi.org/10.31554/2222-9175-2018-31-113-117>

5. Воробьев Н. В., Валеева О. В., Дмитриева Ю. Н., Рыков П. В. Имплементация социально-демографического потенциала Сибири // География и природные ресурсы. 2020. № 5. С. 33–39. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-5\(33-39\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-5(33-39))
6. Глухова З. В., Алексеев Н. Е. Современные тенденции на рынке труда Сибири и Омской области // Вестник СибАди. 2012. № 3(25). С. 105–111.
7. Дмитриева Ю. Н. Региональные особенности возрастной структуры населения Сибири // География и природные ресурсы. 2023. № 4. С. 108–117. <https://doi.org/10.15372/GIPR20230411>
8. Дмитриева Ю. Н. Территориальная дифференциация демографических структур населения в регионах Сибири // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2023. № 44. С. 44–59. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.44>
9. Жихаревич Б. С., Русецкая О. В. Колебания в социально-экономическом развитии крупных городов России: методика и результаты расчета “вектора динамики” // Известия Русского географического общества. 2014. № 146(4). С. 1–12.
10. Землянский Д. Ю., Махрова А. Г., Медведникова Д. М. Методические подходы к составлению комплексных индексов социально-экономического развития городов // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 4. С. 21–31.
11. Зубаревич Н. В. Стратегия пространственного развития: приоритеты и инструменты // Вопросы экономики. 2019. № 1. С. 135–145. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2021-4-150-171>
12. Индекс качества городской среды. — 2022 г. URL: <https://индекс-городов.рф/#/> (дата обращения: 07.11.2023).
13. Исупов В. А. Историческая демография в Сибири: проблемы историографии // Гуманитарные науки в Сибири. 2012. № 4. С. 3–8.
14. Лимонов Л. Э., Несена М. В. Структурно-экономическая типология крупных Российских городов // Известия Русского географического общества. 2015. № 47(6). С. 59–77.
15. Локосов В. В., Рыбальченко С. И., Каткова И. П. Демографический и трудовой потенциал России в контексте целей устойчивого развития // Народонаселение. 2017. № 4. — С. 19–43. <https://doi.org/10.26653/1561-7785-2017-4-2>
16. Морозова Е. А., Челомбитко А. Н., Андреева Л. М. Демографическая ситуация и ее влияние на социально-экономическое развитие региона // Вестник Кемеровского государственного университета. 2012. № 2(50). С. 213–219.
17. Порфирьев Б. Н. Города и мегаполисы: проблема дефиниций и индикаторы устойчивого развития // Проблемы прогнозирования. 2018. № 2(167). С. 14–23.
18. Ратьковская Т. Г. Сибирские и дальневосточные города в общероссийском индексе качества городской среды // Эко. 2021. Т. 51. № 11. С. 157–175. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2021-11-157-175>
19. Ревич Б. А. Приоритетные факторы городской среды, влияющие на качество жизни населения мегаполисов // Проблемы прогнозирования. 2018. № 3(168). С. 58–66.
20. РИА Рейтинг. Рейтинг регионов по качеству жизни — 2022 г. URL: <https://riarating.ru/infografika/20230213/630236602.html> (дата обращения: 07.02.2024).
21. Рыбаковский О. Л., Таюнова О. А. Демографический потенциал: из истории понятия // Народонаселение. 2019. № 2. С. 17–25. <https://doi.org/10.24411/1561-7785-2019-000>
22. Смирнов И. П., Ткаченко А. А. Опыт оценки экономико-географического положения городов Центральной России // Известия Русского географического общества. 2015. № 147(5). С. 49–57.

23. *Соболева С. В., Смирнова Н. Е., Чудаева О. В.* Изменение численности и половозрастной структуры населения Сибирского федерального округа и его регионов в 1989–2017 гг.: оценка последствий и риски // Регион: экономика и социология. 2019. № 2(102). С. 151–184. <https://doi.org/15372/REG20190207>
24. Федеральная служба государственной статистики РФ. Информационно-аналитические материалы. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения: 19.10.2023).
25. Федеральная служба государственной статистики РФ. Информационно-аналитические материалы. Численность населения Российской Федерации по полу и возрасту на 01.01.2023 г. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13284> (дата обращения: 11.11.2023).
26. *Brockerhoff M.* Migration and the Fertility Transition in African Cities // Migration, Urbanization, and Development. 1998. № 2. P. 357–360.
27. *Chen N., Valente P., Zlotnik H.* What Do We Know About Recent Trends in Urbanization? // Geography, Sociology, Economics. 1998. № 3. P. 59–88.
28. *Donald J. F.* The identification of urban employment subcenters // Journal of Urban Economics. 1987. № 21. P. 242–258.
29. *Fujita M., Krugman P., Mori T.* On the Evolution of Hierarchical Urban Systems // European Economic Review. 1999. № 43. P. 209–251.
30. *Galea S., Vlahov D.* Urban Health: Evidence, Challenges and Directions // Annual Review of Public Health 2005. № 26. P. 341–365.
31. *Gibbs J.* The evolution of population concentration // Economic Geography. 1963. № 2. P. 119–129.
32. Global Liveability Report. Economist Intelligence Unit, The Economist’s “World’s Most Liveable Cities” 2017. URL: <https://www.economist.com/blogs/graphicdetail/2017/08/daily-chart-10> (дата обращения 04.12.2024).
33. *Hollos M., Larsen U.* Fertility Differentials Among the Ijo in Southern Nigeria: Does Urban Residence Make a Difference? // Social Science and Medicine. 1992. № 35. P. 1199–1210.
34. Livability “Top 100 Best Places to Live”. 2017. URL: <https://livability.com/best-places/top-100-best-places-to-live/2017> (дата обращения 04.12.2024).
35. Mercer. Quality of living city ranking. URL: <https://mobilityexchange.mercer.com/Insights/quality-of-living-rankings> (дата обращения 04.12.2024).
36. NUMBEO. About Quality of Life Indices. URL: https://www.numbeo.com/quality-of-life/indices_explained.jsp (дата обращения 04.12.2024).
37. *Paul B., Charafeddine R., Frohlich K.* Health inequalities and place: A theoretical conception of neighbourhood // Social Science & Medicine. 2007. Vol. 65. № 9. P. 1839–1852. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2007.05.037>
38. *Profiroiu M. C., Bodislav D. A.* Challenges of Sustainable Urban Development in the Context of Population Growth European // European Journal of Sustainable Development. 2020. Vol. 9. № 3. P. 51–57. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n3p51>
39. *Ruan Y., Zhang X., Zhang M.* Nonlinear and syneristic effects of demographic characteristics on urban polycentric structure using SHAP // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. № 29861 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81076-9>
40. The state of the world’s cities 2001. United Nations for Human Settlements Ed. Nairobi Kenya. UN-Habitat Publ. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/456069?v=pdf> (дата обращения 04.12.2024).
41. *White M. J., Catherine S. M.* Urbanization and Fertility: An Event-History Analysis of Coastal Ghana // Demography. 2008. № 45(4). P. 803–816. <https://doi.org/10.1353/dem.0.0035>

42. Yuan Y., Wu F. The development of the index of multiple deprivations from small-area population census in the city of Guangzhou // *Habitat International*. 2014. № 41. P. 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2013.07.010>

Socio-Demographic Potential of the Population and Quality of the Environment in Cities of Siberia

Yu. N. Dmitrieva*

**V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia
E-mail: Yuliya.dmitr@mail.ru*

Abstract — In the research the specialties of location of Siberian cities are indicated, their significant differentiation according to quantity in the regions and status according to population quantity. The author analyzed indexes of city environment quality for evaluation of influence of natural and social-economic factors on demographical potential formation. It was revealed that status of a city according to population quantity and its social-economical features have influence on the city environment quality index, so the cities with resource orientation of economics have higher indexes of city environment quality — in Tyumen oblast, Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra (KhMAO-Yugra) and Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (YaNAO). In the work it is underlined that regional centers are mono-centers, where stable increase of population is observed, high indexes of city environment quality are revealed and 30–60 % of region population is concentrated there. Three types of age structure of population are revealed in regional centers: progressive, stationary and regressive, in the base of which specialties of natural and migration processes lay. In such cities as Kyzyl, Gorno-Altaysk, Ulan-Ude, Yakutsk “young” age structures are provided with high long-term indexes of birthrate; in Khanty-Mansiysk, Salekhard, Tyumen natural growth and migration increase of population is observed. It is revealed that the cities with stationary age structure — Irkutsk, Krasnoyarsk, Novosibirsk, Tomsk, Chita and Abakan are developed multifunctional centers, that attract population, but natural decrease of population is typical there. It is revealed that in the cities with regressive type of age structure — Barnaul, Kemerovo and Omsk — processes of natural and migration decrease of population happen. The author analyzed and graphically shown relationship between environmental quality in cities and indexes of social-demographical potential with use of score.

Keywords: quality of environment, population reproduction, social-demographical potential, regions and cities of Siberia

REFERENCES

1. Ayusheeva V. G., Batomunkaev V. S., Zangeeva N. R., Emel'yanova N. V. Prostranstvennyy analiz vozrastnoj struktury naseleniya Aziatskoj Rossii i sopredel'nyx territorij // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2021. № 42(1). S. 25–32. <https://doi.org/10.15372/GIPR20210103>
2. Bezrukov L. A. Osobennosti territorial'noj xozyajstvenno-rasselencheskoj struktury i perspektivy prostranstvennogo razvitiya Sibiri // *Internet-zhurnal “Naukovedenie”*. 2014. № 6. S. 1–20. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/05EVN614.pdf> (data obrashheniya: 14.01.2024).
3. Budilova E. V., Lagutin M. B., Migranova L. A. Vliyanie kachestva gorodskoj sredy na demograficheskie pokazateli zdorov'ya naseleniya // *Narodonaselenie*. 2021. T. 24. № 1. S. 44–53. <https://doi.org/10.19181/population.2021.24.1.5>

4. Vorob'ev N. V., Valeeva O. V., Dmitrieva Yu. N., Rykov P. V. Implementaciya social'no-demograficheskogo potenciala Sibiri // Geografiya i prirodnye resursy. 2020. № 5. S. 33–39. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-5\(33-39\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-5(33-39))
5. Gluxova Z. V., Alekseev N. E. Sovremennye tendencii na rynke truda Sibiri i Omskoj oblasti // Vestnik SibAdi. 2012. № 3(25). S. 105–111.
6. Dmitrieva Yu. N. Regional'nye osobennosti vozrastnoj struktury naseleniya Sibiri // Geografiya i prirodnye resursy. 2023. № 4. S. 108–117. <https://doi.org/10.15372/GIPR20230411>
7. Dmitrieva Yu. N. Territorial'naya differenciaciya demograficheskix struktur naseleniya v regionax Sibiri // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle. 2023. № 44. S. 44–59. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.44>
8. Zhixarevich B. S., Ruseckaya O. V. Kolebaniya v social'no-e'konomicheskom razvitii krupnyx gorodov Rossii: metodika i rezul'taty rascheta "vektora dinamiki" // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshhestva. 2014. № 146 (4). S. 1–12.
9. Zemlyanskij D. Yu., Mahrova A. G., Medvednikova D. M. Metodicheskie podhody k sostavleniyu kompleksnyh indeksov social'no-ekonomicheskogo razvitiya gorodov // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2020. № 4. S. 21–31.
10. Zubarevich N. V. Strategiya prostranstvennogo razvitiya: priority i instrumenty // Voprosy ekonomiki. 2019. № 1. S. 135–145. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2021-4-150-171>
11. Indeks kachestva gorodskoj sredi. — 2022 g. URL: <https://indeks-gorodov.rf/#/> (data obrashheniya: 07.11.2023).
12. Isupov V. A. Istoricheskaya demografiya v Sibiri: problemy istoriografii // Gumanitarnye nauki v Sibiri. 2012. № 4. S. 3–8.
13. Limonov L. E., Nesena M. V. Strukturno-e'konomicheskaya tipologiya krupnyx Rossijskix gorodov // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshhestva. 2015. № 47(6). S. 59–77.
14. Lokosov V. V., Rybal'chenko S. I., Katkova I. P. Demograficheskij i trudovoj potencial Rossii v kontekste celej ustojchivogo razvitiya // Narodonaselenie. 2017. № 4. — S. 19–43. <https://doi.org/10.26653/1561-7785-2017-4-2>
15. Morozova E. A., Chelombitko A. N., Andreeva L. M. Demograficheskaya situaciya i ee vliyanie na social'no-e'konomicheskoe razvitie regiona // Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. № 2 (50). S. 213–219.
16. Porfir'ev B. N. Goroda i megapolisy: problema definicij i indikatory ustojchivogo razvitiya // Problemy prognozirovaniya. 2018. № 2 (167). S. 14–23.
17. Rat'kovskaya T. G. Sibirskie i dal'nevostochnye goroda v obshherossijskom indekse kachestva gorodskoj sredi // E'ko. 2021. T. 51. № 11. S. 157–175. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2021-11-157-175>
18. Revich B. A. Prioritetnye faktory gorodskoj sredi, vliyayushhie na kachestvo zhizni naseleniya megapolisov // Problemy prognozirovaniya. 2018. № 3 (168). S. 58–66.
19. RIA Rejting. Rejting regionov po kachestvu zhizni — 2022 g. URL: <https://riarating.ru/infografika/20230213/630236602.html> (data obrashheniya: 07.02.2024).
20. Rybakovskij O. L., Tayunova O. A. Demograficheskij potencial: iz istorii ponyatiya // Narodonaselenie. 2019. № 2. S. 17–25. <https://doi.org/10.24411/1561-7785-2019-000>
21. Smirnov I. P., Tkachenko A. A. Opyt ocenki e'konomiko-geograficheskogo polozheniya gorodov Central'noj Rossii // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshhestva. 2015. № 147 (5). S. 49–57.
22. Soboleva S. V., Smirnova N. E., Chudaeva O. V. Izmenenie chislennosti i polovozrastnoj struktury naseleniya Sibirskogo federal'nogo okruga i ego regionov v 1989–2017 gg.: ocenka posledstvij i risiki // Region: e'konomika i sociologiya. 2019. № 2 (102). S. 151–184. <https://doi.org/10.15372/REG20190207>

23. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki RF. Informacionno-analiticheskie materialy. Chislennost' naseleniya Rossijskoj Federacii po municipal'nym obrazovaniyam. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (data obrashheniya: 19.10.2023).
24. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki RF. Informacionno-analiticheskie materialy. Chislennost' naseleniya Rossijskoj Federacii po polu i vozrastu na 1.01.2023 g. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13284> (data obrashheniya: 11.11.2023).
25. Brockerhoff M. Migration and the Fertility Transition in African Cities // Migration, Urbanization, and Development. 1998. № 2. P. 357–360.
26. Chen N., Valente P., Zlotnik H. What Do We Know About Recent Trends in Urbanization? // Geography, Sociology, Economics. 1998. № 3. P. 59–88.
27. Donald J.F. The identification of urban employment subcenters // Journal of Urban Economics. 1987. № 21. P. 242–258.
28. Fujita M., Krugman P., Mori T. On the Evolution of Hierarchical Urban Systems // European Economic Review. 1999. № 43. P. 209–251.
29. Galea S., Vlahov D. Urban Health: Evidence, Challenges and Directions // Annual Review of Public Health 2005. № 26. P. 341–365.
30. Gibbs J. The evolution of population concentration // Economic Geography. 1963. № 2. P. 119–129.
31. Global Liveability Report. Economist Intelligence Unit, The Economist's "World's Most Liveable Cities" 2017. URL: <https://www.economist.com/blogs/graphicdetail/2017/08/daily-chart-10> (data obrashheniya 04.12.2024).
32. Hollos M., Larsen U. Fertility Differentials Among the Ijo in Southern Nigeria: Does Urban Residence Make a Difference? // Social Science and Medicine. 1992. № 35. P. 1199–1210.
33. Livability "Top 100 Best Places to Live". 2017. URL: <https://livability.com/best-places/top-100-best-places-to-live/2017> (data obrashheniya 05.12.2024).
34. Mercer. Quality of living city ranking. URL: <https://mobilityexchange.mercer.com/Insights/quality-of-living-rankings> (data obrashheniya 04.12.2024).
35. NUMBEO. About Quality of Life Indices. URL: https://www.numbeo.com/quality-of-life/indices_explained.jsp (data obrashheniya 05.12.2024).
36. Paul B., Charafeddine R., Frohlich K. Health inequalities and place: A theoretical conception of neighbourhood // Social Science & Medicine. 2007. Vol. 65. № 9. P. 1839–1852. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2007.05.037>
37. Profiroiu M.C., Bodislaw D.A. Challenges of Sustainable Urban Development in the Context of Population Growth European // European Journal of Sustainable Development. 2020. Vol. 9. № 3. P. 51–57. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n3p51>
38. Ruan Y., Zhang X., Zhang M. Nonlinear and syneristic effects of demographic characteristics on urban polycentric structure using SHAP // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. № 29861 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81076-9>
39. The state of the world's cities 2001. United Nations for Human Settlements Ed. Nairobi Kenya. UN-Habitat Publ. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/456069?v=pdf> (data obrashheniya 04.12.2024).
40. White M. J., Catherine S. M. Urbanization and Fertility: An Event-History Analysis of Coastal Ghana // Demography. 2008. № 45(4). P. 803–816. <https://doi.org/10.1353/dem.0.0035>
41. Yuan Y., Wu F. The development of the index of multiple deprivations from small-area population census in the city of Guangzhou // Habitat International. 2014. № 41. P. 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2013.07.010>

УДК 911.3:33

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ЮЖНЫХ СУБЪЕКТОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РФ

© 2025 г. М. Ю. Демидионов*

Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: demidionovforwork@gmail.com*

Поступила в редакцию 12.04.2024 г.

После доработки 09.01.2025 г.

Принята к публикации 10.03.2025 г.

Статья посвящена оценке ветроэнергетического потенциала для 5 субъектов в пределах Дальневосточного федерального округа РФ: Амурской и Сахалинской областей, Еврейской АО, Приморского и Хабаровского краев. При расчете потенциала использован метод анализа иерархий, совместно с нечеткой и булевой логиками. В ходе исследования был сформирован список критериев, необходимых для комплексной оценки. Впоследствии для каждой точки исследуемого пространства был рассчитан ветроэнергетический потенциал методом взвешенной линейной комбинации с использованием полученных ранее весов критериев и их относительных значений, рассчитанных при помощи нечеткой логики. Согласно полученным результатам, наиболее высокие показатели характерны для территорий, расположенных вдоль границы с Китаем. Также можно отметить районы недалеко от города Советская Гавань и поселка Ванино. Отдельно существуют небольшие по площади участки с высокими значениями потенциала, расположенные на Курильских островах, материковом побережье Сахалинского залива и на юге Приморского края. На основе полученных данных была произведена статистическая оценка для отдельных административно-территориальных единиц в границах исследуемых субъектов и выработаны соответствующие рекомендации.

Ключевые слова: ветровые электростанции, метод анализа иерархий, возобновляемая энергетика, Дальний Восток, ГИС

DOI: 10.31857/S0869607125010053, **EDN:** LIPPQN

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия возобновляемая энергетика занимает все большую долю в мировом энергобалансе. Многие политики, общественные деятели и исследователи ассоциируют данный процесс с четвертым энергетическим переходом — от традиционных источников энергии (в первую очередь нефти и газа) к возобновляемым (ВИЭ) [30]. Безусловно, по состоянию на начало 2024 г. доля традиционной энергетики превалирует над новыми энергетическими технологиями, однако отрицать активный рост последних невозможно.

Во многом подобная динамика стала следствием необходимости инкорпорирования возобновляемой энергетики в парадигму энергетической безопасности различных стран и регионов мира. На данный момент развитие возобновляемой энергетике в данном ключе связано с двумя ключевыми позициями: необходимостью бесперебойно и независимо обеспечивать энергией собственное население, а также

занимать желаемую долю рынка международной торговли энергоресурсами. Первый пункт обеспечивается в первую очередь тем фактом, что ВИЭ имеют строгую географическую привязку, как следствие, снимается вопрос зависимости той или иной территории от импорта сырья. Кроме того, объем возобновляемых источников энергии практически неисчерпаем, в отличие от углеводородов.

С позиции энергетической безопасности более интересен вопрос потенциальной экспортной составляющей. Помимо торговли собственно электроэнергией, произведенной с использованием ВИЭ, важно рассматривать и новые энергоносители, которые, как предполагается, придут на замену привычным нефти и газу. Одним из таких является “зеленый” водород — то есть водород, произведенный методом электролиза с использованием электроэнергии, полученной с применением ВИЭ.

РФ имеет потенциал стать одним из мировых лидеров в данном секторе, и стоит отметить, что подобные планы не раз звучали в общественно-политическом пространстве страны [10]. Схожие идеи, но уже на уровне стратегического планирования, изложены в “Концепции развития водородной энергетики РФ” [8]. В частности, одной из идей, обозначенных в упомянутом документе, было создание как минимум трех кластеров по производству водорода: Арктического, Северо-Западного и Восточного. И если на первый в основном возлагаются задачи по обеспечению топливом арктических территорий страны, то два последних имеют более экспортно-ориентированную направленность.

Учитывая современные геополитические реалии, включающие в себя и постепенную переориентацию экономики РФ на Азиатско-Тихоокеанский регион, именно Восточный кластер может сыграть ключевую роль в процессе развития водородной энергетики страны. Одним из этапов в данном процессе является оценка потенциала территории к размещению соответствующих производств. Подобного рода оценка играет экзистенциальную роль как при выстраивании геополитической и геоэкономической стратегий, так и при проведении более точечных изысканий относительно возможной локализации соответствующих производств. Нельзя забывать и о потенциальных проблемах с энергодефицитом исследуемого региона.

В научном дискурсе подобные изыскания зачастую имеют под собой именно географический базис. Природа данного явления заключается в комплексности географии как науки, позволяющей одновременно оценивать в рамках одной системы большое количество разномастных факторов, что в свою очередь должно приводить к более разносторонней оценке. В основе подобных исследований лежат различные методики: от более простых, учитывающих один или два параметра, до более комплексных. В качестве примера использования только скорости ветра при анализе ветроэнергетических ресурсов, можно привести исследование С. Ниянга и др. [25] для территории Сенегала. Более трудоемким является метод анализа ветроэнергетического потенциала с использованием распределения Вейбулла для прогнозирования возможной выработки электроэнергии. Ярким примером подобных работ является исследование С. Катти и др. [23], в котором авторы применили 11 методов аппроксимации параметров Вейбулла при оценке потенциала ветровой энергетики Тонга. В контексте ветроэнергетики стоит обратить внимание и на исследования по уточнению показателей скорости ветра, в частности реанализа данных, к примеру на участках, характеризующихся сложным рельефом, как в работе С. Киселевой и др. [7].

Исследования, в которых используется большее количество параметров для оценки потенциала энергетики, основанной на использовании ВИЭ, входят в группу многокритериального анализа. Особенно активно тема исследования возобновляемых источников энергии развивается в некоторых зарубежных исследованиях. Среди научных работ, в которых использованы подобные методы, можно отметить исследования для территории Ирана [13], Польши [15], Саудовской Аравии [14, 27], Туниса [28], США [29], Эфиопии [18]. Отдельно стоит отметить работу Ю. Нуурулаи по выбору оптимальных локаций для размещения ВЭС в Иране. В упомянутом исследовании мультикритериальный анализ используется вместе с нечеткой логикой, что более точно отражает характер пространственных изменений различных критериев, оказывающих влияние на итоговый результат.

В отечественной науке важно отметить масштабную деятельность сотрудников НИЛ возобновляемых источников энергии МГУ, в том числе созданный ГИС ВИЭ России [6]. Однако работ по именно географической оценке потенциала некоторых дальневосточных территорий РФ к возобновляемой энергетике наблюдается не так много [5], а в контексте водородной энергетики не наблюдается вовсе. Более того, к примеру, Приморский край не затронут даже в рамках Атласа Российских проектов по производству низкоуглеродного и безуглеродного водорода и аммиака [1].

Учитывая тот факт, что для производства “зеленого” водорода требуется использование ВИЭ, при оценке потенциала территории к размещению соответствующих мощностей в первую очередь необходимо оценивать именно потенциал (использования) одного возобновляемого источника энергии либо комбинации нескольких. Такое понятие “потенциал” оставляет достаточно широкое поле для его трактовки. В представленном исследовании под потенциалом подразумевается коэффициент, при расчете которого используются значения физико-географических (плотность энергии ветра, уклон поверхности и пр.) и экономико-географических (расстояние от точки пространства до объектов инфраструктуры) параметров территории.

В данном исследовании было принято решение сфокусировать внимание на исследовании ветроэнергетического потенциала некоторых территорий Дальневосточного федерального округа (ДФО) в том числе и в парадигме развития водородной энергетики. В качестве опытных полигонов использованы территории пяти субъектов РФ в пределах ДФО: Амурской области, Еврейской АО, Приморского края, Сахалинской области и Хабаровского края.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе расчета потенциала лежит метода анализа иерархий (МАИ), впервые введенный в научный оборот Т. Саати [9]. Суть методологии заключается в расчете веса критериев (и при необходимости субкритериев) для определения, насколько тот или иной фактор оказывает влияние на решение поставленной задачи. Для получения весов составляется общая попарная матрица сравнения критериев на основе нескольких попарных матриц, составленных экспертами в исследуемой области. В основе составления матриц стоит шкала относительной важности, разработанная Т. Саати (табл. 1) [9].

Для получения матрицы сравнения необходимо усреднить значения матриц, полученных от экспертов, для чего чаще применяется среднее геометрическое, позволяющее сохранить правило согласованности матрицы.

Таблица 1. Шкала сравнения по Саати. Сост. авт. по [9]**Table 1.** Saaty's scale of pairwise comparisons. Comp. by author on [9]

Описание	Стандартные значения	Инверсивные значения
Одинаковая значимость	1	1
Умеренное превосходство	3	1/3
Сильное превосходство	5	1/5
Очень сильное превосходство	7	1/7
Абсолютное превосходство	9	1/9
Промежуточные значения	2, 4, 6, 8	1/2, 1/4, 1/6, 1/8

После расчета весов критериев производится тест на согласованность матрицы. Необходимость в подобных расчетах обусловлена возможной излишней дифференциацией в мнении экспертов, которая может привести к неверным результатам. Для понимания, насколько оценки экспертов согласуются между собой, рассчитывается отношение согласованности матрицы (CR — consistency ratio).

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (1)$$

где CI — индекс согласованности, R — основанное на экспериментальных данных среднее значение индекса однородности случайным образом составленной матрицы парных сравнений (табл. 2).

Индекс согласованности (CI) рассчитывается следующим образом:

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}, \quad (2)$$

где λ_{max} — наибольшее собственное значение матрицы, n — размерность матрицы.

Допустимым значением CI является 0.1 или меньше. В противном случае требуется пересмотр составленных экспертами попарных матриц.

После этапа расчета весов критериев возникает вопрос унификации значений самих критериев. Необходимость подобных вычислений обусловлена разницей в единицах измерения, что в свою очередь усложняет процесс их использования для получения единого значения. Для унификации значений критериев было принято решение использовать инструментарий нечеткой логики, нередко применяющийся в комплексе с методом анализа иерархий в ряде исследований на схожую тематику.

При унификации значений при помощи аппарата нечеткой логики необходимо вычислить степень принадлежности значения к множеству. Данная степень выражается в действительных числах от 0 (отсутствие принадлежности) до 1 (полная при-

Таблица 2. Среднее значение индекса однородности случайным образом составленной матрицы парных сравнений в зависимости от размерности матрицы. Сост. авт.**Table 2.** The average value of the random consistency index, depending on the dimension of the matrix. Comp. by author

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

надлежность). Для расчета степени принадлежности используется одна из функций, используемых в теории нечетких множеств. Использование отдельных функций для разных критериев обусловлено пространственной дифференциацией последних и, как следствие, тем, что влияние некоторых критериев на итоговый результат изменяется в пространстве нелинейно.

В рамках данного исследования было применено 6 различных функций для унификации критериев (рис. 1.).

После вычисления унифицированных значений критериев последствием использования метода взвешенной линейной комбинации для получения раstra с потенциалом необходимо объединить данные значения и рассчитанные ранее веса критериев:

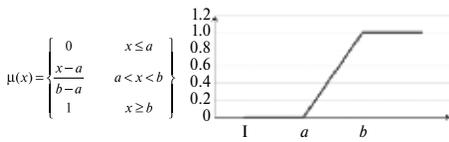
$$A_i^{WLC-score} = \sum_{i=1}^n x_i w_i, \tag{3}$$

где $A_i^{WLC-score}$ — значение потенциала, x_i — унифицированное значение критерия, w_i — вес критерия.

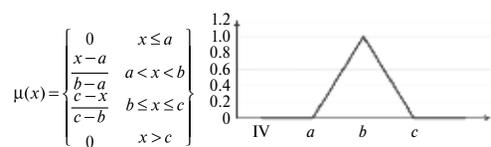
Для вычисления ветроэнергетического потенциала исследуемых субъектов ДФО были выбраны критерии, оказывающие наибольшее влияние на размещение соответствующих производств, а также регулярно встречающиеся в научной литературе на подобную тематику (табл. 3). Функции и параметры унификации подбирались согласно пространственной дифференциации того или иного критерия.

К1 — плотность ветровой энергии (WPD). Данный показатель зачастую используется при оценке ветроэнергетического потенциала территории вместо скорости

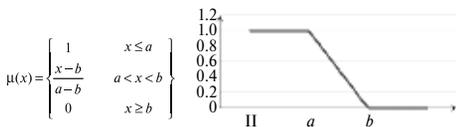
I. Линейная возрастающая функция 1-го типа



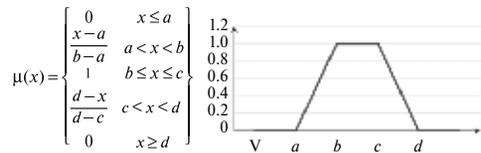
IV. Треугольная функция



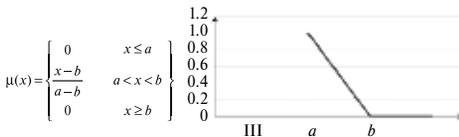
II. Линейная убывающая функция 1-го типа



V. Трапециевидная функция



III. Линейная убывающая функция 2-го типа



VI. Сигмоидальная возрастающая функция

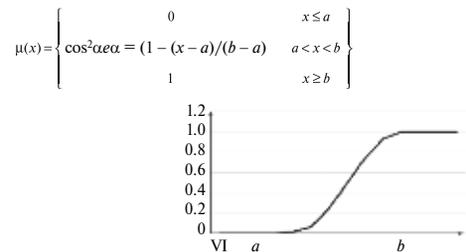


Рис. 1. Функции для унификации критериев с применением нечеткой логики при оценке потенциала территории к размещению ВЭС.

Fig. 1. The functions for unifying criteria using fuzzy logic in assessing the potential of a territory for wind power plant placement.

ветра, так как его применение позволяет учитывать сразу и скорость ветра, и плотность воздуха. Рассчитывается по следующей формуле:

$$WDP = \frac{1}{2} \rho \times V^3, \quad (4)$$

где ρ — плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$), V — средняя скорость ветра ($\text{м}/\text{с}$).

Для унификации данного критерия была выбрана именно сигмоидальная функция, в связи с тем, что на практике соотношение скорости ветра / плотности энергии ветра и выработке мощности соответствует скорее вышеупомянутой функции, а не линейной, как в ряде исследований [12]. Показатели параметров основаны на данных для ветроэнергетической установки Vestas V150-4.2 MW. В случае с кривой мощности данного ветрогенератора точке а, при которой начинается выработка электроэнергии, соответствует значение скорости ветра 3 м/с, что при плотности воздуха в $1.257 \text{ кг}/\text{м}^3$ (плотность на 100 метрах над уровнем моря при температуре воздуха, равной 0°C) соответствует значению плотности энергии ветра, равной $17 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Точка, после которой не происходит увеличения выработки электроэнергии, соответствует значению 12 м/с, что при таких же условиях равняется плотности энергии воздуха $1086 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Стоит отметить, что в данном случае показатель температуры, может оказывать влияние на плотность воздуха (около 15–20% при диаметрально противоположных значениях температуры от -30 до $+30^\circ\text{C}$), однако с учетом того, что в исследовании применены среднегодовые значения, было принято решение отталкиваться от принятой в большинстве подобных исследований плотности в $1.257 \text{ кг}/\text{м}^3$. Подобный подход обусловлен тем фактом, что хоть небольшая разница, вносимая температурой, и присутствует, фактически она будет нивелирована за счет разницы летних и зимних температур (среднегодовая температура на территории исследования колеблется от 0 до $+5^\circ\text{C}$).

К2 — уклон поверхности. Большие значения уклона поверхности оказывают негативное влияние на стоимость постройки и обслуживание ветроэлектростанций, как следствие — растет и нормированная стоимость производства электроэнергии. В подавляющем большинстве исследований на схожую тематику критичное значение уклона поверхности находится в промежутке от 10° до 25° [19]. В данном исследовании в качестве подобного “барьера” было принято значение 20° .

К3 — расстояние до аэропортов и взлетно-посадочных полос. Необходимость учитывать данный критерий возникает в первую очередь из-за негативного воздействия ВЭС на авиацию, в связи с влиянием работы электростанции данного типа на турбулентность. С другой стороны, близость взлетно-посадочной полосы положительно влияет на логистику самого предприятия. В связи с этим было принято решение использовать для унификации линейную убывающую функцию 2 типа, при этом буферная зона от вышеупомянутых объектов, в рамках которой размещение ВЭС нежелательно, соответствует 10 000 метров. Данное значение основано как на современных исследованиях по оценке потенциала, так и на практических примерах размещения ВЭС.

К4 — расстояние до крупных населенных пунктов, К5 — расстояние до автомобильных дорог, К6 — расстояние до ЛЭП, К7 — расстояние до железных дорог. Данная группа критериев, являясь сугубо экономико-географической, в первую очередь важна с позиции логистики и инфраструктурного обеспечения. В случае с крите-

риями № 4, 5 и 7 важно учитывать нормативы по шумовому загрязнению, а именно рекомендованные для комфортного сна показатели шума, равные 30 дБ. Для расчета расстояния от ВЭС, при котором уровень шума снижается до необходимых значений, использовалась следующая формула:

$$\begin{aligned} L_p &= L_w - 10 \lg(2\pi R^2) - \alpha R \\ R^2 &= H^2 + X^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где L_p — звуковое давление (дБ), L_w — звуковое давление турбины (дБ), R — расстояние до точки измерения (м), H — высота башни (м), X — расстояние до основания башни (м), α — поглощение звука в атмосфере (дБ/м).

При проведении расчетов были использованы данные по ветрогенератору Vestas V150-4.2 MW, высота башни была взята за 100 метров. В результате расстояние, на котором уровень шума достигал 30 дБ, равняется 1200 метрам, что и отражено в параметрах унификации. Параметр b в случае с расстоянием до крупных населенных пунктов равняется 3300 метрам, что соответствует расстоянию, при котором уровень шума достигает 10 дБ. При унификации значений критериев для учета всех вышеупомянутых факторов была использована треугольная функция. В случае с K_6 — расстояние до ЛЭП, использована трапецевидная функция, что связано с меньшей дифференциацией стоимости строительства ЛЭП в зависимости от километража, чем в случае с автомобильными и железными дорогами.

Учитывались и законодательные требования строительства производств на расстоянии минимум 500 метров от дорог любого назначения.

Важно отметить, что в данном исследовании в качестве крупных населенных пунктов были выделены поселения с численностью населения более 5000 человек.

K8 — расстояние до ООПТ (особо охраняемых природных территорий). Данный критерий особенно важен с позиции геоэкологии. В случае с ВЭС существует большой спектр угроз для фауны любого региона, где подобные установки функционируют [4].

При унификации абсолютных значений данного критерия была применена линейная возрастающая функция. Были применены следующие параметры для унификации: точке a присвоено значение 1000 метров, соответствующее минимальному значению буферной зоны согласно действующему документу, регламентирующему порядок установления и изменения охранных зон вокруг ООПТ. Точке b присвоено значение 25 000 метров, что соответствует значениям наибольшей границы буферной зоны, указанной в вышеупомянутом положении.

K9 — расстояние до крупных водных объектов. Данный критерий используется в первую очередь из-за частичной ориентации данного исследования на потенциальное использование электроэнергии, полученной с помощью ВЭС в рамках производства “зеленого” водорода. Вода (в первую очередь пресная) является сырьем при электролизе для соответствующего производства. По оценкам, для производства 1 килограмма водорода требуется около 9 литров чистой воды, хотя фактическое потребление зачастую выше [22]. В качестве крупных водных объектов были отобраны крупнейшие реки и озера региона (Амур, Зея, Буря, Уссури, Зейское водохранилище, оз. Болонь, оз. Ханка, оз. Орель и пр.).

При внедрении в подобные исследования данного критерия необходимо учитывать и экологические нормы, в частности ширину водоохранной зоны (200 м), установленную статьей 65 “Водного кодекса РФ” [2].

Таблица 3. Критерии, функции и параметры унификации при расчете итоговых значения потенциала ветровой энергетики

Table 3. Criteria, functions, and parameters for the unification of wind energy potential calculations and the determination of final values

Критерий	Функция унификации	параметры функции			
		a	b	c	d
К1 — плотность ветровой энергии (Вт/м ²)	Сигмоидальная (VI)	17	1086		
К2 — уклон поверхности (°)	Линейная убывающая (II)	2	20		
К3 — расстояние до аэропортов и взлетно-посадочных полос (м)	Линейная убывающая 2 типа (III)	10 000	30 000		
К4 — расстояние до крупных населенных пунктов (м)	Треугольная (IV)	1200	3300	50 000	
К5 — расстояние до автомобильных дорог (м)	Треугольная (IV)	500	1200	30 000	
К6 — расстояние до ЛЭП (м)	Трапецевидная (V)	500	1000	15 000	60 000
К7 — расстояние до железных дорог (м)	Треугольная (IV)	500	1200	25 000	
К8 — расстояние до ООПТ (м)	Линейная возрастающая (I)	1000	25 000		
К9 — расстояние до крупных водных объектов (м)	Трапецевидная (V)	200	1000	20 000	25 000

Дополнительно к итоговой оценке потенциала была введена температурная поправка в связи с ограничением деятельности ветрогенератора при низких температурах. Так как в исследовании было принято решение отталкиваться от показателей ветроэнергетической станции Vestas, то и вышеупомянутая поправка рассчитывалась относительно диапазона рабочих температур последней.

Данные о среднемесячной температуре воздуха были получены на портале Гидрометцентра России [3], суммарно были использованы показатели 100 метеостанций, расположенных на территории исследования. Полученные показатели были интерполированы, и в результате были получены массивы данных о средней температуре на каждый месяц (на высоте 2 метра над поверхностью). Важно отметить, что в связи с тем, что высота башни ветрогенератора составляет около 100 метров, была введена дополнительная корректировка температуры воздуха.

Учитывая температурный диапазон установки (от -30 до $+45^{\circ}\text{C}$ — рабочий диапазон, от -20 до $+30^{\circ}\text{C}$ — диапазон без потерь мощности), было принято решение использовать для унификации данного показателя трапецевидную функцию с соответствующими параметрами. На основе полученных данных был рассчитан специальный температурный коэффициент для введения вышеупомянутой поправки:

$$coef_i = \frac{f_{i1} + f_{i2} + \dots + f_{i12}}{12}, \quad (6)$$

где f_m — значение функции от среднемесячной температуры (n — порядковый номер месяца).

Стоит отметить, что данные даже с достаточно большого количества метеостанций не могут претендовать на абсолютную точность, учитывая площадь и сложный

рельеф территории исследования. Однако, учитывая большой температурный диапазон ВЭС, а также тот факт, что температура воздуха фигурирует только в рамках поправки, а не критерия, небольшие неточности не сыграют существенной роли в формировании итоговых результатов.

В результате умножения значений коэффициента для каждой точки пространства на полученный ранее потенциал территории для соответствующих точек было получено значение ветроэнергетического потенциала территории согласно использованной методике.

Для исключения непригодных в рамках исследуемой хозяйственной деятельности территорий из общего массива по потенциалу применялась булева логика, где точкам в пространстве были присвоены значения 0 — размещение предприятия запрещено и 1 — размещение предприятия разрешено. Для получения итогового массива данных необходимо произвести умножение полученного растра потенциала на растр с критериями ограничения.

В качестве подобных территорий были выбраны следующие: населенные пункты (буфер — 1200 м), аэропорты и взлетно-посадочные полосы (буфер — 1000 м), ООПТ (буфер — 1000 м), водные объекты (буфер — 200 м), крупнейшие реки региона: Амур, Зeya, Буряя и Усури (буфер 20 000 м). Последний критерий введен в связи с риском затопления территорий. Параметр в 20 000 метров введен согласно учебно-пособию А. А. Соколова [11].

Данные, необходимые для анализа экономико-географических критериев, были получены автором с помощью портала NextGIS и впоследствии переработаны [24]. Данные по средней скорости ветра (пространственное разрешение 250 метров на пиксель) были получены на портале Global Wind Atlas [19]. Набор представленных на портале материалов основан на расчетах, включающих в себя использование данных ERA5 (за период с 2008 по 2017 г.) с последующей их обработкой с учетом особенностей рельефа поверхности. Более подробное описание методики представлено на портале Global Wind Atlas в разделе “Методы” [21].

Также в текущем исследовании используется модель рельефа SRTM (30 метров на пиксель) как для введения в анализ критерия уклона поверхности, так и для расчета плотности энергии ветра. Данные с подобным разрешением представлены для территорий южнее 60° с.ш., следовательно, территории севернее не были учтены в расчетах.

Также в рамках статистического анализа данных для административно-территориальных единиц (АТЕ), входящих в состав исследуемых субъектов, были рассчитаны следующие статистические показатели относительно потенциала: среднее арифметическое и 90-й процентиль. Последний показатель имеет экзистенциальное значение при оценке потенциала; так, в рамках подобных исследований наибольший интерес вызывают наиболее энергоэффективные территории, соответственно использование 90-го percentиля позволяет вычленить 10% территорий с наилучшими показателями.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для составления матриц попарного сравнения были использованы данные, содержащиеся в работах [16, 17, 28, 30]. Дополнительная матрица была сформирована автором исследования для внесения большей доли региональных особенностей.

Итоговая матрица, а также веса критериев представлены в табл. 4. Показатель отношения согласованности (CR) составил 0.99, что позволяет говорить о согласованности самой матрицы.

Среди критериев наибольшую значимость получил критерий плотности энергии ветра (0.393), а наименьшую (0.022) — расстояние до аэропортов и взлетно-посадочных полос (рис. 2).

Таблица 4. Парная матрица и веса критериев для анализа потенциала территории к развитию ветроэнергетики (через призму водородной энергетики)

Table 4. A pairwise matrix and criteria weights for analyzing the potential of a given territory for wind energy development (considering hydrogen energy)

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	Вес	%
K1	1	4.897	9	6.406	6.587	3.663	6.587	9	7	0.393	39.3
K2	0.204	1	3	1.518	1.923	0.562	1.924	1	1	0.083	8.3
K3	0.111	0.333	1	0.167	0.167	0.25	0.167	1	0.143	0.022	2.2
K4	0.156	0.659	6	1	1.037	0.398	1.037	6	1	0.082	8.2
K5	0.152	0.52	6	0.965	1	0.281	1	5	0.5	0.071	7.1
K6	0.273	1.78	4	2.51	3.559	1	3.559	7	1	0.149	14.9
K7	0.152	0.52	6	0.965	1	0.281	1	5	0.5	0.071	7.1
K8	0.111	1	2	0.167	0.2	0.143	0.2	1	0.333	0.029	2.9
K9	0.143	1	7	1	2	1	2	3	1	0.099	9.9

По итогам расчетов был сформирован массив данных по потенциалу территории к размещению ВЭС, в том числе с учетом возможности производства “зеленого” водорода. Среднее арифметическое значение рассчитанного потенциала для всей выборки составило около 0.25 (рис. 3).

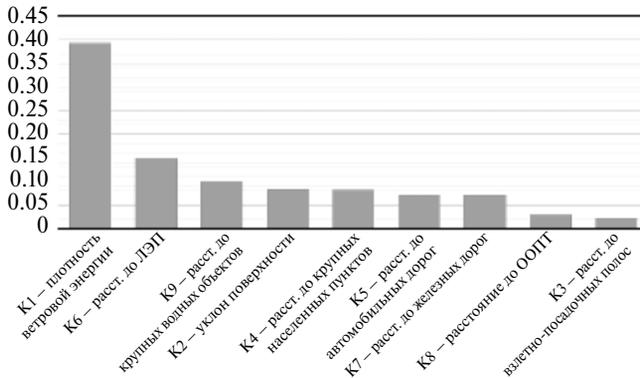


Рис. 2. Веса критериев при оценке потенциала территории к размещению ВЭС.

Fig. 2. The weights of criteria in assessing the territory potential for the wind farms placement.

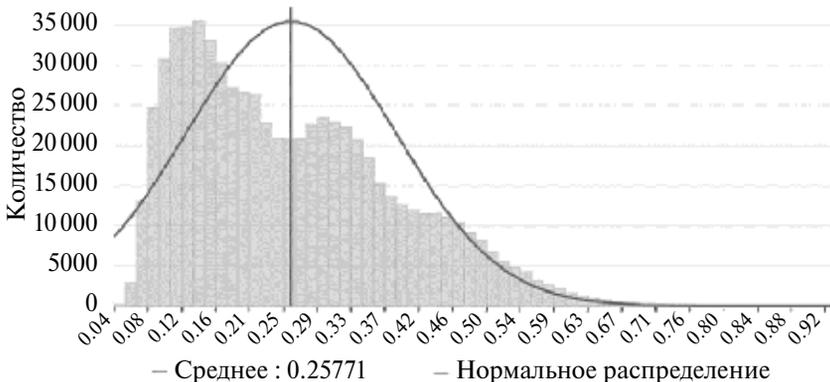


Рис. 3. Распределение потенциала ветроэнергетики в исследуемом регионе. По оси ординат отмечено количество пикселей итогового раstra.

Fig. 3. The distribution of wind energy potential within the studied area. The y-axis represents the number of pixels in the final raster image.

На рис. 4 представлены значения плотности энергии ветра (WPD), а в свою очередь распределение показателя потенциала в пространственном выражении представлено на рис. 5.

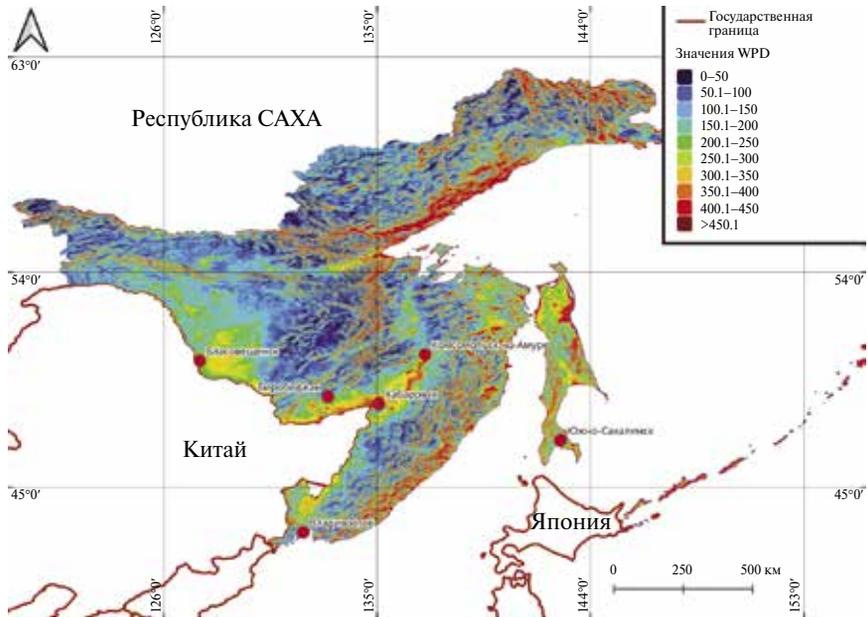


Рис. 4. Значения WPD на территории исследования для высот.

Fig. 4. The WPD values in the study area for heights.

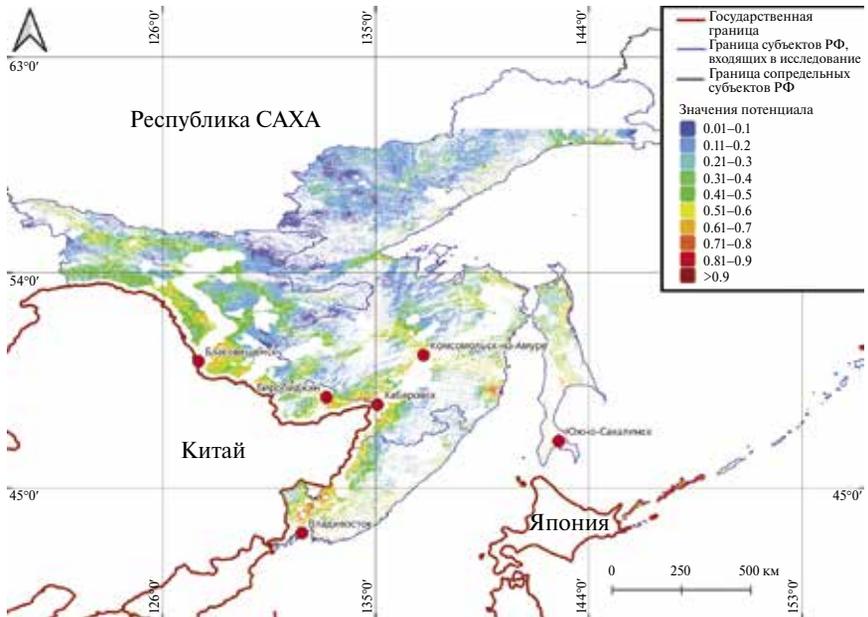


Рис. 5. Потенциал территории к размещению ВЭС с возможностью производства “зеленого” водорода.

Fig. 5. The potential of the area for the wind farms construction (considering future hydrogen energy production).

ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам оценки ветроэнергетического потенциала в первую очередь выделяются территории, расположенные вдоль границы с Китаем. Можно отметить и некоторые р-ны Хабаровского края недалеко от города Советская Гавань. Отдельно располагаются и небольшие по площади участки, обладающие высоким потенциалом, в частности некоторые территории на Курильских о-вах (к примеру, Итуруп и Симушир), на материковом побережье Сахалинского залива и на юге Приморского края.

По результатам статистического анализа полученного массива данных можно выделить следующие территории:

- по среднему потенциалу АТЕ наиболее ярко выделяются Владивостокский и Южно-Курильский городские округа (ГО). Также стоит отметить Надеждинский и Спасский районы, Хорольский муниципальный округ (все — Приморский край). В Амурской области можно выделить Белогорский муниципальный округ (МО);

- по значениям 90-го перцентиля (10% наиболее эффективных территорий) также выделяются Владивостокский и Южно-Курильский ГО, Хорольский МО. Более того, в случае с последним важно отметить и большую площадь территорий с высоким ветроэнергетическим потенциалом (106 км² обладают значениями больше 0.65).

Суммируя все вышесказанное, можно выделить три основные группы территорий, обладающих высоким потенциалом, а именно юг Приморского края; некоторые территории в южной и центральной областях острова Сахалин; некоторые острова Курильского архипелага. Отдельно выделяются некоторые АТЕ на юге Амурской области, а также Советско-Гаванский район Хабаровского края.

Именно комплексность предложенной оценки территории описанными выше методами позволяет более объективно вычлнить территории, обладающие потенциалом. К примеру, высокие показатели Приморского края во многом обусловлены соответствующим уровнем развития инфраструктуры региона, однако там имеются и относительно неплохие показатели как скорости ветра, так и плотности энергии. В случае с другими выделенными территориями, к примеру о. Сахалин, основополагающую роль сыграли физико-географические показатели, однако и определенное инфраструктурное обеспечение также внесло свою лепту в итоговый результат.

В качестве примера, где использование подобных методов исследования позволило отсеять из массива территории, имеющие только высокий физико-географический потенциал при практически полном отсутствии необходимого инфраструктурного обеспечения, можно выделить западное побережье Охотского моря. В данном регионе наблюдаются наивысшие в сравнении со всей территорией исследования показатели плотности энергии ветра, однако экономико-географические факторы практически не представлены, а реализация даже очень внушительных исходных физико-географических данных при подобных условиях не является экономически целесообразной.

Однако, безусловно, учитывая высокий вес критерия “плотность ветровой энергии”, он сыграл значительную роль в итоговом массиве данных. Несмотря на то что практически на всем протяжении Транссибирской магистрали инфраструктурные критерии оказывают практически одинаковое влияние на результат, более высокие скорости ветра на восток от Благовещенска и на запад от Хабаровска увеличивают на данных территориях показатели потенциала, что, к примеру, объясняет высокие показатели Белогорского МО. Другим примером является то, что на юге Приморско-

го края наибольшим потенциалом отличаются территории, протянувшиеся от озера Ханка до г. Владивосток. Данный участок отличается более высокими показателями плотности ветровой энергии, чем земли, находящиеся западнее и восточнее.

Важно понимать, что в случае с ветроэнергетикой размещение предприятий на большом удалении от необходимой инфраструктуры, и в особенности от потребителя, экономически неэффективно. Транспортировка полученной на ВЭС электроэнергии на длительные расстояния ведет к крупным потерям, поэтому в данном случае дистанция между станцией и потребителем априори должна стремиться к минимальной. Когда речь идет о транспортировке полученной энергии при помощи энергоносителя, которым, к примеру, может быть “зеленый” водород, то свою роль играет существующая на данный момент дороговизна его перевозки, в отличие от традиционных энергоносителей, таких как нефть, газ или уголь.

Более того, если рассматривать существующие сейчас способы транспортировки водорода, то самым выгодным (на средние и дальние расстояния) является морской способ доставки. Учитывая полученные в ходе исследования данные, можно выдвинуть предположение, что в рамках указанной парадигмы, помимо имеющегося высокого ветроэнергетического потенциала, территории юга Приморского края, а также Сахалинской области (включая некоторые острова Курильской гряды) могут быть использованы как перспективные площадки для производства “зеленого” водорода в том числе и по причине удачного расположения относительно морских транспортных путей, что в свою очередь потребует развития соответствующей портовой инфраструктуры.

Стоит отметить, что в исследовании не проведен анализ конкретной выработки электроэнергии и следующий за ним экономический анализ. Причина кроется в том, что данная тема обширна и заслуживает отдельного исследования, которое планируется произвести и опубликовать. В рамках данного вопроса необходимо не только рассмотрение скорости ветра и плотности энергии ветра, но и турбин с различными характеристиками, расчета нормированной стоимости производства электроэнергии (LCOE). В случае с последующим производством “зеленого” водорода необходим анализ различных систем для электролиза и экономический анализ, в том числе учитывающий экспорт. Все это является перспективной темой для будущих исследований в данной сфере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных данных можно говорить о том, что в исследуемых субъектах ДВФО РФ находятся территории, обладающие высоким ветроэнергетическим потенциалом. Стоит также отметить, что многие из отмеченных ранее административно-территориальных единиц, обладающих высокими показателями, обладают и определенными преимуществами в рамках возможного экспорта, что особенно актуально для “зеленого” водорода. Подобный экспорт, особенно в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, является одним из важных пунктов планирования структуры российского энергетического сектора в будущем, на что указывают и некоторые положения “Концепции по развитию водородной энергетики РФ”, утвержденной Правительством РФ [8].

Также не стоит забывать о том, что способность сохранять необходимую долю на мировом рынке энергоресурсов входит в парадигму энергетической безопасности, которая в свою очередь является одной из основ благосостояния страны. Территории ДВФО РФ, благодаря в том числе и своему приморскому положению, могут

внести весомый вклад в развитие данной сферы, безусловно, при необходимых инвестициях в исследуемые сектора энергетики.

В случае с электроэнергией, произведенной на ВЭС, важно отметить и другое положение энергетической безопасности, а именно обеспечение собственного населения достаточным количеством электроэнергии. Учитывая перманентную заинтересованность страны в развитии дальневосточных территорий, введение в строй современных методов добычи энергии может способствовать дальнейшему более активному развитию региона. Совместно с экспортной составляющей данный регион может стать одним из флагманов российской возобновляемой энергетики уже к середине XXI века.

Важно заметить, что полученные значения потенциала не отражают конкретных значений по возможной выработке электроэнергии, однако они являют собой опору для принятия первичных решений и выделения территорий, где имеет наибольший смысл проводить более конкретные изыскания. Для расчета точных значений потенциальной выработки необходимо учитывать как минимум суточные, а желательно и почасовые значения скорости ветра, а также производить моделирование возможных скоростей, к примеру, с использованием распределения Вейбулла. Это позволит учесть как сезонные особенности, так и суточное распределение скорости ветра. Кроме того, перспективным направлением для исследования является анализ с применением характеристик различных типов ветрогенераторов для каждой конкретной локации. Проведение подобных изысканий позволит более точно определить ветроэнергетический потенциал территорий, что должно способствовать более точному выстраиванию энергетической стратегии страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Российских проектов по производству низкоуглеродного и безуглеродного водорода и аммиака. // minpromtorg.gov.ru [сайт] / Министерство промышленности и торговли РФ. URL: https://minpromtorg.gov.ru/docs/#!atlas_rossiyskih_proektov_po_proizvodstvu_nizkouglerodnogo_i_bezuglerodnogo_vodoroda_i_ammiaa
2. *Водный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 74-ФЗ* от 03.06.2006
3. Гидрометцентр России. URL: <https://meteoinfo.ru> (дата обращения 20.12.2023).
4. *Говорушко С. М.* Воздействие ветровых электростанций на окружающую среду // *Альтернативная энергетика и экология*. 2011. № 4. С. 38–42.
5. *Демидионов М. Ю.* Пространственное моделирование потенциала развития альтернативной энергетики на примере острова Сахалин // *Тихоокеанская география*. 2023. № 4 (16). С. 82–92. https://doi.org/10.35735/26870509_2023_16_8. EDN: PDZYFQ
6. *Киселева С. В., Лисицкая, Н. В., Попель О. С., Рафикова Ю. Ю., Тарасенко А. Б., Фрид С. Е., Шакуна В. П.* Геоинформационные системы для возобновляемой энергетики (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2023. № 11. С. 115–127. <https://doi.org/10.56304/S0040363623110073>. EDN SNIADQ
7. *Киселева С. В., Шестакова А. А., Торопов П. А., Мысленков С. А.* Оценка ветроэнергетического потенциала черноморского побережья Кавказа с использованием реанализа CFSR // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ)*. 2016. № 15–18. С. 75–85. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.15-18.075-085>
8. Распоряжение Правительства РФ: Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации от 05.08.2021 № 136-ФЗ // government.ru [сайт] / Правительство России. 09.08.2021. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (дата обращения 01.03.2023).

9. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1989. 316 с.
10. Скопинцева Е. РФ нацелилась занять пятую часть мирового рынка водородной энергетики // eg-online.ru. [сайт] / Экономика и жизнь. 15.12.2023. URL: <https://www.eg-online.ru/article/477628/> (дата обращения: 01.03.2024).
11. Соколов А. А. Гидрография СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1952. 287 с.
12. Солиман Х., Бурлов В. Г., Украинцева Д. А. Использование нечеткой логики в среде ГИС для выбора местоположения ветряных электростанций на примере провинции Хомс, Сирия // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 11(125). С. 1–13.
13. Ahadi P., Fakhrabadi F., Pourshaghaghay F., Kowsary F. Optimal site selection for a solar power plant in Iran via the Analytic Hierarchy Process (AHP) // Renewable Energy // Renewable Energy. 2023. Vol. 215. № 118944. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118944>
14. Albraheem L., AlAwlaqi L. Geospatial analysis of wind energy plant in Saudi Arabia using a GIS-AHP technique // Energy Reports. 2023. Vol. 9. P. 5878–5898. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.032>
15. Amsharuk A., Łaska G. The Approach to Finding Locations for Wind Farms Using GIS and MCDA: Case Study Based on Podlaskie Voivodeship, Poland // Energies. 2023. Vol. 16 (20). № 7107. <https://doi.org/10.3390/en16207107>
16. Ayodele T. R., Ogunjuyigbe A. S. O., Odigie O., Munda J. L. A multi-criteria GIS-based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria // Applied Energy. 2018. Vol. 228. P. 1853–1869. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.051>
17. Barzehkar M., Parnell K. E., Dinan N. M., Brodie G. Decision support tools for wind and solar farm site selection in Isfahan Province, Iran // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 23. P. 1179–1195. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01978-w>
18. Benti N. E., Alemu Y., Balta M., Gunta S., Diro M., Semie A., Mekonnen Y., Yohannes H. Site suitability assessment for the development of wind power plant in Wolaita area, Southern Ethiopia: an AHP-GIS model // Scientific Reports. 2023. Vol. 13(1). P. 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47149-x>
19. Cunden T. S. M., Doorga J., Lollchund M. R., Rughooputh S. D. D. V. Multi-level constraints wind farms siting for a complex terrain in a tropical region using MCDM approach coupled with GIS // Energy. 2020. Vol. 211. № 118533. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118533>
20. Global Wind Atlas. URL: <https://globalwindatlas.info/ru/> (дата обращения: 25.10.2023)
21. Global Wind Atlas. Method. URL: <https://globalwindatlas.info/en/about/method> (дата обращения: 09.12.2024)
22. Kumar P., Date A., Mahmood N., Das R. K., Shabani B. Freshwater supply for hydrogen production: An underestimated challenge // International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 78. 2024. P. 202–217. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.257>
23. Kutty S. S., Khan M. G. M., Ahmed M. R. Analysis of wind characteristics and wind energy resource assessment for Tonga using eleven methods of estimating Weibull parameters // Heliyon. 10(9), 2024, e30047. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30047>
24. NextGIS. URL: <https://data.nextgis.com/ru/> (дата обращения: 30.10.2023)
25. Niang S. A. A., Gueye A., Drame M. S., Ba A., Sarr A. et al. Analysis of wind resources in Senegal using 100-meter wind data from ERA5 reanalysis // Scientific African. Vol. 26, 2024, e02480, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02480>

26. *Noorollahi Y. A., Senani A. G., Fadaei A., Simaee M.* A framework for GIS-based site selection and technical potential evaluation of PV solar farm using Fuzzy-Boolean logic and AHP multi-criteria decision-making approach // *Renewable Energy*. 2022. Vol.186. P. 89–104.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.124>
27. *Raza M. A., Yousif M., Hassan M., Numan M.* Geospatial analysis of wind energy plant in Saudi Arabia using a GIS-AHP technique // *Renewable Energy*. 2023. Vol. 206. P. 180–190.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.010>
28. *Rekik S., El Alimi S.* Optimal wind-solar site selection using a GIS-AHP based approach: A case of Tunisia // *Energy Conversion and Management: X*. 2023. Vol. 18. № 100355.
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100355>
29. *Sánchez-Lozano J. M., Ramos-Escudero A., Gil-García I. C., García-Cascales M. C., Molina-García A.* A GIS-based offshore wind site selection model using fuzzy multi-criteria decision-making with application to the case of the Gulf of Maine // *Expert Systems with Applications*. 2022. Vol. 210. № 118371.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118371>
30. *Saprong D., Baffoe P. E.* Selecting Suitable Sites for Wind Energy Development in Ghana // *Ghana Mining Journal*. 2015. Vol. 16. № 1. P. 1–8.
<https://doi.org/10.4314/gm.v16i1.2>
31. *Zhao X.* Трудности в реализации новой энергетической стратегии России и перспективы китайско-российского энергетического сотрудничества // *Chinese Journal of Slavic Studies*. 2023. Vol. 3(2). P. 263–285.
<https://doi.org/10.1515/cjss-2023-0010>

Spatial Modeling in Assessing The Wind Energy Potential of the Russian Federation Far Eastern Federal District Southern Subjects

M. Ju. Demidionov*

**Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg, Russia*

E-mail: demidionovforwork@gmail.com

Abstract — The article is devoted to the assessment of wind energy potential for 5 subjects within the Far Eastern Federal District of the Russian Federation: Amur Region, Jewish Autonomous Region, Khabarovsk Region, Primorsky Region, Sakhalin Region. The potential assessment was carried out with a focus on the possible production of “green” hydrogen using electricity generated from wind farms. When calculating the desired potential, the method of hierarchy analysis, coupled with fuzzy and Boolean logic, was used. To carry out the calculations, a list of physico-geographical, economic-geographical and restrictive criteria necessary for a comprehensive assessment of the potential was formed. Based on the assessments of experts in this field, a pairwise matrix of criteria comparison was formed. Based on it, the weights of the criteria themselves were obtained. Subsequently, the wind energy potential was calculated for each point within the boundaries of the studied subjects using the weighted linear combination method. During the calculations, the previously obtained weights of the criteria and their relative values, calculated using fuzzy logic tools, were used. Additionally, considering low winter temperatures, a corresponding amendment was introduced. Based on the data obtained, a statistical assessment was made for the study area, and appropriate recommendations were developed.

Keywords: wind stations, analytical hierarchy process, renewable energy, Far East, GIS

REFERENCES

1. Atlas Rossijskich proektov po proizvodstvu nizekouglerodnogo i bezuglerodnogo vodoroda i ammiaka. // minpromtorg.gov.ru [website] / Ministerstvo promyshlennosti i trgovli RF. URL: https://minpromtorg.gov.ru/docs/#!atlas_rossijskich_proektov_po_proizvodstvu_nizekouglerodnogo_i_bezuglerodnogo_vodoroda_i_ammika
2. *Vodnyj kodeks Rossijskoj Federacii: Federal'nyj zakon № 74-FZ ot 03.06.2006*
3. Gidrometcentr Rossii. URL: <https://meteoinfo.ru> (access date 20.12.2023).
4. *Govorushko S. M. Vozdejstvie vetrovyh jelektrostantsij na okruzhajushuju sredu // Al'ternativnaja jenergetika i jekologija. 2011. № 4. S. 38–42.*
5. *Demidionov M. Ju. Prostranstvennoe modelirovanie potentsiala razvitiya al'ternativnoj jenergetiki na primere ostrova Sahalin // Tihookeanskaja geografija. 2023. № 4 (16). S. 82–92. https://doi.org/10.35735/26870509_2023_16_8 EDN: PDZYFQ*
6. *Kiseleva S. V., Lisickaja, N. V., Popel' O. S., Rafikova Ju. Ju., Tarasenko A. B., Frid S. E., Shakuna V. P. Geoinformacionnye sistemy dlja vozobnovljaemoj jenergetiki (obzor) // Teplojenergetika. 2023. № 11. S. 115–127. <https://doi.org/10.56304/S0040363623110073>. EDN SNIADQ*
7. *Kiseleva S. V., Shestakova A. A., Toropov P. A., Myslenkov S. A. Evaluation of wind energy potential of the Black Sea coast using cfsr // Alternative Energy and Ecology (ISJAE). 2016. № 15-18. S. 75–85. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.15-18.075-085>*
8. Rasporjazhenie Pravitel'stva RF: Konceptcija razvitiya vodorodnoj jenergetiki v Rossijskoj Federacii ot 05.08.2021 № 136-FZ // government.ru [website] / Pravitel'stvo Rossii. 09.08.2021. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> (application date 01.03.2023).
9. *Saati T. L. Prinjatje reshenij. Metod analiza ierarhij. M.: Radio i svjaz', 1989. 316 s.*
10. *Skopinceva E. RF nacelilas' zanjat' pjatuju chast' mirovogo rynka vodorodnoj jenergetiki // eg-online.ru. [website] / Jekonomika i zhizn'. 15.12.2023. URL: <https://www.eg-online.ru/article/477628/> (application date: 01.03.2024).*
11. *Sokolov A. A. Gidrografija SSSR. L.: Gidrometeoizdat, 1952. 287 s.*
12. *Soliman H., Burlov V. G., Ukrainceva D.A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki v srede GIS dlja vybora mestopolozhenija vetrjanyh jelektrostantsij na primere provincii Homs, Sirija // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2022. № 11(125). S. 1–13.*
13. *Ahadi P., Fakhrbadi F., Pourshaghaghay F., Kowsary F. Optimal site selection for a solar power plant in Iran via the Analytic Hierarchy Process (AHP) // Renewable Energy // Renewable Energy. 2023. Vol. 215. № 118944. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118944>*
14. *Albraheem L., AlAwlaqi L. Geospatial analysis of wind energy plant in Saudi Arabia using a GIS-AHP technique // Energy Reports. 2023. Vol. 9. P. 5878–5898. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.032>*
15. *Amsharuk A., Łaska G. The Approach to Finding Locations for Wind Farms Using GIS and MCDA: Case Study Based on Podlaskie Voivodeship, Poland // Energies. 2023. Vol. 16 (20). № 7107. <https://doi.org/10.3390/en16207107>*
16. *Ayodele T. R., Ogunjuyigbe A. S. O., Odigie O., Munda J. L. A multi-criteria GIS-based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria // Applied Energy. 2018. Vol. 228. P. 1853–1869. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.051>*

17. *Barzehkar M., Parnell K. E., Dinan N. M., Brodie G.* Decision support tools for wind and solar farm site selection in Isfahan Province, Iran // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 23. P. 1179–1195.
<https://doi.org/10.1007/s10098-020-01978-w>
18. *Benti N. E., Alemu Y., Balta M., Gunta S., Diro M., Semie A., Mekonnen Y., Yohannes H.* Site suitability assessment for the development of wind power plant in Wolaita area, Southern Ethiopia: an AHP-GIS model // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13(1). P. 1–13.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-47149-x>
19. *Cunden T. S. M., Doorga J., Lollchund M. R., Rughooputh S. D. D. V.* Multi-level constraints wind farms siting for a complex terrain in a tropical region using MCDM approach coupled with GIS // *Energy*. 2020. Vol. 211. № 118533.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118533>
20. Global Wind Atlas. URL: <https://globalwindatlas.info/ru> (application date: 25.10.2023)
21. Global Wind Atlas. Method. URL: <https://globalwindatlas.info/en/about/method> (application date: 09.12.2024)
22. *Kumar P., Date A., Mahmood N., Das R. K., Shabani B.* Freshwater supply for hydrogen production: An underestimated challenge // *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 78. 2024. P. 202–217.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.257>
23. *Kutty S. S., Khan M. G. M., Ahmed M. R.* Analysis of wind characteristics and wind energy resource assessment for Tonga using eleven methods of estimating Weibull parameters // *Heliyon*. 10(9), 2024, e30047.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30047>
24. NextGIS. URL: <https://data.nextgis.com/ru/> (application date: 30.10.2023)
25. *Niang, S. A. A., Gueye, A., Drame, M. S., Ba, A., Sarr, A., et al.* Analysis of wind resources in Senegal using 100-meter wind data from ERA5 reanalysis // *Scientific African*. Vol. 26, 2024, e02480.
<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02480>
26. *Noorollahi Y. A., Senani A. G., Fadaei A., Simaee M.* A framework for GIS-based site selection and technical potential evaluation of PV solar farm using Fuzzy-Boolean logic and AHP multi-criteria decision-making approach // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 186. P. 89–104.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.124>
27. *Raza M. A., Yousif M., Hassan M., Numan M.* Geospatial analysis of wind energy plant in Saudi Arabia using a GIS-AHP technique // *Renewable Energy*. 2023. Vol. 206. P. 180–190.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.010>
28. *Rekik S., El Alimi S.* Optimal wind-solar site selection using a GIS-AHP based approach: A case of Tunisia // *Energy Conversion and Management: X*. 2023. Vol. 18. № 100355.
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100355>
29. *Sánchez-Lozano J. M., Ramos-Escudero A., Gil-García I. C., García-Cascales M. C., Molina-García A.* A GIS-based offshore wind site selection model using fuzzy multi-criteria decision-making with application to the case of the Gulf of Maine // *Expert Systems with Applications*. 2022. Vol. 210. № 118371.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118371>
30. *Saprong D., Baffoe P. E.* Selecting Suitable Sites for Wind Energy Development in Ghana // *Ghana Mining Journal*. 2015. Vol. 16. № 1. P. 1–8.
<https://doi.org/10.4314/gm.v16i1.2>
31. *Zhao X.* Difficulties in Implementing Russia's New Energy Strategy and Prospects for Sino-Russian Energy Cooperation // *Chinese Journal of Slavic Studies*. 2023. Vol. 3(2). P. 263–285.
<https://doi.org/10.1515/cjss-2023-0010>

УДК: 911.2

СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СВОБОДНО РАСПРОСТРАНЯЕМЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА И ИХ ПРИМЕНИМОСТИ ДЛЯ ЭРОЗИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2025 г. К. А. Мальцев^{a, *}, С. Н. Талипова^{b, **}, И. И. Магзянов^{c, ***}, А. А. Сомов^{d, ****},

Т. С. Мальцева^{e, *****}

a, b, c, d, e Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

**E-mail: mlcvkirill@mail.ru*

***E-mail: ssaffiaaa@gmail.com*

****E-mail: ildanmag@bk.ru*

*****E-mail: rooneyandre901@gmail.com*

******E-mail: elka-tata_77@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.06.2024 г.

После доработки 22.01.2025 г.

Принята к публикации 10.03.2025 г.

С 2019 г. в сети интернет в открытом доступе появилось несколько новых ЦМР глобального охвата: global 30 m digital elevation model from Copernicus (Copernicus GLO-30), National aeronautics and space administration digital elevation model (NASADEM), forest and buildings removed Copernicus DEM (FABDEM). Эти ЦМР можно было бы использовать для получения морфометрических показателей и оценки модельных эрозионных потерь почвы, в том числе в пределах Европейской территории России (ЕТР), где сосредоточены основные пахотные земли РФ. К настоящему времени выполнен ряд работ по оценке высотной точности этих моделей. Однако, помимо абсолютных ошибок высоты, необходимо оценивать точность и достоверность воспроизведения морфометрических показателей, рассчитываемых на основе этих моделей. В статье представлены результаты анализа ошибок таких морфометрических показателей, как крутизна склонов, длина склонов, а также эрозионный потенциал рельефа трех новых глобальных цифровых моделей рельефа на примере трех участков, расположенных в Воронежской, Саратовской и Оренбургской областях. Анализ ошибок был выполнен путем сравнения с данными, рассчитанными на основе ЦМР, построенных по топографическим картам крупного масштаба. Установлено, что наименьшие ошибки расчетной крутизны склона демонстрирует модель FABDEM. В расчете длин склонов ни одна из новых моделей не показывает результат, превосходящий по качеству то, что можно получить с использованием более старых ЦМР (SRTM и др.). Для эрозионного потенциала рельефа наименьшие ошибки получаются при использовании модели FABDEM. Полученные результаты справедливы как для всей территории каждого участка вообще, так и для пахотных угодий в частности. Минимальные значения ошибок эрозионного потенциала рельефа при использовании модели FABDEM приводят к минимизации ошибок при расчете эрозионных потерь почвы.

Ключевые слова: NASADEM, Copernicus GLO-30, FABDEM, Европейская территория России, эрозионный потенциал рельефа

DOI: 10.31857/S0869607125010067, EDN: LICYUM

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые модели рельефа (ЦМР) часто используются во многих научных и прикладных задачах в сфере наук о Земле. В частности, ЦМР разной детальности используются в землеустройстве, геоморфологии, гидрологии, инженерной геологии, природопользовании, при проектировании зданий и сооружений. Среди многообразия сфер применения особенно важна возможность пространственной оценки и картографирования водной эрозии почвы в разных масштабах с использованием ЦМР, поскольку почва является трудно возобновимым ресурсом человечества и является основой продовольственной независимости РФ. Большинство пахотных угодий РФ располагаются на Европейской территории России (ЕТР), а основным фактором их деградации является водная эрозия почв [5]. Почвенную эрозию можно количественно оценивать с помощью полевых методов или методов моделирования. Моделирование позволяет картографировать эрозию на больших территориях и прогнозировать потери почвы при изменении вида использования земель. Существует множество моделей для прогнозирования потерь почвы, хороший обзор которых дан в работах [15, 11].

Среди всех этих моделей наиболее часто используемыми являются: USLE [42], WaTEM/SEDEM [41] и RUSLE [37]. Во всех этих моделях одним из важных параметров является фактор длины и крутизны склона (LS-фактор), определяющий эрозионный потенциал рельефа [32].

Получить ЦМР для расчета потенциальных потерь почвы можно несколькими способами, например с помощью данных дистанционного зондирования, полевых геодезических съемок, топографических карт и т.д. [1]. На основе перечисленных методов, в частности фотограмметрии и радиолокации, к настоящему времени было создано несколько глобальных ЦМР, данные которых также можно использовать. Особенно актуальными становятся данные глобальных ЦМР при исследовании больших территорий (сотни квадратных километров и более), поскольку это очень доступный источник информации.

В то же время, поскольку глобальные ЦМР были созданы с использованием данных дистанционного зондирования Земли, они содержат ошибки, величину которых необходимо оценивать.

В настоящее время наиболее детальные глобальные ЦМР, распространяемые свободно, имеют разрешение 1 угловая секунда, что в зависимости от территории составляет 25–30 м. До 2019 г. в открытом доступе существовали лишь 3 глобальные ЦМР с таким разрешением: группа моделей SRTM (C-SIR, X-SAR) [21]; ASTERDEM v.2 [13]; AW3D30 [12]. Анализ ошибок высот этих моделей, а также получаемых по ним моделей крутизны склонов и длин линий тока был представлен в ряде работ как в пределах России [8, 1, 10, 7], так и по всему миру [35, 28].

Однако в последнее время появилось еще несколько свободно распространяемых моделей рельефа глобального охвата, имеющие пространственную детальность 1 угловая секунда (25–30 м): Copernicus GLO-30; FABDEM [23]; NASADEM [16]. Краткую характеристику этих моделей можно видеть в табл. 1.

По данным самих разработчиков модели Copernicus GLO-30 (рис. 26), 90% абсолютных вертикальных ошибок высот по всей Земли не превышают 2.17 м. В пределах территории РФ этот показатель выше и находится в диапазоне 2–5 м. Использование ЦМР Copernicus GLO-30 для создания FABDEM (рис. 2в), по мнению авторов модели, ставит этот набор данных выше других глобальных ЦМР. Согласно данным создателей модели, ошибки высот в пределах всех видов земного покрова

Таблица 1. Краткая характеристика глобальных ЦМР (Copernicus GLO-30, FABDEM, NASADEM), используемых в работе**Table 1.** Brief description of global DEMs (Copernicus GLO-30, FABDEM, NASADEM) used in the work

Название	Источник данных	Покрытие	Координаты/ высоты
Copernicus GLO-30	Данные WorldDEM, TanDEM-X	От 84° с.ш. до 90° ю.ш	WGS 84 / EGM 2008
FABDEM	Copernicus GLO-30	От 80° с.ш. до 60° ю.ш.	WGS 84 / EGM 2008
NASADEM	Данные SRTM(C-SIR), ICESat/GLAS	От 60° с.ш. до 56° ю.ш.	WGS 84 / EGM 96

(леса, антропогенные территории, пашни и т.д.) меньше, чем в модели Copernicus GLO-30 [23]. Так, по данным авторов модели, в FABDEM произошло сокращение ошибок высот по сравнению с моделью Copernicus GLO-30. При этом 90% абсолютных вертикальных ошибок высот в пределах застроенных территорий лежат в диапазоне до 2.39 м (FABDEM), а в модели Copernicus GLO-30 данный показатель был 3.54 м. Аналогично данный показатель сократился в пределах территорий, покрытых лесом [23]. Модель NASADEM (рис. 2а) по сравнению с SRTM представляет собой улучшенную модель [16]. Например, она сокращает средние абсолютные ошибки высот в пределах Северной Америки с 3.46 до 2.8 м.

Анализ ошибок глобальных ЦМР, рассмотренных нами, был проведен не только авторами глобальных моделей, но и независимыми исследователями [22]. Однако в мировой литературе пока мало оценок ошибок морфометрических показателей и эрозионного потенциала рельефа “новых” глобальных ЦМР, а рассматриваются в основном ошибки высот.

Так, исследования ошибок высот, проведенные в Боснии и Герцеговине [26], показывают, что модель FABDEM содержит меньше ошибок высот по сравнению с другими анализируемыми глобальными ЦМР. Также исследования по моделированию затопления городских пойм, выполненные в пределах Индии, показывают, что из всех свободно распространяемых глобальных ЦМР именно FABDEM позволяет получить наименьшие ошибки [33]. В исследовании, которое было выполнено в пределах одного из прибрежных районов Бразилии [20], оценивались глобальные ЦМР AW3D30, ASTER, SRTM, и TanDEM-X, однако модель FABDEM не рассматривалась.

Также есть несколько статей, посвященных анализу точности модели NASADEM. Например, был выполнен сравнительный анализ точности положения структурных линий рельефа при использовании моделей MERIT, ASTER GDEM2, SRTM, NASADEM в пределах Вьетнама [40]. Установлено, что модель NASADEM позволяет позиционировать их точнее.

Аналогичные исследования, выполненные в Мексике [17] и направленные на оценку ошибок шести глобальных ЦМР (ALOS AW3D30 v2-v3, ASTER GDEM v2, v3, SRTM, NASADEM), показали, что наименьшие ошибки высот были свойственны либо модели AW3D30, либо модели NASADEM. Модель FABDEM также в данном исследовании не рассматривалась.

Анализ точности морфометрических показателей, выполненный в пределах горных территорий Южной Америки [18] на основе глобальных ЦМР (SRTM v.3.0, AW3D30, ASTER GDEM v3, Copernicus, TanDEM-X(12 м) показывает, что наиболее

точными моделями являются Copernicus GLO-30 и TanDEM-X. Здесь необходимо уточнить, что модель TanDEM-X имеет шаг сетки 12 м и распространяется на платной основе.

Кроме этого, есть исследование вертикальной точности глобальных свободно распространяемых ЦМР, выполненное в пределах 65 тестовых участков по всему миру [31]. Результаты данного исследования показывают, что модель FABDEM содержит наименьшее количество ошибок, а наименьшие ошибки расположены в пределах пахотных территорий.

В пределах России также есть опыт применения современных моделей глобальных ЦМР. Например, группой авторов из Красноярского края была использована глобальная ЦМР FABDEM [4] для аграрного мониторинга. В пределах Северного Кавказа [9] была выполнена оценка возможности использования моделей FABDEM и Copernicus GLO-30 для построения гидрографической сети. Однако в них не было выполнено сравнительной количественной оценки ошибок крутизны склонов, длин склонов, эрозионного потенциала рельефа.

Целью нашей работы является оценка ошибок крутизны склонов, длин склонов, а также эрозионного потенциала рельефа (LS-фактора), получаемых с использованием глобальных ЦМР, появившихся в открытом доступе с 2019 г. (Copernicus GLO-30 DEM, NASADEM, FABDEM) в пределах трех тестовых участков на Европейской территории России, расположенных в пределах пахотных территорий отдельно и всей территории каждого участка, а также сравнение полученных ошибок с аналогичными ошибками в ЦМР, существовавшими ранее (SRTM, ASTERDEM v.2, AW3D30).

ИССЛЕДУЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ И МЕТОДИКА

Исследование было выполнено в пределах трех тестовых участков, расположенных в Воронежской (участок № 1), Саратовской (участок № 2) и Оренбургской областях (участок № 3), представленных на рис. 1.

Участок № 1 имеет площадь 324 км². Рельеф местности является равнинным, с высотами от 122 до 222 м, 2,6% участка покрыты лесом, а оставшаяся территория в основном покрыта пахотными землями и луговой растительностью. Территория характеризуется густой сетью сложноразветвленных речных долин, оврагов и балок, которые расчленяют водораздельные поверхности. Быстрое таяние снега весной и летние ливни способствуют интенсивному размыву почв. Высокий уровень обработки сельскохозяйственных угодий активизирует процессы плоскостного и линейного смыва, приводя к деградации почвенного покрова и формированию оврагов. Площадь пахотных угодий участка составляет 200 км². На данном участке протекают реки Ведуга, Серебрянка, Ольшанка и Гнилуша.

Участок № 2 имеет площадь 322 км² и располагается в Саратовской области. Участок находится в пределах гетерогенной возвышенности и покрыт лесом на 14%, а оставшаяся территория в основном покрыта пахотными землями и луговой растительностью. Перепад высот составляет от 170 до 305 м. Площадь пашни составляет 166 км². На территории протекают реки Большой Колышлей и Малый Колышлей.

Участок № 3 располагается в Тоцком районе Оренбургской области и имеет площадь 329 км². Участок находится в пределах гетерогенной возвышенности, которая почти лишена лесного покрова. Перепад высот составляет от 110 до 245 м. Площадь пашни составляет 230 км². По территории протекают такие реки, как Большая и Малая Погромка.

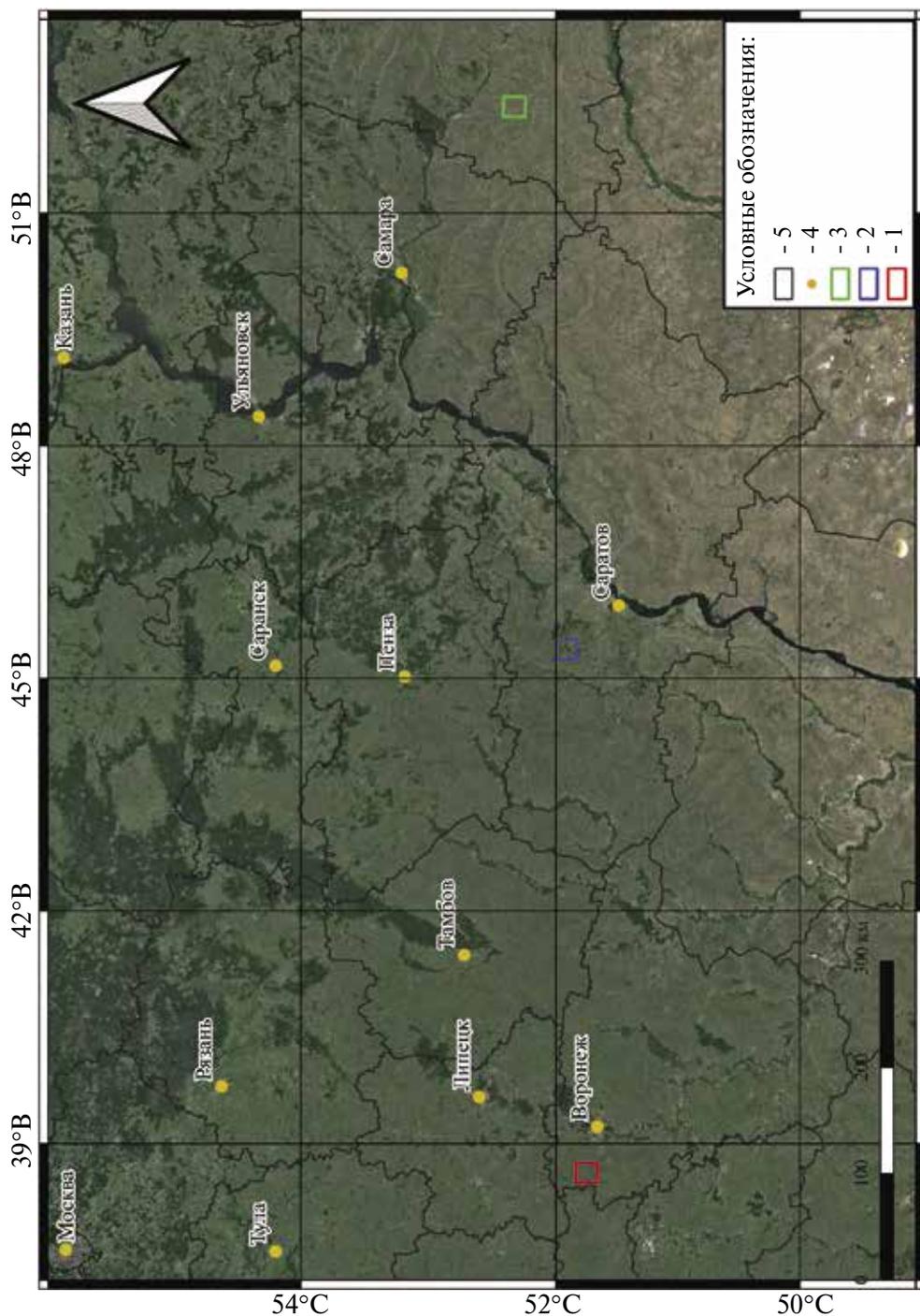


Рис. 1. Территория исследования (1 — участок в Воронежской области; 2 — участок в Саратовской области; 3 — участок в Оренбургской области; 4 — города; 5 — границы субъектов РФ).

Fig. 1. Study area (1 — site in the Voronezh Region; 2 — site in the Saratov Region; 3 — site in the Orenburg Region; 4 — cities; 5 — borders of the constituent entities of the Russian Federation).

В качестве исходных данных использовались глобальные ЦМР: Copernicus GLO-30 DEM, NASADEM, FABDEM, ASTER GDEM v.2, SRTM C-SIR, AW3D30, которые были сравнены с эталонной ЦМР. Кроме этого, для оцифровки границ пахотных угодий использовались снимки Landsat 8 OLI (Collection 2 Level 2 Science Products Tier1), которые были скачаны с сайта геологической службы США [34]. Дешифрирование было проведено вручную с использованием стандартных дешифровочных признаков, описанных, например, в статье [2].

Основываясь на данных топографических карт, при помощи алгоритма М. Хатчинсона [24, 25], реализованного в программном комплексе ArcGIS, были построены эталонные модели для трех тестовых участков (рис. 2г). Для моделирования нами были использованы: горизонтали, отметки высот. Размер ячейки для эталонных моделей был выбран 5×5 м, исходя из погрешности планового положения объектов (0.5 мм) на топографических картах масштаба 1 : 10 000 [2]. Тематическая информация о рельефе с топографических карт данного масштаба может выступать в качестве проверочной или эталонной информации по отношению к заявленным глобальным ЦМР, поскольку имеет намного меньшую вертикальную погрешность. В соответствии с исследованием [30], проверочные данные, представляющие рельеф земной поверхности, должны иметь точность как минимум в три раза больше, чем у оцениваемого источника данных. Топографические карты, используемые нами в качестве эталонов, имеют сечение горизонталей 1 м и погрешность высотного положения $1/3$ сечения [2], поэтому можно утверждать, что погрешность эталонных данных составляет около 0.33 м, что почти на порядок меньше погрешностей глобальных ЦМР. В качестве системы координат для всех эталонных моделей была выбрана проекция Гаусса — Крюгера с использованием датума Пулково-1942 г. (Воронежская область — зона 7, EPSG — 28407; Саратовская область — зона 8, EPSG — 28408; Оренбургская область — зона 9, EPSG — 28409). Глобальные ЦМР были также представлены с использованием соответствующих систем координат. Приведение к целевой проекции было выполнено в QGIS.

Для оценки ошибок длин линий тока и эрозионного потенциала рельефа мы провели гидрологическую коррекцию всех рассматриваемых ЦМР.

В используемых нами глобальных общедоступных ЦМР присутствует много артефактных локальных западин в силу того, что построены они с использованием данных дистанционного зондирования. Артефактные западины сокращают длину склонов и суммарную водосборную площадь в каждой точке, рассчитанную с их использованием. Это в свою очередь снижает значение эрозионного потенциала рельефа. В настоящее время нет автоматических методик, позволяющих надежно отличить реальные и артефактные локальные западины только на основе данных ЦМР. Поэтому принято удалять все западины, а потом восстанавливать там, где они реально существуют, при наличии такой информации [6]. На сегодняшний день существует несколько алгоритмов удаления локальных западин моделей рельефа, которые можно разделить на три большие группы. Во-первых, это алгоритмы заполнения локальных понижений [36, 14]; во-вторых, это алгоритмы, разрушения границ замкнутых понижений [29, 38]; в-третьих, алгоритмы комбинирующие два первых подхода [27]. Использование этих алгоритмов в итоге приводит к разным результатам при построении длин линий тока. В статье для всех исходных данных был применен один из алгоритмов первой группы, реализованный в программном комплексе ArcGIS. Коррекция была выполнена с использованием инструмента Fill модуля Spatial Analyst программного комплекса ArcGIS [39].

В пределах тестового участка, расположенного в пределах Воронежской области, подготовка всех ЦМР для последующего расчета длин линий тока была дополнительно выполнена с использованием инструмента Breach Depressions в программном пакете WhiteBox.

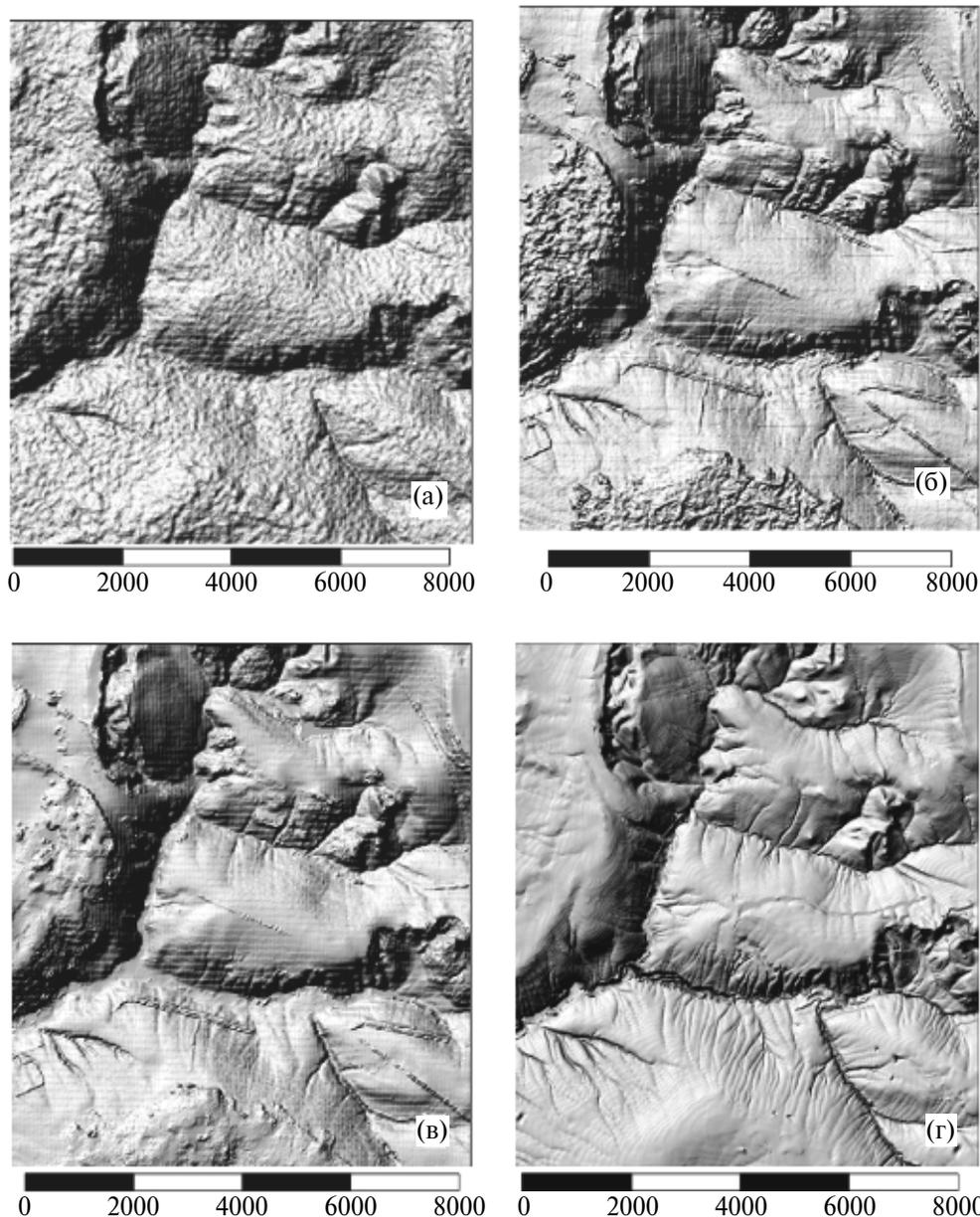


Рис. 2. Рельеф части участка в Саратовской области, представленный с использованием разных глобальных ЦМР (а — NASADEM; б — Copernicus GLO-30; в — FABDEM; г — эталонная ЦМР).

Fig. 2. The relief of site 2 in the Saratov Region is presented using different DEMs (a — NASADEM; b — Copernicus GLO-30; c — FABDEM; d — detailed DEM).

Расчет крутизны склона был произведен в программе Surfer. Для расчета крутизны склона была использована формула (1):

$$S = \frac{180}{\pi} \arctan \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2}, \quad (1)$$

где $\partial z/\partial x$ и $\partial z/\partial y$ — частные производные вдоль координатных осей, а S — крутизна склона в градусах.

Расчет длин склонов был произведен в программе ArcGIS с использованием инструмента Flow Length. Сначала была создана модель направлений потока, а затем на ее основе вычислили длины линий тока, которые можно использовать как оценку длин склонов. Дополнительно в пределах участка в Воронежской области длина линий тока была оценена с использованием программного пакета WhiteBox, в котором использовался метод Maximum upslope flowpath length.

Величина эрозионного потенциала рельефа была оценена с использованием формулы, предложенной [19] и реализованной в программном обеспечении SAGA, с использованием инструмента Hydrology — LS-factor. Эрозионные потери почвы в пределах участка, расположенного в Оренбургской области, были рассчитаны на основе методики RUSLE [37].

Оценка погрешности крутизны склона, эрозионного потенциала рельефа, а также эрозионных потерь почвы осуществлялась на основе вычисления разности показателей между проверочными моделями и глобальными по формуле (2):

$$\Delta A = A_{\text{пров}} - A_{\text{цмр}}, \quad (2)$$

где ΔA — разность крутизны склона, эрозионного потенциала рельефа или эрозионных потерь почвы, $A_{\text{пров}}$ — крутизна склона, эрозионный потенциал рельефа или эрозионные потери почвы на проверочной модели рельефа, $A_{\text{цмр}}$ — крутизна склона, эрозионный потенциал рельефа или эрозионные потери почвы, полученные с использованием глобальных ЦМР.

Далее был произведен статистический анализ полученных значений ошибок. Были рассчитаны два статистических показателя: стандартное отклонение (Std-Dev) — формула 3; средняя абсолютная ошибка (MAE) — формула 4.

$$\text{StdDev} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta A_i - ME)^2}{n}}, \quad (3)$$

$$\text{MAE} = \frac{|\Delta A|}{n}, \quad (4)$$

где n — объем выборки.

Для анализа погрешностей длин линий тока разности не рассчитывались. Вместо этого были рассчитаны средние значения длины склонов по каждой модели рельефа. Эти показатели эталонной модели и глобальных моделей сравнивались между собой. Для формирования выборок всех морфометрических показателей был использован шаг сетки 25 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Статистические показатели ошибок крутизны склона разных глобальных ЦМР в пределах всех трех тестовых участков представлены в табл. 2, 3.

Статистические показатели длин склонов разных ЦМР в пределах всех трех тестовых участков представлены в табл. 4 и 5.

Для того чтобы в итоге нашего исследования понять, какая из существующих глобальных ЦМР дает наименьшие ошибки при расчете эрозионного потенциала рельефа (LS-фактора), был выполнен расчет этих ошибок и их статистический анализ. Результаты расчета приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 2. Статистические показатели выборки ошибок крутизны склонов (град.) для различных участков

Table 2. Statistical indicators of the sampling errors of slopes (degrees) for various sections

Статистический показатель	AW3D30	ASTER	SRTM	FABDEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область						
StdDev	3.54	5.71	2.86	2.09	2.59	2.81
MAE	2.35	5.71	1.82	1.20	1.44	1.78
Участок 2 — Саратовская область						
StdDev	3.75	4.36	3.87	3.05	3.40	3.17
MAE	2.34	4.73	1.74	1.19	1.55	1.53
Участок 3 — Оренбургская область						
StdDev	2.44	6.66	1.93	1.35	1.57	1.60
MAE	1.63	7.58	1.31	0.826	1.16	1.17

Таблица 3. Статистические показатели выборки ошибок крутизны склонов (град.) для различных участков на территории пашен

Table 3. Statistical indicators of sampling errors in slopes (degrees) for various areas on the territory of arable lands

Статистический показатель	AW3D30	ASTER	SRTM	FABDEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область						
StdDev	2.88	5.22	1.69	0.712	0.743	1.55
MAE	1.95	6.15	1.33	0.628	0.681	1.28
Участок 2 — Саратовская область						
StdDev	2.11	3.92	1.47	0.771	0.83	1.23
MAE	1.36	4.64	1.09	0.533	0.578	1.00
Участок 3 — Оренбургская область						
StdDev	2.11	6.56	1.41	0.821	0.898	1.24
MAE	1.45	7.91	1.06	0.529	0.603	0.984

Таблица 4. Среднее значение выборки длин склонов (м) для различных участков на всех типах землепользования**Table 4.** Average slope lengths (m) for various sites across all land use types

Средняя длина	Эталон- ная ЦМР	AW3D30	ASTER	SRTM	FAB DEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область							
Средняя длина*	90	231	219	228	269	262	223
Средняя длина	130	210	197	216	258	241	210
Участок 2 — Саратовская область							
Средняя длина	130	224	212	233	283	261	227
Участок 3 — Оренбургская область							
Средняя длина	136	213	195	220	271	246	215

* С использованием инструментов BreachDepressions и Maximum upslope flowpath length в программном пакете WhiteBox.

Таблица 5. Статистические показатели выборки длин склонов (м) для различных участков на территории пашен**Table 5.** Statistical indicators of the sample of slope lengths (m) for various areas in the arable land

Статистический показатель	Эталон- ная ЦМР	AW3D30	ASTER	SRTM	FAB DEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область							
Средняя длина	105	118	113	120	134	106	114
Участок 2 — Саратовская область							
Средняя длина	126	140	135	149	194	165	144
Участок 3 — Оренбургская область							
Средняя длина	110	139	129	145	192	166	143

Таблица 6. Статистические показатели ошибок эрозионного потенциала рельефа для различных участков на всех типах землепользования**Table 6.** Statistical indicators for errors LS-factor for various areas on all types of land use

Статистический показатель	AW3D30	ASTER	SRTM	FAB DEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область						
StdDev	0.737	1.36	0.621	0.637	0.610	0.603
MAE	0.471	1.11	0.374	0.311	0.326	0.369
Участок 2 — Саратовская область						
StdDev	0.829	1.12	0.671	0.648	1.15	0.672
MAE	0.453	0.87	0.333	0.282	0.359	0.336
Участок 3 — Оренбургская область						
StdDev	0.546	1.61	0.404	0.361	0.366	0.412
MAE	0.328	1.40	0.259	0.193	0.203	0.264

Таблица 7. Статистические показатели ошибок эрозионного потенциала рельефа для различных участков на территории пашен**Table 7.** Statistical indicators of errors LS-factor for various areas on the territory of arable lands

Статистический показатель	AW3D30	ASTER	SRTM	FABDEM	COP. GLO-30	NASA DEM
Участок 1 — Воронежская область						
StdDev	0.496	1.19	0.297	0.210	0.210	0.359
MAE	0.232	0.794	0.167	0.091	0.096	0.248
Участок 2 — Саратовская область						
StdDev	0.563	0.402	0.535	0.384	0.392	0.280
MAE	0.294	0.352	0.259	0.147	0.148	0.203
Участок 3 — Оренбургская область						
StdDev	0.393	1.503	0.267	0.200	0.212	0.241
MAE	0.198	1.084	0.153	0.094	0.104	0.144

Для того чтобы оценить ошибки, возникающие при расчете эрозионных потерь почвы, был выполнен расчет ошибок эрозионных потерь почвы в пределах всего участка, расположенного в пределах Оренбургской области, с использованием разных глобальных ЦМР, а также эталонной модели. Результаты представлены в табл. 8.

Таблица 8. Статистические показатели ошибок расчета почвенной эрозия в пределах всего участка расположенного в Оренбургской области (т/га в год)**Table 8.** Statistical indicators of errors in calculating soil erosion within the entire area in the Orenburg region (t/ha per year)

Статистический показатель	AW3D30	ASTER	SRTM	FABDEM	COP. GLO-30	NASA DEM
MAE	0.57	2.75	0.42	0.28	0.29	0.42

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа табл. 2 и 3 было установлено, что наименьшие ошибки крутизны склонов присущи ЦМР FABDEM. Данное заключение можно сделать, опираясь как на среднюю абсолютную ошибку, так и на стандартное отклонение. Проведенный анализ показывает, что данное утверждение справедливо как для всех видов земного покрова данных участков, так и в пределах пахотных угодий отдельно. Кроме этого необходимо отметить тот факт, что ошибка крутизны склонов заметно сокращается во всех глобальных ЦМР, если рассматривать ошибки только в пределах пахотных угодий. Так, например, средняя абсолютная ошибка крутизны склонов, рассчитанная по модели FABDEM, в пределах пахотных угодий сокращается с 1.2 до 0.63 градуса. Также можно утверждать, что все “новые” ЦМР (FABDEM, Copernicus GLO-30, NASADEM) на рассмотренных участках дают меньшие ошибки крутизны склонов, чем “старые” глобальные ЦМР (AW3D30, ASTER GDEM v.2, SRTM C-SIR). Данное утверждение справедливо как в пределах всех типов земного покрова, так и в пределах пахотных угодий.

Анализируя табл. 4 и 5, можно сказать, что длины склонов, полученные с использованием всех глобальных ЦМР, завышены по сравнению со значениями, полученными с использованием эталонной ЦМР. Это справедливо как для участков в целом, так и для пахотных угодий в частности.

Различия длин значительно сокращаются при рассмотрении только пахотных угодий. Например, в пределах Воронежской области различия средних значений длин между эталонной моделью и глобальными ЦМР колеблются в диапазоне 67–128 м в пределах всего участка, сокращаясь до 1–29 м в пределах пашен. Анализируя длины склонов, получаемые с использованием разных ЦМР, можно сказать, что “новые” (FABDEM, COPERNICUS GLO-30, NASADEM) глобальные ЦМР не позволяют получить значения, более близкие к эталонным, чем значения, рассчитанные по “старым” (ASTER GDEM v.2, AW3D30, SRTM) ЦМР. Так, длины склонов, рассчитанные по модели ASTER GDEM, оказываются наиболее близкими к эталонным, в то время как при расчете по модели FABDEM получаемые значения больше всех других результатов расчетов отличаются от эталонной модели. Это справедливо для всех трех участков в пределах пашен в частности и всей территории участка вообще. Проведенный анализ использования различных методик гидрологической подготовки ЦМР для последующего расчета длин линий тока в пределах Воронежской области показывает, что средние значения длин, полученные с использованием разных методик, различаются. Однако соотношение цифр рассчитываемых длин остается тем же (табл. 4). По-прежнему наиболее близкие к эталонным значениям длины дает модель ASTER, а длины, полученные с использованием FABDEM, сильнее всего отличаются от эталона.

В результате анализа табл. 6 и 7 было установлено, что наименьшая ошибка эрозионного потенциала рельефа в пределах всех тестовых территорий свойственна глобальной модели FABDEM. Это справедливо как для всех типов земного покрова вообще, так и для пахотных угодий в частности. Модель FABDEM позволяет получить значения LS-фактора со средними абсолютными ошибками на 15–25% меньше в сравнении с моделью SRTM при анализе всех типов земного покрова и на 38–45% меньше в сравнении с моделью SRTM при анализе в пределах пахотных угодий. Анализ прочих свободно распространяемых глобальных ЦМР показывает, что, в отличие от крутизны склонов, не всегда новые глобальные ЦМР позволяют получить эрозионный потенциал рельефа с меньшими ошибками. Например, модели NASADEM и COPERNICUS GLO-30 в пределах всего тестового участка в Саратовской области дают чуть бóльшие ошибки, чем модель SRTM (табл. 6). Кроме этого, в пределах пахотных угодий на участке в Воронежской области ошибки ЭПР моделей AW3D30 и SRTM меньше, чем у NASADEM.

Таким образом, можно сказать, что современная свободно распространяемая глобальная ЦМР FABDEM содержит меньше ошибок при оценке угла наклона и эрозионного потенциала рельефа, что подтверждается при проведении исследований ошибок глобальных ЦМР, проведенных по всему миру [31]. В то же время не всегда новые глобальные ЦМР дают меньшие ошибки при оценке ЭПР. Так, например, модель NASADEM на некоторых рассмотренных участках несколько уступает модели SRTM при оценке ошибок эрозионного потенциала рельефа, тогда как в исследованиях, проведенных в Мексике [40] и Вьетнаме [17], было установлено, что модель NASADEM содержит меньше ошибок по сравнению с SRTM при анализе ошибок высот и положения структурных линий рельефа.

Поскольку эрозионный потенциал рельефа (LS-фактор) входит в универсальное уравнение потерь почвы (RUSLE) в качестве одного из факторов мультипликативной модели, то и погрешности при оценке эрозионных потерь почвы, выполненные на основе глобальных ЦМР, меньше при использовании ЦМР FABDEM (табл. 8). Ошибки модели COPERNICUS GLO-30 очень близки к ошибкам модели FABDEM. Нужно отметить также тот факт, что ошибки смыва почв, полученные с использованием моделей SRTM и NASADEM, не отличаются, а наибольшие ошибки получают при использовании модели ASTERGDEM.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был проведен анализ точности морфометрических показателей (крутизны склонов, длин склонов, эрозионного потенциала рельефа), получаемых на основе как “новых” глобальных ЦМР (NASADEM, FABDEM, Copernicus GLO-30), так и “старых” (SRTM C-SIR, ASTERGDEM v.2, AW3D30) в пределах трех тестовых участков, расположенных в Воронежской, Саратовской и Оренбургской областях.

В результате сравнительного анализа было установлено, что наименьшие ошибки крутизны склонов позволяет получить модель FABDEM. Кроме этого, все рассмотренные “новые” ЦМР (NASADEM, FABDEM, Copernicus GLO-30) позволяют получить крутизну склона с меньшими ошибками, чем “старые” ЦМР. Полученные данные справедливы как в пределах всех участков в целом, так и в пределах пахотных угодий в частности. В результате анализа было установлено, что все глобальные ЦМР позволяют получить в пределах территории исследования значения длин склонов, превышающие эталонные значения. Более того, сравнительный анализ данных текущего исследования показывает, что длины склонов, полученные с использованием FABDEM, Copernicus GLO-30, еще сильнее завышают значения длин склонов, чем модели SRTM, AW3D30, ASTER GDEM v.2. Полученные выводы справедливы вне зависимости от метода гидрологической подготовки моделей рельефа. Анализ различий длин склонов показывает, что они в пределах пахотных угодий резко сокращаются.

Анализ ошибок эрозионного потенциала рельефа показывает, что модель FABDEM позволяет получить наименьшие ошибки эрозионного потенциала рельефа (LS-фактор), что приводит к получению наименьших ошибок при расчете эрозионных потерь почвы по сравнению со всеми другими анализируемыми глобальными ЦМР. При использовании FABDEM ошибки сокращаются на 15–25% в пределах всех типов землепользования и на 38–45% в пределах пашен. Не на всех рассмотренных участках использование моделей новых ЦМР NASADEM и Copernicus GLO-30 позволяет получить меньшие ошибки эрозионного потенциала рельефа по сравнению с моделью SRTM.

Глобальная ЦМР Copernicus GLO-30 дает несколько большие, но сопоставимые с FABDEM ошибки при расчете эрозионного потенциала рельефа, а модель NASADEM отличается большими ошибками по сравнению с Copernicus GLO-30 и FABDEM.

Наименьшие ошибки эрозионного потенциала рельефа, получаемые с помощью FABDEM, приводят к минимизации ошибок при расчете эрозионных потерь почвы на основе модели RUSLE.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты

докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан “Научно-технологическое развитие Республики Татарстан”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашаткин И. А., Мальцев К. А., Гайнутдинова Г. Ф., Усманов Б. М., Гафуров А. М., Ганиева А. Ф., Мальцева Т. С., Гиззатуллина Э. Р. Анализ морфометрии рельефа по глобальным ЦМР в пределах южной части Европейской территории России. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки, 2020. Т. 162. вып. 4. С. 612–628. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-628>
2. Иванов М. А., Прищепов А. В., Голосов В. Н., Залалиев Р. Р., Ефимов К. В., Кондратьева А. А., Киняшова А. Д., Ионова Ю. К. Методика картографирования динамики пахотных угодий в бассейнах рек Европейской территории России за период 1985–2015 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 161–171.
3. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. — М.: ЦНИИГАиК, 2002. — 48 с.
4. Кузнецова, А. С., Пушкарев, А. А., Краснощеков, К. В. 2023. Применение FАВДЕМ и других современных цифровых моделей рельефа в системе аграрного мониторинга // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. Вып. 4. С. 139–147. <https://doi.org/10.25729/ESI.2023.32.4.012>
5. Литвин Л. Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. — М.: Академкн., 2002. — 255 с.
6. Мальцев К. А., Ермолаев О. П. Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного построения границ водосборов // Геоморфология. — 2014. — № 1. — С. 45–52.
7. Мальцев К. А., Голосов В. Н., Гафуров А. М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчетах темпов смыва почв на пахотных землях // Ученые записки казанского университета. Серия естественные науки. 2018, Т. 160, вып. 3 С. 514–530.
8. Оньков И. В., Онянова Т. Я., Шиляева О. Ю. Исследование точности радарных ЦМР, построенных по снимкам АЛОS PALSAR и модели SRTM, в зависимости от вида отражающей поверхности // Геоматика. 2012. Вып 4. С. 33–36.
9. Толкачева В. Ф., Гарцман Б. И. Моделирование речной сети на основе цифровой модели рельефа (на примере Черноморского побережья Кавказа) // Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен : сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. Санкт-Петербург: Издательство ВВМ, 2023 С. 604–609.
10. Флоринский И. В. Геоморфометрия сегодня. ИнтерКарто, ИнтерГИС. 2021. Т. 27, вып. 2. С. 394–447.
11. Эрозионно-руслые системы: монография / под науч. ред. Р. С. Чалова, А. Ю. Сидорчука, В. Н. Голосова. М. : ИНФРА-М, 2017. 698 с
12. ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D — 30m (AW3D30)” Japan. [2018]. URL: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30e.htm> (дата обращения 01.06 2020)
13. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 — summary of validation results, [2011]. URL: <https://pubs.usgs.gov/publication/70005960> (дата обращения 01.06 2020)
14. Barnes R. Parallel PriorityFlood depression filling for trillion cell digital elevation models on desktops or clusters // Computers & Geosciences. — 2016. — Vol. 96. — P. 56–68.
15. Borrelli P., Alewell C., Alvarez P. et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // Sci. Total Environ. 2021. N 780. 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>

16. Buckley S. M., Agram P. S., Belz J. E., Crippen R. E., Gurrola E. M., Hensley S., Kobrick M. NASADEM: User Guide. Pasadena, California, 2020. 52 p.
17. Carrera-Hernández J. J. Not all DEMs are equal: An evaluation of six globally available 30 m resolution DEMs with geodetic benchmarks and LiDAR in Mexico // *Remote Sens. Environ.* 2021. N 261. 112474.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112474>
18. del Rosario González-Moradas M., Viveen W., Andrés Vidal-Villalobos R., Carlos Villegas-Lanza J. A performance comparison of SRTM v. 3.0, AW3D30, ASTER GDEM3, Copernicus and TanDEM-X for tectonogeomorphic analysis in the South American Andes // *CATENA*. 2023. № 228. 107160.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107160>
19. Desmet P. J. J., Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1996. № 51. P. 427–433.
20. Emmendorfer I. B., de Almeida L. P. M., Alves D. C. L., Emmendorfer L. R., Arigony-Neto J. Accuracy assessment of global DEMs for the mapping of coastal flooding on a low-lying sandy environment: Cassino Beach, Brazil // *Reg. Stud. Mar. Sci.* 2024. N 74. 103535.
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103535>
21. Farr T. G., Rosen P. A., Caro E. et al. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission // *Rev. Geophys.* 2007. N 45. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
22. Ghannadi A., Alebooye S., Izadi M. Vertical accuracy assessment of copernicus DEM (case study: Tehran and Jam cities) // *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2023. N X-4/W1-202. P. 209–214.
<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-209-2023>
23. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environ. Res. Lett.* 2022. № 2, vol. 17. 024016.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
24. Hutchinson M. A new procedure for gridding elevation and stream of data with automatic removal of spurious pits // *J. Hydrol.* 1989. N 106. P. 211–232.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5)
25. Hutchinson M. F. et al. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure // *Geomorphometry*. — 2011. — T. 2011. — C. 19–22.
26. Krđžalić D., Čatić J., Vrce E., Omićević D. Evaluating the accuracy of the digital elevation models (DEMs) within the territory of Bosnia and Herzegovina // *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 2024. N 34. 101187.
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101187>
27. Lindsay J. B. Efficient hybrid breachingfilling sink removal methods for flow path enforcement in digitalelevation models // *Hydrological Processes*. — 2016a. — Vol. 30, no. 6. — P. 846–857.
28. Lopez-Vazquez C., Ariza-López F. Global Digital Elevation Model Comparison Criteria: An Evident Need to Consider Their Application // *ISPRS Int. J. Geo-Information*. 2023. N 12, 337.
<https://doi.org/10.3390/ijgi12080337>
29. Martz L. W., Garbrecht J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM // *Computers & Geosciences*. — 1999. — Vol. 25, no. 7. — P. 835–844.
30. Maune David F. ed. 2007. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual. 2nd ed. Bethesda, Md: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
31. Meadows M., Jones S., Reinke K. Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-prone environments // *Int. J. Digit. Earth* 2024. N 17. 2308734.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2308734>

32. *Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L. R.* Modeling topographic potential for erosion and depositing using GIS // *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* 1996. N 10. P. 629–641.
<https://doi.org/10.1080/0269379960890210>
33. *Nandam V., Patel P. L.* A framework to assess suitability of global digital elevation models for hydrodynamic modelling in data scarce regions // *J. Hydrol.* 2024. № 630. 130654.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130654>
34. USGS EROS Archive — Products Overview URL: <https://lta.cr.usgs.gov> (дата обращения 01.06.2020)
35. *Pipaud I., Loibl D., Lehmkühl F.* Evaluation of TanDEM-X elevation data for geomorphological mapping and interpretation in high mountain environments — A case study from SE Tibet, China // *Geomorphology.* 2015. N 246. P. 232–254.
36. *Planchon O., Darboux F.* A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // *Catena.* — 2001. — Vol. 46. — P. 159–176.
37. *Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C.* Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: U.S. Government Printing Office, 1997. 384 p.
<https://doi.org/DC0-16-048938-5-65-100>
38. *Soille P.* Morphological carving // *Pattern Recognition Letters.* — 2004. — Vol. 25, no. 5. — P. 543–550.
39. *Tarboton D. G., Bras R. L., Rodriguez-Iturbe I.* On the extraction of channel networks from digital elevation data // *Hydrol. Process.* 1991. N 5. P. 81–100.
<https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>
40. *Tran T. N. D., Nguyen B. Q., Vo N. D., Le M. H., Nguyen, Q. D., Lakshmi V., Bolten J. D.* Quantification of global Digital Elevation Model (DEM) — A case study of the newly released NASADEM for a river basin in Central Vietnam // *J. Hydrol. Reg. Stud.* 2023. N 45. 101282.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101282>
41. *Van Rompaey A. J. J., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J.* Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // *Earth Surf. Process. Landforms.* 2001. N 26. P. 1221–1236.
<https://doi.org/10.1002/esp.275>
42. *Wischmeier W. H., Smith D. D.* Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: U.S. Government Printing Office, 1978. 67 p.

Accuracy Analysis of New Freely Available Digital Terrain Models in the European Territory of Russia

K. A. Maltsev^{1,*}, S. N. Talipova^{2,}, I. I. Magzyanov^{3,***}, A. A. Somov^{4,****},
T. S. Maltseva^{5,*****}**

^{1, 2, 3, 4, 5} *Kazan Federal University, Kazan, Russia*

^{*} *E-mail: mlcvkirill@mail.ru*

^{**} *E-mail: ssaffiaaa@gmail.com*

^{***} *E-mail: ildanmag@bk.ru*

^{****} *E-mail: rooneyandre901@gmail.com*

^{*****} *E-mail: elka-tata_77@mail.ru*

Abstract — Since 2019, several new global-coverage DEMs (Copernicus GLO-30, NASADEM, FABDEM) have become publicly available on the Internet. They could be used to obtain morphometric indicators and assess model soil erosion losses, including within the European Territory of Russia (ETR), where the main arable lands of the Russian Federation are located. To date, a number of studies have been carried

out to assess the altitude accuracy of these models. However, in addition to absolute altitude errors, it is necessary to assess the accuracy of the of morphometric indicators calculated on the basis of these models.

The article presents the results of the analysis of errors of such morphometric indicators as slope steepness, slope length, and relief erosion potential of three new global digital elevation models using the example of three sites located in the Voronezh, Saratov and Orenburg regions. The analysis of errors was performed by comparing with data calculated on the basis of DEMs constructed from large-scale topographic maps.

It was found that the smallest errors in the estimated slope are demonstrated by the FABDEM model. In calculating slope lengths, none of the new models show a result that is superior in quality to what can be obtained using older DTMs (SRTM, etc.). However, for the LS-factor, the smallest errors are obtained when using the FABDEM model. The results obtained are valid both for the entire territory of each site in general and for arable lands in particular. The minimum values of errors in the LS-factor when using the FABDEM model lead to minimization of errors in calculating erosion losses of soil.

Keywords: NASADEM, Copernicus GLO-30, FABDEM, European territory of Russia, LS-factor

REFERENCES

1. *Ashatkin I. A., Maltsev K. A., Gainutdinova G. F., Usmanov B. M., Gafurov A. M., Ganieva A. F., Maltseva T. S., Gizzatullina E. R.* Analysis of relief morphometry by global DEM in the southern part of the European territory of Russia // *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki.* 2020. T. 162. Vyp. 4. S. 612–628.
<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-6282>
2. *Ivanov M. A., Prishchepov A. V., Golosov V. N., Zalyaliev R. R., Efimov K. V., Kondrat'eva A. A., Kinyashova A. D., Ionova Yu. K.* Method of croplands dynamics mapping in river basins of the European part of Russia for the period of 1985–2015 // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 161–171
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-161-171>
3. *Instruktsiya po fotogrammetricheskim rabotam pri sozdanii tsifrovyykh topograficheskikh kart i planov* [Instruction on Photogrammetry while Creating Digital Topographic Maps and Plans]. Moscow, TsNIIGAIK, 2002. 48 p.
4. *Kuznetsova, A. S., Pushkarev, A. A., Krasnoshchekov, K. V.* 2023. Primeneniye FABDEM i drugikh sovremennykh tsifrovyykh modeley rel'yefa v sisteme agrarnogo monitoringa // *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii.* 2023. Vyp. 4. S. 139–147.
<https://doi.org/10.25729/ESI.2023.32.4.012>
5. *Litvin L. F.* Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii. — M.: Akademkn., 2002. — 255 c.
6. *Mal'tsev K. A., Yermolaev O. P.* Using DTM for automatic plotting of catchments. *Geomorfologiya.* 2014;(1):45-52.
<https://doi.org/10.15356/0435-4281-2014-1-45-52>
7. *Maltsev K. A., Golosov V. N., Gafurov A. M.* Tsifrovyye modeli rel'yefa i ikh ispol'zovaniye v raschotakh tempov smyva pochv na pakhotnykh zemlyakh // *Uchenyye zapiski kazanskogo universiteta. Seriya yestestvennyye nauki.* 2018, T. 160, vyp. 3 S. 514–530
8. *On'kov I. V., Onyanova T. Ya., Shilyayeva O. Yu.* Issledovaniye tochnosti radarnykh TSMR, postroyennykh po snimkam ALOS PALSAR i modeli SRTM, v zavisimosti ot vida otrazhayushchey poverkhnosti // *Geomatika.* 2012. Vyp 4. S. 33–36.

9. *Tolkacheva V. F., Gartsman B. I.* Modelirovaniye rechnoy seti na osnove tsifrovoy modeli rel'yefa (na primere Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza) // Pyatyte Vinogradovskiy Chteniye. Hidrologiya v Epokhu Peremen : Sbornik Dokladov Mezhdunarodnoy Nauchnoykonferentsii Pamyati Vydayushchegosya Russkogo Uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo VVM, 2023 S. 604–609.

10. *Florinskiy I. V.* Geomorfometriya segodnya. InterKarto, InterGIS. 2021. T. 27. Vyp. 2. S. 394–447.

<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448>

11. Erozionno-ruslovyvye sistemy : monografiya / pod nauch. red. R. S. Chalova, A. Yu. Sidorchuka, V. N. Golosova. M. : INFRA-M, 2017. 698 s.

12. ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D — 30m (AW3D30)” Japan. [2018]. URL: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30e.htm> (application date 01.06.2020)

13. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 — summary of validation results, [2011]. URL: <https://pubs.usgs.gov/publication/70005960> (application date 01.06.2020)

14. *Barnes R.* Parallel PriorityFlood depression filling for trillion cell digital elevation models on desktops or clusters // Computers & Geosciences. — 2016. — Vol. 96. — P. 56–68.

15. *Borrelli P., Alewell C., Alvarez P. et al.* Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // Sci. Total Environ. 2021. N 780. 146494.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>

16. *Buckley S. M., Agram P. S., Belz J. E., Crippen R. E., Gurrola E. M., Hensley S., Kobrick M.* NASADEM: User Guide. Pasadena, California, 2020. 52 p.

17. *Carrera-Hernández J. J.* Not all DEMs are equal: An evaluation of six globally available 30 m resolution DEMs with geodetic benchmarks and LiDAR in Mexico // Remote Sens. Environ. 2021. N 261. 112474.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112474>

18. *del Rosario González-Moradas M., Viveen W., Andrés Vidal-Villalobos R., Carlos Villegas-Lanza J.* A performance comparison of SRTM v. 3.0, AW3D30, ASTER GDEM3, Copernicus and TanDEM-X for tectonogeomorphic analysis in the South American Andes // CATENA. 2023. № 228. 107160.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107160>

19. *Desmet P. J. J., Govers G.* A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // Journal of Soil and Water Conservation. 1996. № 51. P. 427–433.

20. *Emmendorfer I. B., de Almeida L. P. M., Alves D. C. L., Emmendorfer L. R., Arigony-Neto J.* Accuracy assessment of global DEMs for the mapping of coastal flooding on a low-lying sandy environment: Cassino Beach, Brazil // Reg. Stud. Mar. Sci. 2024. N 74. 103535.

<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103535>

21. *Farr T. G., Rosen P. A., Caro E. et al.* 2007. The Shuttle Radar Topography Mission // Rev. Geophys. 2007. № 45.

<https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

22. *Ghannadi A., Alebooye S., Izadi M.* Vertical accuracy assessment of copernicus DEM (case study: Tehran and Jam cities) // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2023. NX-4/W1-202. P. 209–214.

<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-209-2023>

23. *Hawley L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J.* A 30m global map of elevation with forests and buildings removed // Environ. Res. Lett. 2022. № 2, vol. 17. 024016.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>

24. *Hutchinson M.* A new procedure for gridding elevation and stream of data with automatic removal of spurious pits // *J. Hydrol.* 1989. №106. P. 211–232.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5)
25. *Hutchinson M. F. et al.* Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure // *Geomorphometry*. — 2011. — Т. 2011. — P. 19–22.
26. *Krdžalić D., Ćatić J., Vrce E., Omićević D.* Evaluating the accuracy of the digital elevation models (DEMs) within the territory of Bosnia and Herzegovina // *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 2024. N 34. 101187.
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101187>
27. *Lindsay J. B.* Efficient hybrid breachingfilling sink removal methods for flow path enforcement in digitalelevation models // *Hydrological Processes*. — 2016a. — Vol. 30, no. 6. — P. 846–857.
28. *Lopez-Vazquez C., Ariza-López F.* Global Digital Elevation Model Comparison Criteria: An Evident Need to Consider Their Application // *ISPRS Int. J. Geo-Information*. 2023. № 12, 337.
<https://doi.org/10.3390/ijgi12080337>
29. *Martz L. W., Garbrecht J.* An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM // *Computers & Geosciences*. — 1999. — Vol. 25, no. 7. — P. 835–844.
30. *Maune David F.* ed. 2007. *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. 2nd ed. Bethesda, Md: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
31. *Meadows M., Jones S., Reinke K.* Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-prone environments // *Int. J. Digit. Earth* 2024. N 17. 2308734.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2308734>
32. *Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson, L. R.* Modeling topographic potential for erosion and depositing using GIS // *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* 1996. № 10. P. 629–641.
<https://doi.org/10.1080/0269379960890210>
33. *Nandam V., Patel P. L.* A framework to assess suitability of global digital elevation models for hydrodynamic modelling in data scarce regions // *J. Hydrol.* 2024. № 630. 130654.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130654>
34. USGS EROS Archive — Products Overview URL: <https://lta.cr.usgs.gov> (application date 01.06.2020)
35. *Pipaud I., Loibl D., Lehmkuhl F.* Evaluation of TanDEM-X elevation data for geomorphological mapping and interpretation in high mountain environments — A case study from SE Tibet, China // *Geomorphology*. 2015. № 246. P. 232–254.
36. *Planchon O., Darboux F.* A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevationmodels // *Catena*. — 2001. — Vol. 46. — P. 159–176.
37. *Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C.* *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Resived Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington: U.S. Government Printing Office, 1997. 384 p.
<https://doi.org/DC0-16-048938-5-65-100>
38. *Soille P.* Morphological carving // *Pattern Recognition Letters*. — 2004. — Vol. 25, no. 5. — P. 543–550.
39. *Tarboton D. G., Bras R. L., Rodriguez-Iturbe I.* On the extraction of channel networks from digital elevation data // *Hydrol. Process*. 1991.N 5. P. 81–100.
<https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>
40. *Tran T. N. D., Nguyen B. Q., Vo N. D., Le M. H., Nguyen Q. D., Lakshmi V., Bolten J. D.* Quantification of global Digital Elevation Model (DEM) — A case study of the newly released NASA-DEM for a river basin in Central Vietnam // *J. Hydrol. Reg. Stud.* 2023. № 45. 101282.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101282>

41. *Van Rompaey A. J. J., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J.* Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // *Earth Surf. Process. Landforms*. 2001. № 26. P. 1221–1236. <https://doi.org/10.1002/esp.275>

42. *Wischmeier W. H., Smith D. D.* Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: U.S. Government Printing Office, 1978. 67 p.

УДК 556.114.7: 546.21: 543.632.14

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В МЕЗОТРОФНЫХ ВОДОЕМАХ КАРЕЛИИ

© 2025 г. **А. В. Леонов^{а, *}**, **М. В. Зобкова^{б, **}**

^аИнститут океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва

^бИнститут водных проблем Севера КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр Российской академии наук”, г. Петрозаводск

*E-mail: leonov@ocean.ru

**E-mail: rincalika21@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.09.2024 г.

После доработки 26.02.2025 г.

Принята к публикации 10.03.2025 г.

В 2012–2013 гг. проведены исследования кинетики биохимического потребления кислорода (БПК) и состава органического вещества (ОВ) на пяти мезотрофных озерах Карелии: Салонъярви, Вегарусъярви, Валгомозеро, Сямозеро и Шотозеро. Эксперименты по БПК продолжительностью до 126 суток (при 20 и 10°C) выполняли во все сезоны года. В результате были получены уравнения и значения кинетических параметров БПК, характеризующих сезонные изменения потребления O₂ на окисление ОВ в две-три стадии (I-я, II-я и L-линейная). В результате анализа данных был выявлен ряд общих особенностей, характерных для всех исследованных мезотрофных водных объектов. Во все сезоны скорость окисления ОВ на L-стадии была значительно ниже, чем на I-й. Вклад каждой стадии в общее потребление кислорода был неравномерным: наибольший — (более 50%) во все сезоны, кроме летнего (33%), оказывала L-стадия, меньший — I-я и II-я стадии. Летом из-за активного продуцирования легкоокисляемого ОВ суммарное потребление O₂ на I-й и II-й стадиях достигало 67% от БПК_{полн}, что было сопоставимо с эвтрофными водоемами. Скорость окисления ОВ на I-й стадии увеличивалась от зимы к лету в 4.0 раза и затем постепенно снижалась к осени, а на L-стадии была во все сезоны в несколько раз ниже, чем на I-й. Полученные взаимосвязи между разными показателями ОВ и кинетическими параметрами БПК в воде из мезотрофных озер отражают спектр сезонных особенностей изменения условий окисления ОВ. Отмечено снижение окисления лабильных компонентов ОВ в ряду озер: Валгомозеро → Сямозеро → Шотозеро → Салонъярви и Вегарусъярви, что подтверждается связью с содержанием автохтонного ОВ.

Ключевые слова: биохимическое потребление кислорода, скорость потребления кислорода, автохтонное и аллохтонное органическое вещество, качество воды, озера гумидной зоны

DOI: 10.31857/S0869607125010076, EDN: LIAYSI

ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество (ОВ) природных вод является неотъемлемой частью глобального цикла углерода. В зависимости от источника происхождения ОВ принято подразделять на две крупные группы: автохтонное ОВ, образующееся в самом

водоеме, представленное легкоокисляемыми соединениями (углеводы, липиды, белки и др.), и аллохтонное, поступающее с водосборной территории и состоящее из трудноокисляемых высокоокрашенных гумусовых веществ. Качественный и количественный состав ОВ, а также процессы его новообразования, трансформации и деструкции в водных объектах зависят от многих факторов, включая гидрологические, гидрохимические, климатические особенности, характер водосборной территории и т.д. В составе органического вещества большинства водных объектов Карелии преобладает аллохтонное ОВ, а в его составе — гумусовые вещества [7]. Повышенное содержание автохтонного ОВ отмечается только в озерах с замедленным водообменом, а также в некоторых эвтрофных водоемах [18].

Биогенные элементы вносят существенный вклад в процессы новообразования растворенного и взвешенного автохтонного ОВ в озерах [3; 25]. В поверхностных водах Карелии фосфор является основным лимитирующим биогенным элементом. В незагрязненных водных объектах содержание минерального Р ($P_{\text{мин}}$) незначительно [15], а основной вклад в общий фосфор ($P_{\text{общ}}$) вносит его органическая форма в составе как автохтонного, так и аллохтонного ОВ [7]. Также для озер Карелии отмечено характерное увеличение концентрации $P_{\text{общ}}$ от зимы к лету при небольших сезонных колебаниях концентраций $P_{\text{мин}}$ [20].

Эксперименты по кинетике биохимического потребления кислорода (БПК) могут дать полезную информацию о закономерностях окисления ОВ в природных водах. Однако в ранее опубликованных исследованиях БПК-тесты проводились в течение 20–60 суток или даже меньше, что позволяло оценить только общие параметры трансформации ОВ, характеризующие в основном окисление только лабильных компонентов ОВ [22–24]. В то же время длительные эксперименты по кинетике БПК (126 суток), осуществляемые на разнотипных водных объектах Карелии с 2012 г., позволили провести более детальное изучение этого процесса: выделить и охарактеризовать особенности различных типов развития БПК, подобрать оптимальный подход к их анализу [10] и охарактеризовать трансформацию ОВ различного генезиса [11–14]. В результате были выделены три стадии окисления ОВ: первая (I-я) протекает в первые несколько суток эксперимента и связана с окислением в первую очередь углеводов, вторая (II-я) — белков и липидов, L-стадия — самая продолжительная, на которой окисляются гумусовые вещества [13]. С помощью разработанного подхода были исследованы кинетические параметры трансформации ОВ в эвтрофных водоемах Карелии [14]. В результате было установлено, что суммарный вклад I-й и II-й стадий в общее потребление кислорода в период открытой воды составлял более 50%, что связано с активным продуцированием лабильного ОВ в эти сезоны года. Также исследования показали, что скорость окисления ОВ на L-стадии, на которой происходит медленное окисление гумусовых веществ, во все сезоны в несколько раз ниже скорости на I-й стадии, где быстро окисляются лабильные компоненты ОВ [14]. Это является весьма закономерным, поскольку константа скорости трансформации аллохтонного ОВ в 10 раз меньше, чем автохтонного [7].

Поэтому в продолжение исследования кинетических параметров окисления ОВ в разнотипных водных объектах гумидной зоны на текущем этапе предстояло провести оценку особенностей процессов трансформации ОВ в мезотрофных водоемах, а также сравнить их с ранее полученными результатами для эвтрофных озер. Для этого предстояло установить значения кинетических параметров БПК в воде с учетом основных факторов среды (температурные условия, разные сезоны, состав ком-

понентов ОВ); охарактеризовать отличия окисления различных компонентов ОВ на отдельных стадиях развития БПК (I-я, II-я и L-стадия); выявить взаимосвязи между кинетическими параметрами БПК и показателями компонентов ОВ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования в 2012–2013 гг. проводили на пяти мезотрофных озерах Вегарусъярви, Салонъярви, Валгомозеро, Сямозеро, Шотозеро, отличающихся по морфометрическим и гидрологическим характеристикам (табл. 1). Все водные объекты, кроме Валгомозеро, расположены на водосборе реки Шуи: Вегарусъярви и Салонъярви — в верхнем течении, а Сямозеро и Шотозеро — в среднем. Озеро Валгомозеро находится в северной части Заонежского п-ва (рис. 1).

Таблица 1. Морфометрические и некоторые гидрологические характеристики озер [19]

Table 1. Morphometric and some hydrological characteristics of lakes [19]

Озеро	Площадь зеркала, км ²	Площадь водосбора, км ²	Средняя глубина, м	Объем водных масс, км ³	Удельный водосбор ($\Delta F_{\text{уд}}$)	Условный водообмен (τ), лет
Сямозеро	266.0	1550	6.7	1.790	5.8	3.13
Шотозеро	74.0	5540	3.1	0.228	74.9	0.13
Салонъярви	46.1	1640	2.6	0.120	35.6	0.23
Вегарусъярви	13.8	171	4.4	0.56	12.4	0.96
Валгомозеро	3.4	10.4	8.8	0.030	3.1	6.27



Рис. 1. Карта-схема расположения водных объектов.

Fig 1. Map of the location of water bodies.

Для БПК-экспериментов и анализа содержания разных форм ОВ пробы воды в водоемах отбирались во все сезоны года. При этом в 2012 г. отбор проб осуществлялся в истоках озерах Валгомозеро, Вегарусъярви и Салонъярви. В 2013 г. в центре озер Сямозеро и Шотозеро отбирались интегральные пробы, сформированные из воды с трех слоев (поверхность, середина, дно). Это позволило в дальнейшем дать усредненную оценку кинетических особенностей окисления ОВ всего озера.

Всего при исследовании мезотрофных водоемов было выполнено 40 длительных (126 суток) БПК-тестов при 20 и 10°C. Методика постановки и проведения длительных БПК-экспериментов подробно описана в работе [11, 12]. Полученные БПК-кривые с двумя-тремя стадиями окисления ОВ (I-я, II-я, L-стадия) описывались кинетическими уравнениями разного типа [9], подробное описание которых приведено в работе [10]. С помощью данных уравнений оценивались значения параметров БПК: k и w_1 — константы скорости на I-й и II-й стадиях соответственно, сут⁻¹ и л мг⁻¹ сут⁻¹; v_I , ω_S — скорости на I-й и L-стадиях соответственно, мг О₂/л сут; $[O_2]^I$, $[O_2]^{II}$ — предельные значения БПК на I-й и II-й стадиях соответственно, мг О₂/л; $\omega_S \cdot 126$ — общее потребление О₂ на линейной L стадии, мг О₂/л; БПК_{полн} — БПК полное (суммарное потребление О₂ по выделенным стадиям), мг О₂/л.

Перед началом эксперимента в пробах воды оценивалось содержание органического углерода ($C_{орг}$) согласно методике [6]. Значения химического потребления кислорода (ХПК) и перманганатной окисляемости (ПО), являющихся косвенными показателями содержания ОВ, а также концентрации общего фосфора и взвешенных веществ (ВВ) определяли по стандартизированным методикам [1]. Определение общего автохтонного (ОВ_{авт}) и аллохтонного ОВ (ОВ_{алл}) проводилось сорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе [16]. Содержание взвешенного ОВ (ОВ_{взв}) оценивали по разнице ХПК в исходной и фильтрованной воде. Значения ряда параметров ОВ оценивались по эмпирическим уравнениям: содержание лабильного С ($C_{лаб} = 0.3 \times [O_2]^I$); условно “стойкого” С ($C_{стаб} = C_{орг} - C_{лаб}$), $C_{орг}$ в зависимости от общего содержания ОВ (ОВ_Σ) [2]; содержание $C_{орг}$ при отсутствии прямого аналитического определения — $C_{орг} = 0.375 \text{ХПК}$ [21]. Статистическую обработку данных осуществляли с помощью программного обеспечения SofaStatistics (www.sofastatistics.com) с пороговым критерием статистической значимости (p), равным 0.01.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Значения показателей ОВ в воде исследованных водных объектов

Значения показателей ОВ, оцененных аналитически и по эмпирическим уравнениям, а также $P_{общ}$ имели некоторые отличия в воде мезотрофных водоемов (табл. 2). Содержание фосфора общего было схожим во всех исследованных озерах, а его сезонная динамика характеризовалась увеличением концентрации от зимы к лету. Содержание ВВ в мезотрофных озерах было ниже, чем в эвтрофных [14]. Максимальные значения были отмечены в оз. Шотозеро, что, по-видимому, связано с тем, что через озеро протекает р. Шуя, с водами которой может поступить большое количество ВВ. Их содержание возрастает в период открытой воды, что связано с активным протеканием продукционных процессов и подтверждается статистически значимой связью между ВВ и $C_{лаб}$ (тест Пирсона: $9.376 \text{e}-3 < 0.01$; $R = -0.541$; $df = 20$).

В связи с тем, что водосбор реки Шуи заболочен примерно на 20% [4], и особенно ее верхнее течение, озера Вегарусъярви, Салонъярви и Шотозеро, расположенные на ее водосборе, являются высокогумусными, только Сямозеро относится к мезогумусным водоемам. Озеро Валгомозеро классифицируется как олигогумус-

Таблица 2. Химические показатели ОВ воды в 2012–2013 гг.

Table 2. Chemical parameters of organic matter in 2012–2013

Водный объект, сезон, год	Аналитические измерения								Расчетные значения		
	Р _{общ} , мкг/л	ВВ, мг/л	С _{орг} , мг С/л	ПО	ХПК	ОВ _{авт}	ОВ _{алл}	ОВ _{взв}	С _{лаб}	С _{стаб}	ОВ _Σ , мг/л
						мг О/л					
СЛ, 2012, З	16	2.2	19.2*	27.7	51.2	7.7	43.5	0	0.24	19.0	8.93
СЛ, 2012, В	19	8.7	13.9*	23.1	37.0	7.8	29.2	0.8	0.47	13.4	6.46
СЛ, 2012, Л	32	2.0	15.6*	19.0	41.5	10.1	31.4	6.1	0.83	14.8	7.26
СЛ, 2012, О	18	0.8	23.6*	33.7	62.9	6.7	56.2	0	0.24	23.4	11.0
Среднее	21	3.4	18.1*	25.9	48.2	7.9	40.1	3.5	0.44	17.7	8.41
ВГ, 2012, З	13	1.2	17.0*	17.2	45.3	7.4	37.9	11.9	0.11	16.9	7.91
ВГ, 2012, В	15	2.0	13.0*	20.6	34.7	4.7	30.0	1.2	0.54	12.5	6.05
ВГ, 2012, Л	18	1.2	14.5*	16.0	38.7	8.9	29.8	2.0	0.36	14.1	6.74
ВГ, 2012, О	14	1.3	15.1*	21.8	40.2	8.6	31.6	0	0.30	14.8	7.02
Среднее	15	1.4	14.9*	18.9	39.7	7.4	32.3	5.0	0.33	14.6	6.93
ВЛ, 2012, З	13	1.2	5.5*	4.8	14.6	7.0	7.6	2.4	0.19	5.3	2.56
ВЛ, 2012, В	25	0.9	8.1*	7.8	21.6	9.0	12.6	1.4	0.77	7.3	3.77
ВЛ, 2012, Л	16	0.9	9.5*	9.6	25.2	17.8	7.4	5.4	0.74	8.8	4.42
ВЛ, 2012, О	29	1.8	7.6*	8.4	20.3	14.0	6.3	2.0	0.89	6.7	3.53
Среднее	21	1.2	7.7*	7.7	20.4	12.0	8.5	2.8	0.65	7.0	3.57
СМ, 2013, З	12	0.2	9.5	10.4	25.2	9.0	16.2	1.1	0.21	9.3	4.42
СМ, 2013, В	28	4.4	7.7	10.3	22.8	10.8	12.0	0.4	0.27	7.4	3.58
СМ, 2013, Л	33	6.6	9.9	10.4	22.6	10.6	12.0	2.2	0.51	9.4	4.61
СМ, 2013, О	22	2.3	8.3	10.3	23.6	10.0	13.6	1.8	0.38	7.9	3.86
Среднее	24	3.4	8.9	9.8	23.6	10.1	13.5	1.4	0.34	8.5	4.12
ШТ, 2013, З	20	0.3	21.2	8.8	63.3	8.2	55.1	1.1	0.60	20.6	9.86
ШТ, 2013, В	20	4.0	15.7	9.8	40.1	9.3	30.8	2.5	0.68	15.0	7.30
ШТ, 2013, Л	36	8.8	14.1	29.1	35.5	10.6	24.9	1.5	0.91	13.2	6.56
ШТ, 2013, О	33	6.6	14.4	21.9	33.6	9.5	24.1	0.5	0.35	14.1	6.70
Среднее	27	4.9	16.4	23.0	43.1	9.4	33.7	1.4	0.63	15.7	7.61

Примечание: * — расчет С_{орг} по эмпирической формуле; здесь и в таблице 3 указаны сезоны и озера: З, В, Л, О — зима, весна, лето, осень соответственно, СЛ, ВГ, ВЛ, СМ, ШТ — Салонъярви, Вегарусъярви, Валгомозеро, Сямозеро, Шотозеро; прочерк — отсутствие данных.

ное [19]. Поэтому для исследованных водоемов выявлена разница в содержании ОВ. В озерах Вегарусъярви, Салонъярви и Шотозеро отмечались высокие значения ХПК, ПО, С_{орг}, а также высокое содержание аллохтонного ОВ (табл. 2). Поскольку

оз. Валгомозеро классифицируется как олигогумусное [19], в нем были установлены минимальные значения этих показателей, но максимальное содержание автохтонного ОВ. Сезонная динамика содержания автохтонного и аллохтонного ОВ выражена довольно слабо, можно лишь отметить незначительное снижение $ОВ_{алл}$ в летний период и увеличение $ОВ_{авт}$ в период открытой воды.

Особенности кинетики БПК в воде из мезотрофных водных объектов

Выявление характерных особенностей развития БПК в длительных экспериментах, включая анализ типов БПК-кривых, а также наличие или отсутствие II-й и L-стадий процесса в воде озер отражает сложный состав ОВ разных водоемов и его сезонную динамику. В воде из мезотрофных озер выявлены отличия по количеству стадий процесса потребления кислорода: при 20°C развитие БПК в две и три стадии отмечено в 40 и 60% случаев, а при 10°C — в 65 и 35% случаев соответственно. В 20 экспериментах при 20°C II-я и L-стадии были зафиксированы по 16 раз каждая, а при 10°C II-я стадия — только 8 раз (табл. 3). Отсутствие II-й или L-стадий потребления кислорода отмечалось в различных озерах в разные сезоны года и было связано с полным расходом O_2 на предыдущих стадиях.

В результате обработки данных БПК-кривых с выраженными двумя-тремя стадиями потребления O_2 (рис. 2–6), полученными в ходе проведения длительных экспериментов с пробами воды из мезотрофных озер Карелии, были рассчитаны значения отдельных кинетических параметров (табл. 3). Отличительной особенностью этой серии экспериментов были близкие значения потребления O_2 при 20 и 10°C в первые семь суток экспонирования проб воды, что выявлено при разных режимах отбора проб воды.

Серия 1. Данные экспериментов с водой из оз. Салонъярви

Кинетику I-й стадии БПК в экспериментах с зимней и весенней водой при 20°C и с весенней при 10°C описывали параметры уравнения E-типа (рис. 2). При этом значения констант скорости БПК, k , были одного порядка (в среднем 0.112 сут^{-1}), а значения параметров $[O_2]'$ и v_1 весной при 20°C — выше параметров, оцененных зимой, в 1.9 и 2.1 раза соответственно (табл. 3). Летом и осенью развитие I-й стадии БПК описывали параметры уравнения A-типа, при этом были выявлены сравнительно близкие значения w_1 . Летом также отмечались максимальные значения $[O_2]'$ — $2.75 \text{ мг } O_2/\text{л}$ и v_1 — 0.5330 сут^{-1} , что вполне закономерно и указывает на активное протекание продукционных процессов в этот период.

Развитие II-й стадии БПК при 20°C в летней и осенней воде описывали значения сильно отличающихся параметров (w_2 — 0.081 и $0.226 \text{ л мг}^{-1} \text{ сут}^{-1}$, $[O_2]''$ — 5.17 и $0.42 \text{ мг } O_2/\text{л}$), что свидетельствует о разных режимах окисления компонентов ОВ. При 10°C кинетика II-й стадии БПК в осенней воде отражена значениями параметров (w_2 — $0.100 \text{ л мг}^{-1} \text{ сут}^{-1}$, $[O_2]''$ — $0.25 \text{ мг } O_2/\text{л}$), которые в целом ниже полученных при 20°C.

Минимальная скорость ω_s на L-стадии БПК при 20 и 10°C отмечалась зимой, а весной и осенью они были близки и составляли в среднем при 20°C — 0.0763 , а при 10°C — $0.262 \text{ мг } O_2/(\text{л сут})$ соответственно. В летней воде скорость ω_s при 20°C не была определена из-за полного расхода O_2 на I-й и II-й стадиях. Таким образом, в указанные периоды скорости ω_s при 20°C были выше в 2.2–3.1 раза в сравнении с оцененными скоростями при 10°C.

Серия 2. Данные экспериментов с водой из оз. Вегарусъярви

Кинетику БПК при 10 и 20°C в различные сезоны отражали уравнения E- и A-типа (рис. 3). Весной и летом значения $[O_2]'$ на I-й стадии потребления кислорода были

Таблица 3. Значения кинетических параметров БПК при разных температурах 20°C — числитель и 10°C — знаменатель**Table 3.** The values of kinetic parameters estimated at different temperatures: the numerator is the 20°C and the denominator is the 10°C

Озеро, год, сезон	Тип БПК	Кинетические БПК-параметры									
		I-я стадия (по E- или A-типу)			Линейная стадия			II-я стадия		БПК _{подн}	
		[O ₂] ^I , мг O ₂ /л	k или w1, л мг ⁻¹ сут ⁻¹	v ₁ , мг O ₂ (л сут)	ω _S , мг O ₂ (л сут)	ω _S ·126, мг O ₂ /л	[O ₂] ^{II} , мг O ₂ /л	w2, л мг ⁻¹ сут ⁻¹	Расчет	Опыт	
									мг O ₂ /л		
СЛ, 2012, З	EL	0.81	0.106	0.0862	0.0551	4.628*	-	-	5.441	5.44	
	AL	0.24	0.417	0.0032	0.0248	2.083*	-	-	2.323	2.32	
СЛ, 2012, В	EL	<u>1.58</u>	<u>0.115</u>	<u>0.1820</u>	<u>0.0754</u>	<u>6.334*</u>	-	-	<u>7.912</u>	<u>7.91</u>	
	EL	0.95	0.115	0.1090	0.0273	3.440	-	-	4.39	4.40	
СЛ, 2012, Л	AA	<u>2.75</u>	<u>0.234</u>	<u>0.5330</u>	-	-	<u>5.17</u>	<u>0.081</u>	<u>7.920</u>	<u>7.92</u>	
	AL	0.82	0.445	0.0014	0.0313	3.944	-	-	4.764	4.76	
СЛ, 2012, О	AAL	<u>0.79</u>	<u>0.282</u>	<u>0.0117</u>	<u>0.0772</u>	<u>6.485*</u>	<u>0.42</u>	<u>0.226</u>	<u>7.695</u>	<u>7.70</u>	
	AAL	0.11	0.332	0.0005	0.0250	3.150	0.25	0.100	3.510	3.51	
ВГ, 2012, З	EL	<u>0.37</u>	<u>0.194</u>	<u>0.0724</u>	<u>0.0221</u>	<u>1.856*</u>	-	-	<u>2.229</u>	<u>2.23</u>	
	AL	0.06	1.117	0.0002	0.0089	0.747*	-	-	0.807	0.81	
ВГ, 2012, В	AAL	<u>1.80</u>	<u>0.259</u>	<u>0.1530</u>	<u>0.0363</u>	<u>4.574</u>	<u>1.69</u>	<u>0.137</u>	<u>8.062</u>	<u>8.06</u>	
	EL	0.67	0.143	0.0958	0.0251	3.163	-	-	3.833	3.82	
ВГ, 2012, Л	AAL	<u>1.21</u>	<u>0.336</u>	<u>0.0626</u>	<u>0.0477</u>	<u>6.010</u>	<u>0.51</u>	<u>0.608</u>	<u>7.730</u>	<u>7.73</u>	
	AL	0.23	0.294	0.0013	0.0248	3.125	-	-	3.355	3.35	
ВГ, 2012, О	AAL	<u>1.01</u>	<u>0.235</u>	<u>0.0264</u>	<u>0.0448</u>	<u>5.645</u>	<u>0.65</u>	<u>0.225</u>	<u>7.305</u>	<u>7.30</u>	
	EL	0.28	0.111	0.0311	0.0196	2.470	-	-	2.750	2.75	
ВЛ, 2012, З	AL	<u>0.65</u>	<u>0.378</u>	<u>0.0129</u>	<u>0.0276</u>	<u>2.318*</u>	-	-	<u>2.969</u>	<u>2.94</u>	
	AAL	0.38	0.584	0.0008	0.0129	1.084*	0.21	0.217	1.671	1.67	
ВЛ, 2012, В	AAL	<u>2.90</u>	<u>0.286</u>	<u>0.3320</u>	<u>0.0302</u>	<u>3.805</u>	<u>0.89</u>	<u>0.190</u>	<u>7.595</u>	<u>7.58</u>	
	AAL	0.87	0.398	0.0841	0.0219	2.759	0.90	0.311	4.533	4.54	
ВЛ, 2012, Л	EAL	<u>2.47</u>	<u>0.134</u>	<u>0.3310</u>	<u>0.0311</u>	<u>3.919</u>	<u>1.05</u>	<u>0.112</u>	<u>7.439</u>	<u>7.45</u>	
	EAL	0.80	0.134	0.1070	0.0174	2.192	1.04	0.074	4.032	4.03	
ВЛ, 2012, О	AAL	<u>2.97</u>	<u>0.308</u>	<u>0.2850</u>	<u>0.0252</u>	<u>3.175</u>	<u>1.00</u>	<u>0.145</u>	<u>7.148</u>	<u>7.15</u>	
	EAL	0.70	0.120	0.0840	0.0148	1.865	2.07	0.065	4.635	4.64	
СМ, 2013, З	EAL	<u>0.69</u>	<u>0.115</u>	<u>0.0794</u>	<u>0.0293</u>	<u>3.692</u>	<u>0.38</u>	<u>0.198</u>	<u>4.762</u>	<u>4.77</u>	
	EAL	0.35	0.120	0.0420	0.0157	1.978	0.29	0.368	2.619	2.62	
СМ, 2013, В	AAL	<u>0.90</u>	<u>0.443</u>	<u>0.0155</u>	<u>0.0421</u>	<u>5.305</u>	<u>0.66</u>	<u>0.258</u>	<u>6.864</u>	<u>6.84</u>	
	AAL	0.33	0.492	0.0082	0.0159	2.003	0.81	0.198	3.143	3.14	
СМ, 2013, Л	EAL	<u>1.70</u>	<u>0.120</u>	<u>0.2040</u>	<u>0.0164</u>	<u>2.066</u>	<u>1.91</u>	<u>0.047</u>	<u>5.678</u>	<u>5.68</u>	
	AAL	0.47	0.321	0.0284	0.0199	2.507	0.80	0.311	3.777	3.78	
СМ, 2013, О	AAL	<u>1.25</u>	<u>0.375</u>	<u>0.0722</u>	<u>0.0352</u>	<u>4.435</u>	<u>0.81</u>	<u>0.191</u>	<u>6.495</u>	<u>6.50</u>	
	AL	0.72	0.533	0.0109	0.0200	2.520	-	-	3.240	3.24	
ШТ, 2013, З	EA	<u>2.00</u>	<u>0.092</u>	<u>0.1844</u>	-	-	<u>5.58</u>	<u>0.066</u>	<u>7.570</u>	<u>7.58</u>	
	EL	0.13	0.148	0.0192	0.0342	4.309	-	-	4.439	4.44	
ШТ, 2013, В	EA	<u>2.25</u>	<u>0.088</u>	<u>0.1970</u>	-	-	<u>5.65</u>	<u>0.055</u>	<u>7.902</u>	<u>7.90</u>	
	AL	0.22	0.333	0.0015	0.0301	3.793	-	-	4.013	4.02	
ШТ, 2013, Л	AA	<u>3.03</u>	<u>0.278</u>	<u>0.5900</u>	-	-	<u>5.07</u>	<u>0.079</u>	<u>8.100</u>	<u>8.12</u>	
	AL	0.96	0.186	0.0505	0.0330	4.158	-	-	5.118	5.14	
ШТ, 2013, О	AAL	<u>1.30</u>	<u>0.325</u>	<u>0.2450</u>	<u>0.0452</u>	<u>5.695</u>	<u>0.95</u>	<u>0.168</u>	<u>7.943</u>	<u>7.95</u>	
	AL	0.56	0.367	0.0484	0.0244	3.074	-	-	3.638	3.62	

Примечание: * — период 84 сут; типы БПК-кривых — экспоненциально-автокаталитический (EA), полиавтокаталитический (AA), экспоненциально-линейный (EL), автокаталитически-линейный (AL), экспоненциально-автокаталитически-линейный (EAL) и полиавтокаталитически-линейный (AAL); прочерк — отсутствие данных [9].

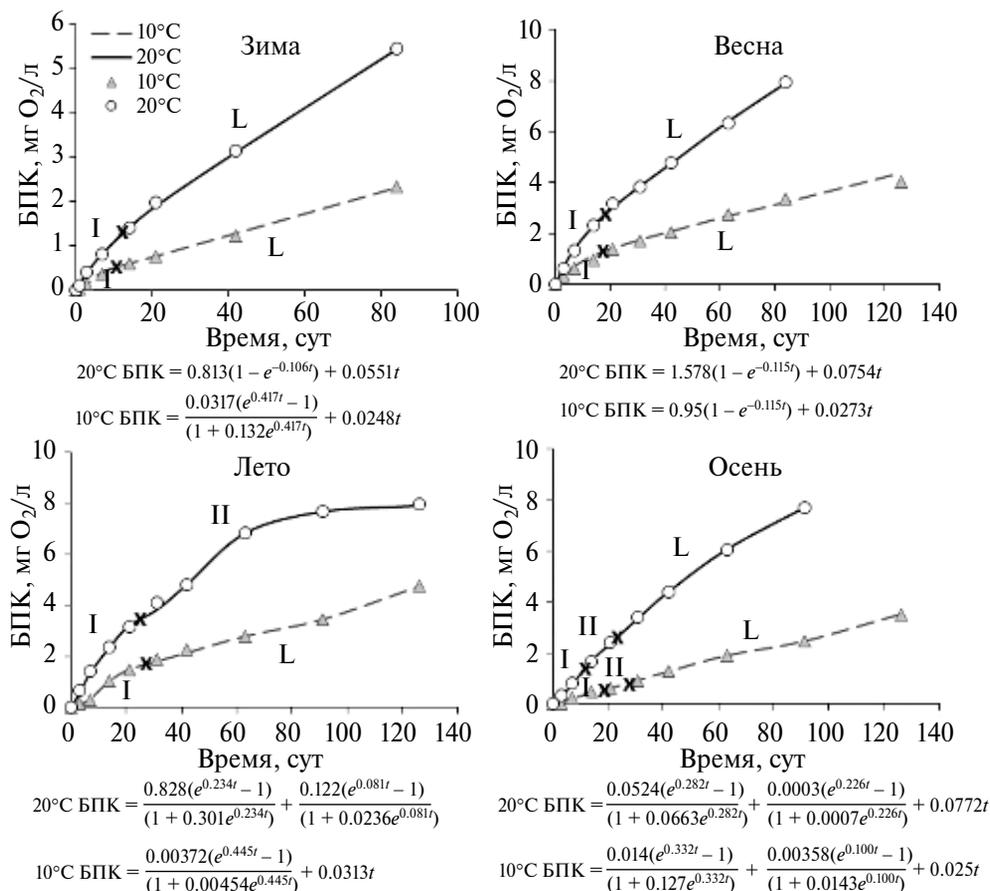


Рис. 2. Развитие БПК в экспериментах с водой из оз. Салоньярви в 2012 г. Обозначение расчетных кривых и экспериментальных данных по БПК при 20 и 10°C 2б–г и рис. 3–6 такое же, как на рис. 2а. На рис. 2–6 черными крестиками обозначены границы стадий окисления ОВ (I, II, L). Под рис. 2–6 приведены уравнения БПК-кривых.

Fig. 2. BOD-curves in the experiments with water from lake Salonyarvi in 2012. The designation of the BOD calculation curves and experimental data at 20 and 10°C in fragments 2б–г and Fig. 3–6 is the same as in fragment 2а. Black crosses in Fig. 2–6 — boundary of first, second and L stages (I, II, L) of organic matter oxidation. Under the Fig. 2–6 — different BOD-curve equations.

выше, чем зимой и осенью, что, по-видимому, связано с различным составом ОВ в эти сезоны. Значения параметров БПК отражали отличия свойств окисляющихся компонентов ОВ в весенней воде, в то же время с летней и осенней водой отличия были не столь значимы (значения параметров I-й стадии БПК достаточно близки). При температурах 20 и 10°C наибольшие значения параметров БПК отмечены весной (табл. 3).

Кинетика I-й стадии БПК при 10°C была отражена в зимней и летней воде отличающимися значениями параметров (табл. 3), которые свидетельствуют о существенных различиях состава ОВ в эти сезоны. Это особенно проявляется зимой, так как окисление ОВ выражено существенно слабее, чем летом. При переходе от зимы к весне происходит смена типа уравнений в описании кинетики I-й стадии БПК

(табл. 3). Это может быть связано с тем, что существенная доля образованного весной (и частично летом) лабильного ОВ окислялась в весенне-летний период. Поэтому эксперимент при 20°C с осенней водой начинался с существенно меньшего запаса лабильного ОВ, хотя при этом БПК-кривая описывалась тем же типом уравнения, что и летом. А вот при 10°C при переходе от лета к осени тип уравнения менялся (от А- к Е-типу).

Тенденция развития БПК при 10°C может быть иной: темпы окисления ОВ при меньшей температуре, как правило, существенно ниже, что приводит к сохранению осенью определенного запаса компонентов ОВ, который при переходе от лета к осени обнаружит свое присутствие переходом от уравнения А- к Е-типу или более активным расходом O_2 на окисление ОВ. Именно поэтому независимо от описания кинетики БПК разными функциями скорости развития I-й стадии БПК осенью при 20 и 10°C сопоставимы (v_1 — 0.0264 и 0.0311 мг O_2 /(л сут) соответственно).

Развитие II-й стадии БПК при 20°C отражено параметрами уравнения А-типа. Летом и осенью хорошо видна близость значений параметров $[O_2]^{II}$, что свидетельствует о схожих свойствах, окисляющихся компонентов ОВ. Примечательны значения скорости ω_s на L-стадии, оцененные в разные сезоны при 20 и 10°C: они понижены зимой (0.0221 и 0.00889 мг O_2 /(л сут) соответственно) и повышены в другие сезоны при небольшой их флуктуации (в среднем 0.0429 и 0.0232 мг O_2 /(л сут) соответственно).

Таким образом эксперименты с водой из оз. Вегарусьярви показали, что значения параметров БПК зимой в целом понижены, а весной повышены в сравнении с другими сезонами. Выявлены разные отношения скоростей v_1 при 20 и 10°C в весенней, летней и осенней воде (соответственно 1.6, 48 и 0.9 раза).

Серия 3. Данные экспериментов с водой из оз. Валгомозеро

Развитие БПК зимой и весной (при 20 и 10°C) и осенью (при 20°C) отражено уравнениями AL- и AAL-типа, а летом (при 20 и 10°C) и осенью (при 10°C) — EAL-типа (рис. 4, табл. 3). В сравнении с зимним экспериментом в весеннем развитии I-й стадии БПК протекало более активно: при 20 и 10°C значение $[O_2]^I$ было выше соответственно в 4.5 и 2.3 раза, а v_1 — выше в 26 и 100 раз. Стоит отметить, что летом при равных константах скорости k , значения $[O_2]^I$ и v_1 при 20°C в 3.1 раза выше, чем при 10°C. Осенью при 20°C получено итоговое превышение значений $[O_2]^I$ и v_1 в 4.2 и 3.4 раза соответственно по сравнению с 10°C.

Развитие II-й стадии БПК фиксировалось зимой при 10°C, а весной при 20 и 10°C. Таким образом, потребление O_2 на II-й стадии в весенней воде при 10°C было выше в 4.3 раза в сравнении с зимней. В то же время весной и летом при 20 и 10°C различий практически не было, значение $[O_2]^{II}$ в среднем составляло 0.90 и 1.05 мг O_2 /л, а осенью при 10°C оно было в 2.1 раза выше, чем при 20°C. Скорости ω_s на L-стадии при 20°C в зимней воде были в 2.1 раза выше скорости при 10°C, в другие сезоны это превышение было одного порядка (в 1.4–1.8 раза), что предполагает окисление на L-стадии в весенней, летней и осенней воде близких по составу и концентрациям компонентов ОВ.

Серия 4. Данные экспериментов с водой из оз. Сямозеро

Развитие БПК при 20 и 10°C отражается зимой уравнениями EAL-типа, а весной — AAL-типа. Кинетика БПК при 20°C летом и осенью описывалась уравнениями EAL- и AAL-типа, а при 10°C — AAL- и AL-типа соответственно (рис. 5, табл. 3). Одинаковые типы кривых, описывающие кинетику БПК при разных температурах, дают возможность количественно оценить развитие окислительных процессов зимой

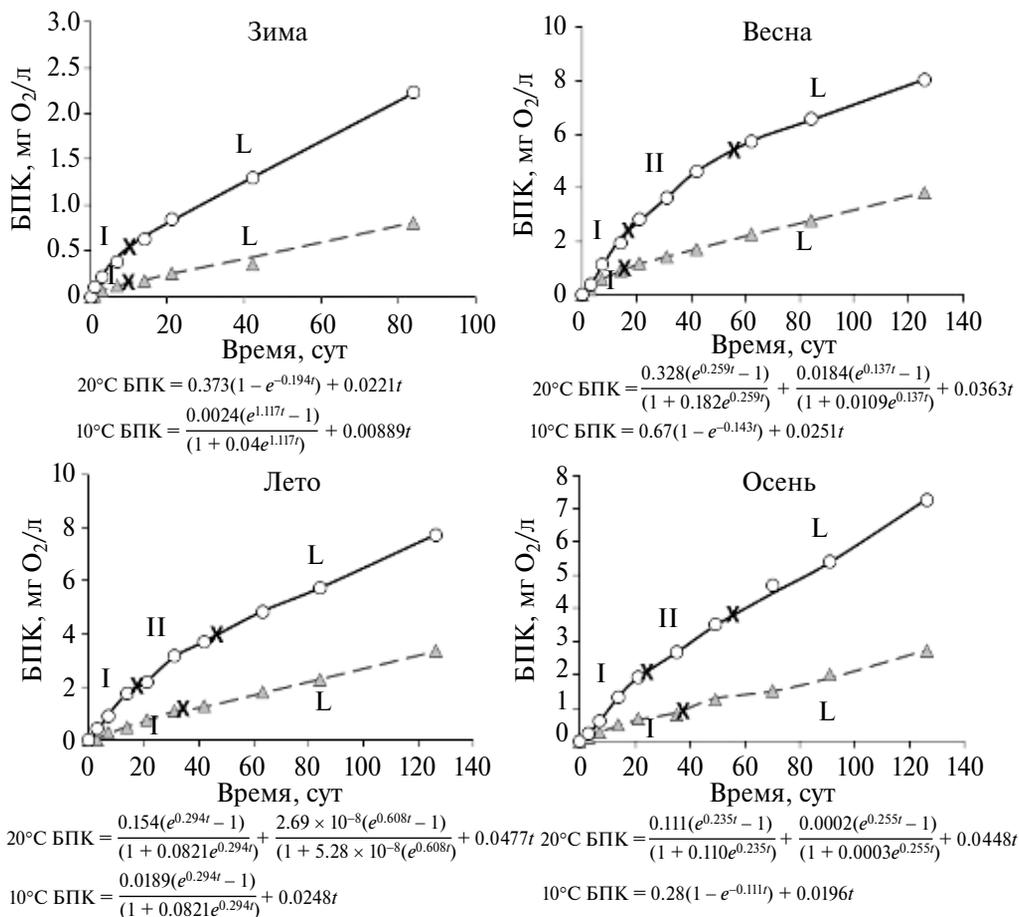


Рис. 3. Развитие БПК в экспериментах с водой из оз. Вегарусьярви в 2012 г.

Fig. 3. BOD-curves in the experiments with water from lake Vegarusyarvi in 2012.

и весной. Близкие значения БПК в начальные сроки экспериментов при 20 и 10°C подтверждают также близкие значения k (табл. 3). Однако значения параметров $[O_2]^I$ и v_1 при 20°C были выше соответственно в 2.0 и 1.9 раза, что означает в целом более активное потребление O_2 при 20°C, чем при 10°C. Анализ этих результатов позволяет предположить, что в летней воде присутствует лабильное ОВ, на окисление которого при 20°C на I-й стадии расходуется 1.70 мг O_2 /л, а при 10°C — 0.47 мг O_2 /л (или меньше в 3.6 раза).

Стоит отметить, что на II-й стадии БПК только значения параметров $[O_2]^{II}$ имели небольшие отличия при 20 и 10°C, что характеризует примерно одинаковые концентрации окисляющихся компонентов ОВ зимой. В то же время значения других параметров БПК показывают, что скоростные характеристики процессов окисления ОВ при 20°C выше, чем при 10°C. Развитие II-й стадии весной воспроизводилось близкими значениями параметров (табл. 3), что позволяет предположить, что в этот сезон происходило активное окисление компонентов ОВ на I-й, и на II-й стадиях. Летом было отмечено примерно равное потребление O_2 при 20°C на I-й и II-й стадии.

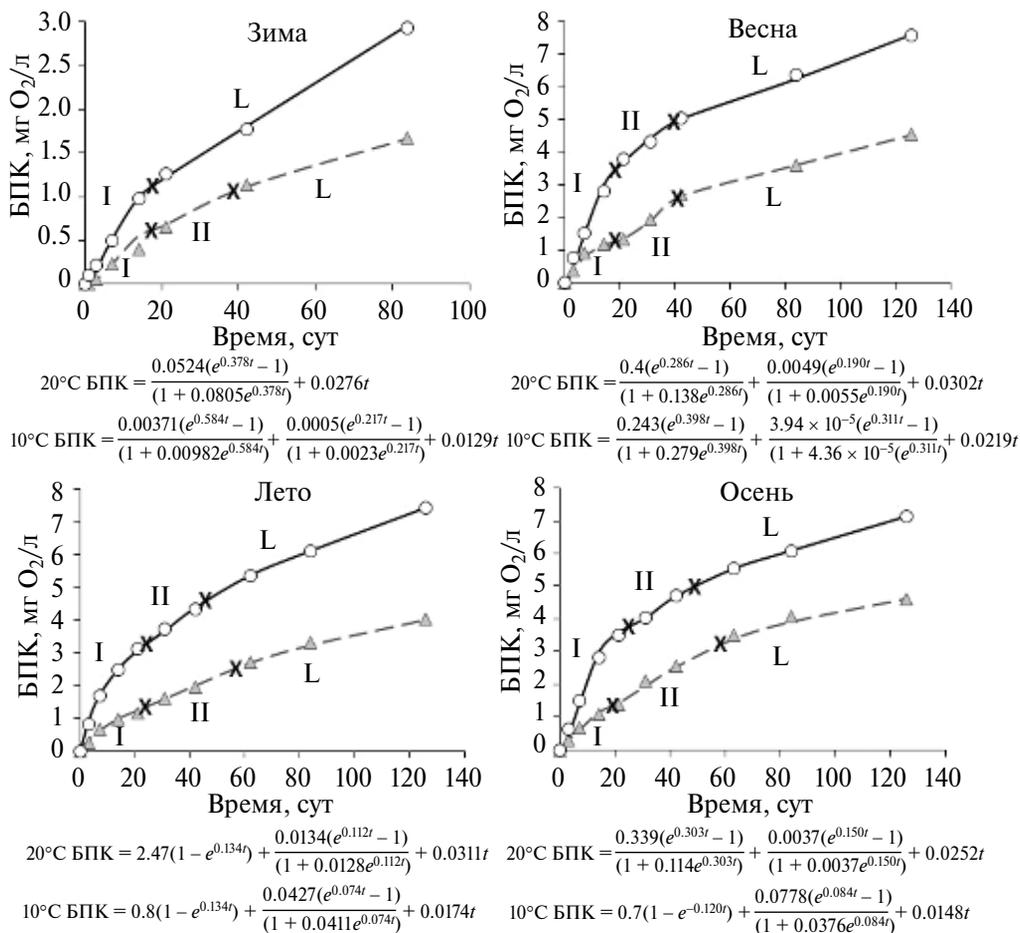


Рис. 4. Развитие BPK в экспериментах с водой из оз. Валгомозеро в 2012 г.

Fig. 4. BOD-curves in the experiments with water from lake Valgomozero in 2012.

ях (соответственно 1.70 и 1.912 мг O_2 /л) и более интенсивное при 10°C на II-й стадии (0.80 мг O_2 /л) в сравнении с потреблением на I-й стадии (0.47 мг O_2 /л). При 20°C скорости ω_S на L-стадии были выше зимой, весной и осенью соответственно в 1.5, 2.7 и 1.8 раза в сравнении с значениями при 10°C (табл. 3). Развитие BPK при 20°C летом выделялось повышенным потреблением O_2 на I-й и II-й стадиях (соответственно 1.70 и 1.912 мг O_2 /л) и пониженной скоростью на L-стадии (0.0164 мг O_2 /(л сут)).

Серия 5. Данные экспериментов с водой из оз. Шотозеро

Кинетику BPK при 10 и 20°C в различные сезоны отражали уравнения E- и A-типа (рис. 6, табл. 3). Развитие I-й стадии BPK при 20°C зимой и весной описывали близкие значения параметров, в то же время летом значения параметров $[O_2]^I$ и v_1 были выше, чем осенью, что также отмечалось и при 10°C. Во всех экспериментах при 20°C обнаруживалось развитие II-й стадии процесса, при этом зимой, весной и летом кинетику BPK характеризовали близкие значения w_2 и $[O_2]^{II}$, и только для эксперимента с осенней водой значения коэффициентов отличалось.

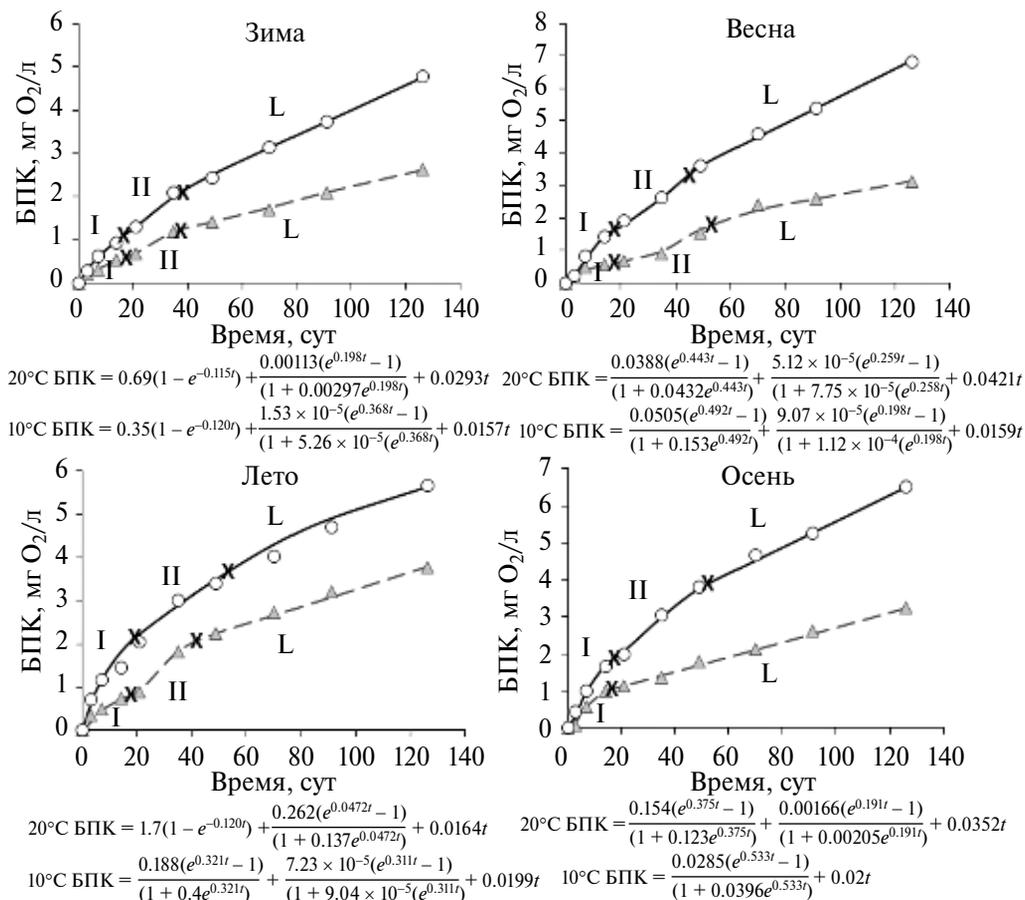


Рис. 5. Развитие BPK в экспериментах с водой из оз. Сямозеро в 2012 г.

Fig. 5. BOD-curves in the experiments with water from lake Syamozero in 2012.

Скорость ω_s на L-стадии при 20°C не фиксировалась во все сезоны, кроме осеннего, по причине полного расходования растворенного O_2 на первых двух стадиях. При 10°C повышенные близкие значения ω_s установлены зимой, весной и летом (табл. 3), а осенью оно было ниже ($0.0244 \text{ мг O}_2/(\text{л сут})$). В воде из оз. Шотозеро соотношение скоростей ω_s на L-стадии при разных температурах можно было оценить только в осенней воде: значение ω_s при 20°C в 1.9 раза выше скорости при 10°C .

Таким образом, проведенный анализ выявил сезонные отличия значений кинетических параметров BPK, связанных, очевидно, с разным поступлением в водоемы компонентов ОВ и последующей их трансформацией в сохраняемых в экспериментах пробах воды при разных температурах.

Общие особенности кинетических параметров для мезотрофных озер

Обработка данных по кинетике BPK показала ряд общих особенностей, характерных для всех исследованных мезотрофных озер Карелии. Так, в период открытой воды при 20°C общее потребление кислорода варьировало в пределах $5.68\text{--}8.10 \text{ мг O}_2/\text{л}$ (табл. 3), что было ниже, чем в эвтрофных водных объектах, исследованных

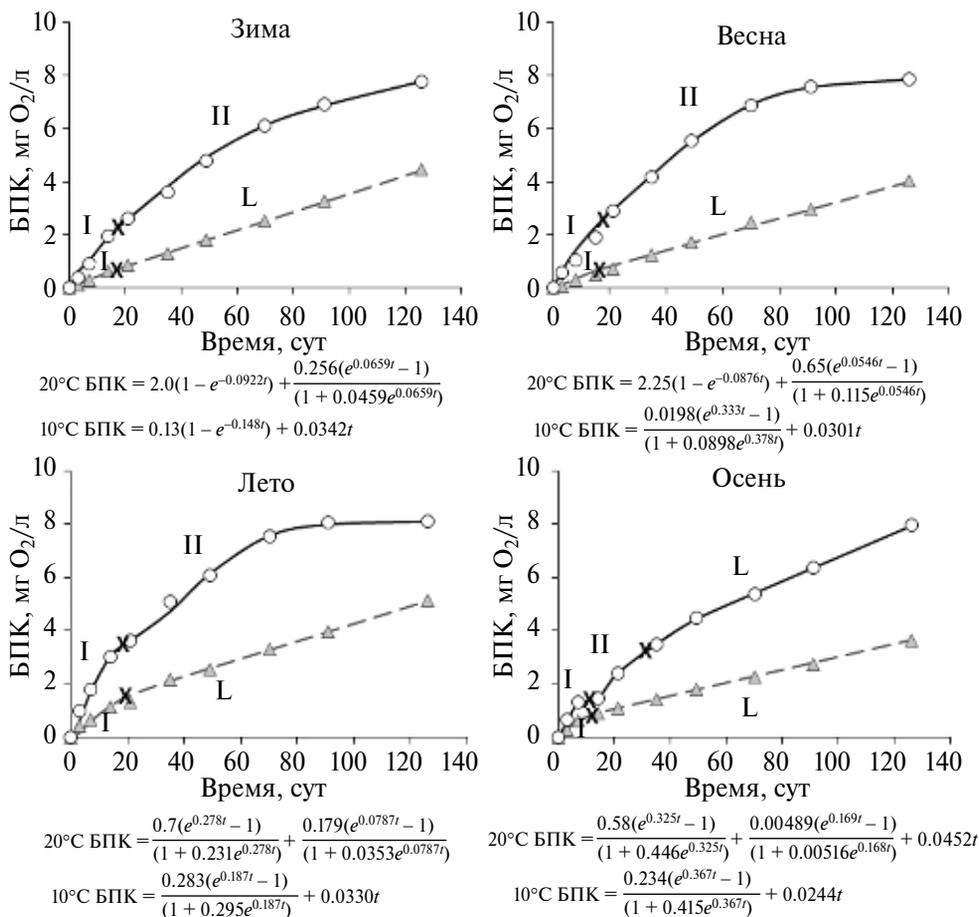


Рис. 6. Развитие БПК в экспериментах с водой из оз. Шотозеро в 2012 г.

Fig. 6. BOD-curves in the experiments with water from lake Shotozero in 2012.

ранее [14, 24], но несколько выше, чем в других мезотрофных озерах, Ладожском [22] и Мястро [23]. Последнее связано с более длительным проведением экспериментов (126 суток) по сравнению с ранее опубликованными работами (20–60 суток).

В исследованных мезотрофных озерах вклад каждой стадии в общее потребление кислорода в различные сезоны был неравномерным. Минимальное общее потребление кислорода отмечалось зимой, в остальные сезоны оно было выше и изменялось в небольших пределах (рис. 7). Наибольший вклад (более 50%) во все сезоны, кроме летнего, оказывала L-стадия, что особенно заметно зимой и связано с отсутствием продуцирования ОВ в данный период. Летом потребление кислорода на L-стадии снижалось в среднем до 33%, что связано с активным продуцированием легко-окисляемого ОВ в этот период. Вклад I-й и II-й стадий в БПК_{полн} мезотрофных озер при 20°C был ниже, чем в эвтрофных [14], только летом суммарное потребление О₂ на этих стадиях достигало 67% от БПК_{полн}, что было сопоставимо с ними.

Скорость окисления ОВ в мезотрофных озерах на L-стадии была во все сезоны в несколько раз ниже, чем на I-й (рис. 7), при этом v_1 была в несколько раз ниже,

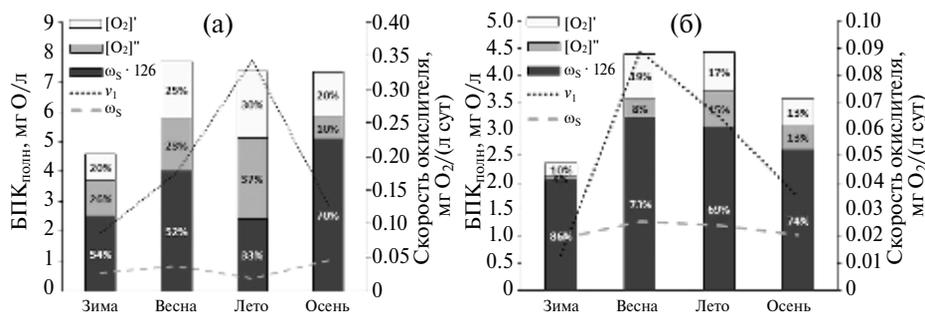


Рис. 7. Вклад каждой стадии (I-й, II-й и L) в общем потреблении кислорода, а также скорость окисления ОВ на I-й и L-стадиях в различные сезоны при 20°C (а) и 10°C (б).

Fig. 7. Contribution of each stage (I, II, and L) to total oxygen consumption and the rate of organic matter oxidation at I and L stages in different season at 20°C (a) and 10°C (б).

чем в эвтрофных водных объектах [14]. Скорость окисления ОВ на I-й стадии увеличивалась от зимы к лету в 4.0 раза и затем постепенно снижалась к осени. В то же время в экспериментах при 10°C во все сезоны превалировала L-стадия, а на остальные приходилось меньше 30% от БПК_{полн}. Таким образом, закономерности вклада каждой стадии в общее потребление O₂, а также скорости окисления ОВ на разных стадиях характеризуют особенности состава ОВ и его трансформации в разные сезоны года в мезотрофных озерах.

Соответствие показателей ОВ кинетическим параметрам БПК

Соответствие показателей ОВ и БПК было оценено для разных стадий потребления O₂ по значениям C_{орг} и БПК₁₂₆, а также показателей стадий окисления ОВ — на I-й, L-стадии и суммарно на II-й и L-стадиях (рис. 8а–е). Так, по снижению соотношения [O₂]^I/ПО, характеризующего долю лабильных компонентов ОВ в общем составе ОВ, исследуемые водоемы располагались в следующей последовательности: Валгомозеро (0.29 мг O₂/мг О) → Сямозеро (0.12) → Шотозеро (0.09) → Салонъярви и Вегарусъярви (по 0.06 мг O₂/мг О каждое). Это подтверждается по изменению содержания автохтонного ОВ (табл. 2), то есть чем оно выше, тем больше значение [O₂]^I/ПО.

Выявленные взаимосвязи отражают варианты общих сезонных соответствий значений показателей ОВ оцененному потреблению O₂ по стадиям БПК от наибольших значений, приходящихся на отдельные сезоны периода открытой воды, к характерным их снижениям зимой, отличающимся в разных мезотрофных озерах. Указанные зависимости сохраняют при небольших изменениях свой угол наклона и смещаются вдоль горизонтальной оси (по значениям показателя ОВ) со сменной для каждой зависимости своего диапазона — от максимума в ее верхней части до минимума в нижней. При этом значения потребления O₂ для каждой линии взаимосвязи меняются меньше в рамках общих диапазонов потребления O₂ (от значений в нижней части зависимости до значений в верхней ее части).

Зависимость I (рис. 8а–е) отражает тенденцию снижения значений ОВ и БПК от наибольших их значений весной в Салонъярви через промежуточные значения показателей в озерах Валгомозеро и Сямозеро к пониженным значениям зимой в Валгомозеро. Эти взаимосвязи отражают преимущественно весенний тип совместных изменений показателей ОВ и БПК. Зависимость II (рис. 8а–е) показывает снижение показателей от наибольших их значений в воде летом/осенью для

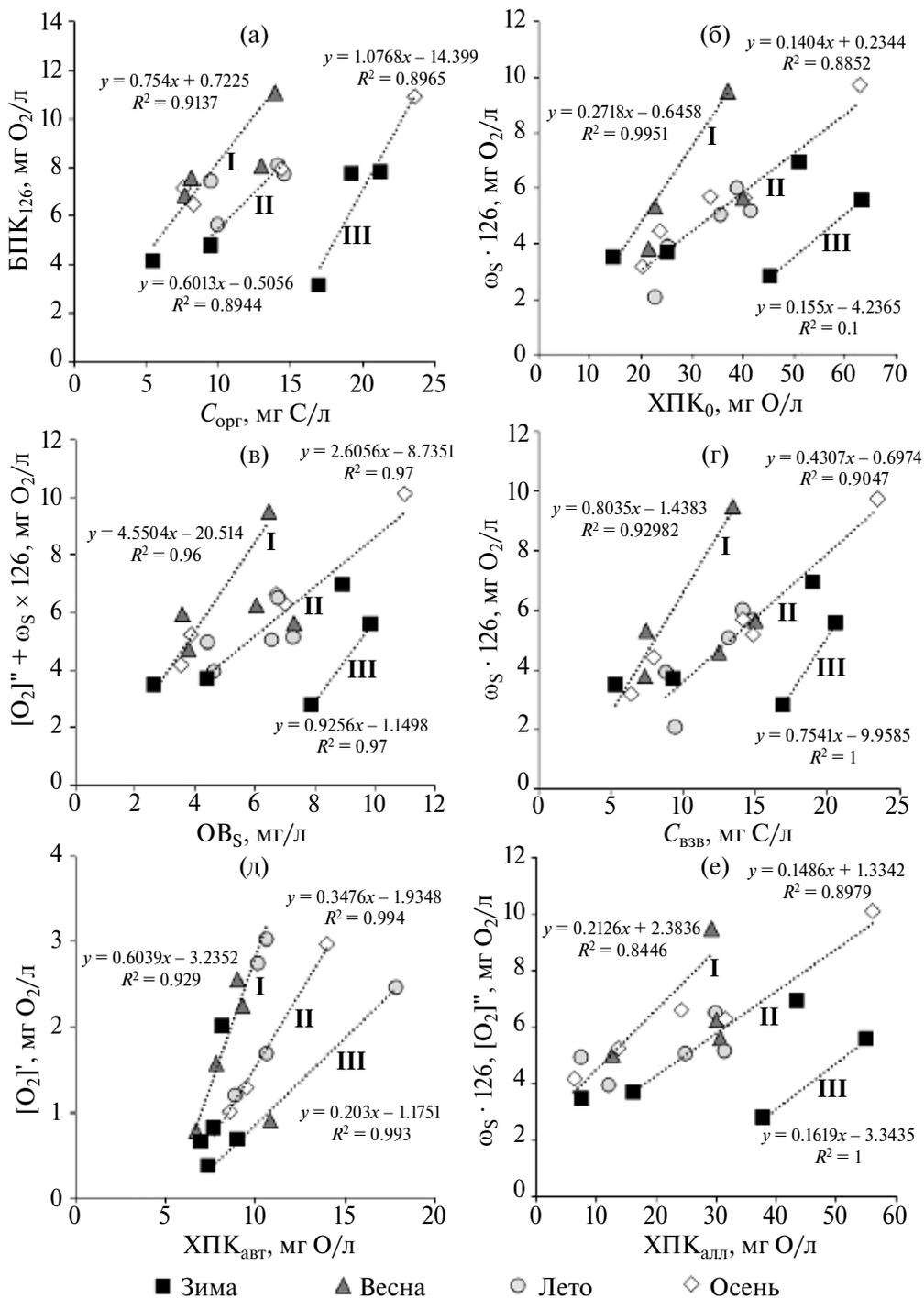


Рис. 8. Соответствие значений показателей ОБ и кинетических параметров БПК.

Fig. 8. Correspondence of organic matter concentrations and kinetic BOD parameters.

оз. Шотозеро и весной/летом для оз. Вегарусъярви через промежуточные значения для разных озер к пониженным значениям зимой в оз. Сямозеро. Зависимость II в большей степени взаимосвязана с летне-осенним типом взаимодействия компонентов ОВ и БПК. Зависимость III (рис. 8а–е) характеризует преимущественно тенденции снижения показателей в зимней воде при повышенных значениях в оз. Шотозеро и пониженных — в оз. Вегарусъярви, дополненных данными для других сезонов с большими значениями показателей ОВ и БПК (оз. Салонъярви для осени и оз. Валгомозеро для лета).

В отличие от рис. 8а–г, е, показатели $XPK_{авт}$ и $[O_2]^I$ на рис. 8д на зависимостях I–III имеют веерообразное расположение, характерное для разных показателей ОВ и БПК в водах эвтрофных озер [14]. Как и в случае эвтрофных озер, для мезотрофных выявлено расположение данных с повышенными значениями, установленных весной, летом или осенью в верхних частях взаимосвязей I–III и в средних — с меньшими значениями для тех же сезонов. Наивысшие значения показателей $XPK_{авт}$ и $[O_2]^I$ в верхней части на зависимостях I–III представлены данными для озер Шотозеро (лето) и Валгомозеро (лето, осень). Это связано с тем, что период открытой воды характеризуется активными продукционными процессами, что подтверждается довольно высокими концентрациями лабильных компонентов ОВ: углеводов — осенью [17], а липидов и белков — летом [8, 17]. Минимальные значения отмечались в нижних частях взаимосвязей I–III для данных полученных в зимний сезон для озер Валгомозеро, Салонъярви и Шотозеро. Однако в указанных водоемах в зимней воде диапазоны изменений значений $XPK_{авт}$ и $[O_2]^I$ существенно меньше (соответственно 7.0–7.7 мг О/л и 0.373–0.813 мг O_2 /л). Большие отличия в значениях показателей ОВ в верхней части зависимостей I–III в сравнении с небольшими в нижней их части придают характерное веерообразное расположение зависимостей I–III на рис. 8д по сравнению с другими.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ изменения значений кинетических параметров БПК, полученных при обработке данных длительных экспериментов с водой из мезотрофных озер Карелии (на примере озер Салонъярви, Вегарусъярви, Валгомозеро, Сямозеро и Шотозеро). Полученные данные о содержании и составе ОВ, а также об особенностях его трансформации позволили выявить общие закономерности и сезонные отличия окисления ОВ в воде исследованных водоемов.

Была проведена оценка соответствия полученных значений кинетических параметров БПК различным параметрам содержания ОВ. По окислению лабильных компонентов ОВ (соотношение $[O_2]^I/ПО$) водоемы располагались в следующей последовательности: Валгомозеро (0.29 мг O_2 /мг О) → Сямозеро (0.12) → Шотозеро (0.09) → Салонъярви и Вегарусъярви (по 0.06 мг O_2 /мг О каждое), что подтверждается тесной связью с содержанием автохтонного ОВ: чем оно выше, тем больше значение соотношения. Построены взаимосвязи значений ОВ и БПК, которые отражают спектр сезонных особенностей изменения условий окисления разных ОВ по всем исследованным водоемам с учетом как общего потребления кислорода, так и для показателей отдельных стадий.

Выявлен ряд общих особенностей, характерных для всех мезотрофных озер. Наибольший вклад в общее потребление кислорода (более 50%) во все сезоны, кроме летнего, оказывала L-стадия. Это связано с меньшей продукционной способностью такого типа озер и, как следствие, большим содержанием аллохтонного ОВ в них,

чем в эвтрофных водоемах. Скорость окисления ОВ на L-стадии во все сезоны была в несколько раз ниже, чем на I-й стадии, скорость которой увеличивалась от зимы к лету в 4.0 раза и затем постепенно снижалась к осени.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Кар. НЦ РАН, а в ИО РАН им. П.П. Ширшова в рамках темы № 0128-2021-0016 “Взаимодействие биосфер в Мировом океане”. Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Кар. НЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Ред. П. А. Лозовик, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
2. Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, Лен. отд., 1983, 150 с.
3. Верес Ю. К., Остапеня А. П. Содержание лабильного органического вещества в воде озера Нарочанского региона // Вестник БГУ. Сер. 2. 2011. № 2. с. 45–49.
4. Гидрохимия Онежского озера и его притоков. Л.: Изд-во Наука, 1973. 243 с.
5. Ефремова Т. А., Зобкова М. В. Содержание, распределение и соотношение основных компонентов органического вещества в Онежском озере // Тр. Кар. НЦ РАН. 2019. № 9. С. 60 – 75.
<https://doi.org/10.17076/lim1017>
6. Зобков М. Б., Зобкова М. В. Устройство для определения органического углерода в воде с фотохимическим персульфатным окислением в системе непрерывного газового потока и ИК-Фурье спектрометрическим детектированием // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 8. С. 10–15.
7. Зобкова М. В. Оценка автохтонной, аллохтонной и антропогенной составляющих органического вещества в поверхностных водах (на примере водных объектов Карелии): автореф. дис. ... канд. хим. наук: 1.5.15. Петрозаводск, 2024, 20 с.
8. Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Лозовик П. А., Сабьлина А. В. Органическое вещество и его компоненты в поверхностных водах гумидной зоны // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 115–120.
9. Леонов А. В. Обобщение, типизация и кинетический анализ кривых потребления кислорода по данным БПК-опытов // Океанология. 1974. Т. 16. Вып. 1. С. 82–87.
10. Леонов А. В., Зобкова М. В. Общая характеристика развития БПК в длительных экспериментах с водой из водоемов Карелии // Тр. Кар. НЦ РАН. 2019. № 3. С. 61–79.
<https://doi.org/10.17076/lim952>
11. Леонов А. В., Зобкова М. В. Значения кинетических параметров БПК длительных экспериментов (на примере анализа данных с разными интегральными пробами воды из центральной части Онежского озера) // Тр. Кар. НЦ РАН. 2020а. № 4. С. 40–61.
<https://doi.org/10.17076/lim1164>
12. Леонов А. В., Зобкова М. В. Соответствие значений параметров долгосрочной кинетики БПК концентрациям компонентов органического вещества в воде из разных акваторий Онежского озера // Тр. Кар. НЦ РАН. 2020б. № 9. С. 40–64.
<https://doi.org/10.17076/lim1287>
13. Леонов А. В., Зобкова М. В. Применение длительных БПК-экспериментов для сезонных исследований окисления компонентов органического вещества в воде из разных районов Онежского озера // Тр. Кар. НЦ РАН. 2021. № 9. С. 37–57.
<https://doi.org/10.17076/lim1369>

14. *Леонов А. В., Зобкова М. В.* Кинетические параметры БПК и их соответствие содержанию компонентов органического вещества в водах евтрофных водоемов Карелии // Известия русского географического общества, 2022. Т. 154, № 3. С. 28–46.

<https://doi.org/10.31857/S0869607122030053>

15. *Лозовик П. А.* Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. Москва, 2006. 59 с.

16. *Лозовик П. А., Мусатова М. В.* Методика разделения органического вещества природных вод адсорбцией на диэтилаламиноэтилцеллюлозе на автохтонную и аллохтонную составляющие // Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 63–68.

17. *Лозовик П. А., Мусатова М. В., Рыжаков А. В.* Автохтонное и аллохтонное органическое вещество в разнотипных озерах Карелии // Вода, химия и экология. 2014. № 4. С. 11–17.

18. *Лозовик П. А., Морозов А. К., Зобков М. Б., Духовичева, Т. А., Осипова Л. А.* Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 225–237.

19. Озера Карелии. Справочник. / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

20. *Рыжаков А. В., Зобкова М. В., Лозовик П. А.* Особенности содержания и распределения форм фосфора в водоемах гумидной зоны // Тр. Кар. НЦ РАН. 2016. № 9. С. 33–45.

21. *Скопинцев Б. А.* Органическое вещество в природных водах (водный гумус) // Тр. ГОИН. 1950. Вып. 17 (29). 200 с.

22. *Трегубова Т. М., Кулиш Т. П.* Кинетика биохимического потребления кислорода в воде озера. Антропогенное евтрофирование Ладожского озера. Л.: Наука, Лен. Отд., 1982. С. 106–116.

23. *Ostapenia A. P., Parparov A., Berman T.* Lability of organic carbon in lakes of different trophic status // Freshwater Biol. 2009. Vol. 54. P. 1312–1323.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02183>

24. *Sullivan A. B., Snyder D. V., Rounds S. A.* Controls on biochemical oxygen demand in the upper Klamath River, Oregon // Chem. Geol. 2010. Vol. 269. P. 12–21.

<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.08.007>

25. *Zhou Y., Davidson T. A., Yao X., Zhang Y., Jeppesen E., de Souza J. G., Wua H., Shi K., Qin B.* How autochthonous dissolved organic matter responds to eutrophication and climate warming: evidence from a cross-continental data analysis and experiments // Earth-Science Reviews. 2018. V. 185. pp. 928–937.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.013>

Characteristics of Kinetic Processes of Organic Matter Transformation in Mesotrophic Lakes of Karelia

A.V. Leonov^{1, *}, M.V. Zobkova^{2, *}

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

*E-mail: leonov@ocean.ru

**E-mail: rincalika21@yandex.ru

In 2012–2013, studies of the biochemical oxygen demand (BOD) kinetics and the composition of organic matter (OM) were conducted on five mesotrophic lakes of Karelia — Salonyarvi, Vegarusyarvi, Valkhomozero, Syamozero and Shotozero. BOD experiments lasting up to 126 days (at 20 and 10°C) were performed in all seasons of the year. As a result, equations and values of the kinetic parameters of the BOD were obtained,

characterizing seasonal changes in O₂ consumption for OM oxidation in two or three stages (I, II, and L-linear). As a result of the data analysis, a number of common features characteristic of all the studied mesotrophic water bodies were revealed. In all seasons, the oxidation rate of OM at stage L was significantly lower than at stage I. The contribution of each stage to the total oxygen consumption was uneven: the L-stage had the largest (more than 50%) in all seasons except summer (33%), and the I and II stages had the smallest. In summer, due to the active production of easily oxidable OM, the total consumption of O₂ at the I and II stages reached 67% of the BOD_{total}, which was comparable to eutrophic reservoirs. The OM oxidation rate at the I stage increased 4.0 times from winter to summer and then gradually decreased by autumn, and at the L-stage it was several times lower in all seasons than at the I. The obtained correlations between different indicators of organic matter and kinetic parameters of BOD in water from mesotrophic lakes reflect the spectrum of seasonal features of changes in the organic matter oxidation conditions. Decreasing of the labile organic matter oxidation was observed in the following series of lakes: Valkhomozero → Syamozero → Shotozero → → Salonyarvi and Vegarusarvi which was confirmed by correlation with concentration of autochthonous organic matter.

Key words: biochemical oxygen demand, rate of oxygen consumption, autochthonous and allochthonous organic matter, water quality, lakes of humid zone

REFERENCES

1. Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrohimicheskoy praktike / Red. P. A. Lozovik, N. A. Efremenko. SPb.: Nestor-Istoriya, 2017. 272 s.
2. *Bul'on V. V.* Pervichnaya produkcija planktona vnutrennih vodoemov. L.: Nauka Len. otd., 1983. 150 s.
3. Veres Yu. K., Ostapenya A. P. Soderzhanie labil'nogo organicheskogo veshchestva v vode ozer Narochanskogo regiona // Vestnik BGU. Ser. 2. 2011. № 2. S. 45–49.
4. Gidrohimiya Onezhskogo ozera i ego pritokov. L.: Izd-vo Nauka, 1973. 243 s.
5. *Efremova T. A., Zobkova M. V.* Soderzhanie, raspredelenie i sootnoshenie osnovnykh komponentov organicheskogo veshchestva v vode Onezhskogo ozera // Trudy KarNTs RAN. 2019. № 9. S. 60–75.
<https://doi.org/10.17076/lim1017>
6. *Zobkov M. B., Zobkova M. V.* Ustrojstvo dlya opredeleniya organicheskogo ugleroda v vode s fotohimicheskim persul'fatnym okisleniem v sisteme nepreryvnogo gazovogo potoka i IK-Fur'e spektrometricheskim detektirovaniem // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov 2015. №. 8. S. 10–15.
7. *Zobkova M. V.* Ocenka avtohtonnoj, allohtonnoj i antropogennoj sostavyayushchih organicheskogo veshchestva v poverhnostnyh vodah (na primere vodnyh ob»ektov Karelii): avtoref. dis. ... kand. him. nauk: 1.5.15. Petrozavodsk, 2024, 20 s.
8. *Zobkova M. V., Efremova T. A., Lozovik P. A., Sabylina A. V.* Organicheskoe veshchestvo i ego komponenty v poverhnostnyh vodah gumidnoj zony // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2015. № 12. S. 115–120.
9. *Leonov A. V.* Obobshchenie, tipizatsiya i kineticheskii analiz krivykh potrebleniya kisloroda po dannym BPK-opytov // Okeanologiya. 1974. Vol. 14. Vyp. 1. S. 82–87.
10. *Leonov A. V., Zobkova M. V.* Obshchaya harakteristika razvitiya BPK v dlitel'nyh eksperimentah s vodoy iz vodoemov Karelii // Tr. Kar. NC RAN. 2019. № 3. S. 61–79.
<https://doi.org/10.17076/lim952>

11. *Leonov A. V., Zobkova M. V.* Znacheniya kineticheskikh parametrov BPK dlitel'nykh eksperimentov (na primere analiza dannykh s raznymi integral'nymi probami vody iz Onezhskogo ozera) // Trudy KarNTs RAN. 2020a. № 4. S. 40–61.
<https://doi.org/10.17076/lim1164>
12. *Leonov A. V., Zobkova M. V.* Sootvetstvie znachenij parametrov dolgosrochnoj kinetiki BPK koncentraciyam komponentov organicheskogo veshchestva v vode iz raznykh akvatorij Onezhskogo ozera // Trudy KarNTs RAN. 2020b. № 9. S. 40–64.
<https://doi.org/10.17076/lim1287>
13. *Leonov A. V., Zobkova M. V.* Primenenie dlitel'nykh BPK-eksperimentov dlya sezonnykh issledovaniy okisleniya komponentov organicheskogo veshchestva v vode iz raznykh rajonov Onezhskogo ozera // Tr. Kar. NC RAN. № 9. 2021. S. 37–57.
<https://doi.org/10.17076/lim1369>
14. *Leonov A. V., Zobkova M. V.* Kineticheskie parametry BPK i ih sootvetstvie sodержaniyu komponentov organicheskogo veshchestva v vodah evtrofnnykh vodoemov Karelii // Izvestiya russkogo geograficheskogo obshchestva, 2022. T. 154, № 3. S. 28–46.
<https://doi.org/10.31857/S0869607122030053>
15. *Lozovik P. A.* Gidrogeohimicheskie kriterii sostoyaniya poverhnostnykh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdeystviyu: Avtoref. dis. ... dokt. him. nauk. Moskva, 2006. 59 s.
16. *Lozovik P. A., Musatova M. V.* Metodika razdeleniya organicheskogo veshchestva prirodnykh vod adsorbciy na diehtilaminoehtilcelluloze na avtohtonnyuyu i allohtonnyuyu sostavlyayushchie // Vestnik MGOU. Seriya Estestvennye nauki. 2013. no. 3. S. 63–68.
17. *Lozovik P. A., Musatova M. V., Ryzhakov A. V.* Avtohtonnoe i allohtonnoe organicheskoe veshchestva v raznotipnykh ozerah Karelii // Voda, himiya i ekologiya. 2014. № 4. S. 11–17.
18. *Lozovik P. A., Morozov A. K., Zobkov M. B., Duhovicheva, T. A., Osipova L. A.* Allohtonnoe i avtohtonnoe organicheskoe veshchestvo v poverhnostnykh vodah Karelii // Vodnye resursy. 2007. T.34, № 2. S. 225–237.
19. Ozera Karelii. Spravochnik. / Pod red. N. N. Filatova, V. I. Kuhareva. — Petrozavodsk: KarNC RAN, 2013. 464 s.
20. *Ryzhakov A. V., Zobkova M. V., Lozovik P. A.* Osobennosti sodержaniya i raspredeleniya form fosfora v vodoemah gumidnoj zony // Trudy KarNC RAN. — 2016. — № 9 — S. 33–45.
21. *Skopinets B. A.* Organicheskoe veshchestvo v prirodnykh vodah (vodnyj gumus) // Tr. GOIN. 1950. Vyp. 17 (29). 200 s.
22. *Tregubova T. M., Kulish T. P.* Kinetika biohimicheskogo potrebleniya kisloroda v vode ozera. Antropogennoe evtrofirovanie Ladozhskogo ozera. L.: Nauka, Len. Otd, 1982. S. 106–116.
23. *Ostapenia A. P., Parparov A., Berman T.* Lability of organic carbon in lakes of different trophic status // Freshwater Biol. 2009. Vol. 54. P. 1312–1323.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02183>
24. *Sullivan A. B., Snyder D. V., Rounds S. A.* Controls on biochemical oxygen demand in the upper Klamath River, Oregon // Chem. Geol. 2010. Vol. 269. P. 12–21.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.08.007>
25. *Zhou Y., Davidson T. A., Yao X., Zhang Y., Jeppesen E., de Souza J. G., Wua H., Shi K., Qin B.* How autochthonous dissolved organic matter responds to eutrophication and climate warming: evidence from a cross-continental data analysis and experiments // Earth-Science Reviews. 2018. V. 185. pp. 928–937.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.013>

УДК 911.3:32

“ПОЛИТИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ” ВИНСГЕЙМА — ОТПРАВНАЯ ТОЧКА В РАЗВИТИИ РОССИЙСКОЙ И МИРОВОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ГЕОГРАФИИ И СТРАНОВЕДЕНИЯ

© 2025 г. И. Ю. Окунев*

Московский государственный институт международных отношений (университет) МИД России, Москва

*E-mail: iokunev@mgimo.ru

Поступила в редакцию 22.09.2024 г.

После доработки 22.12.2024 г.

Принята к публикации 10.03.2025 г.

“Краткая политическая география” Христиана Николая фон Винсгейма — первая в мире книга, названная именно политической географией. Она была выпущена по решению Правительствующего Сената двумя изданиями на русском и немецком языках в Санкт-Петербурге в типографии Императорской Академии наук в 1745 г. в качестве приложения к учебному атласу географии мира, вышедшему там же в 1737 г. Удивительный факт состоит в том, что книга на немецком на 154 страницы длиннее русской и содержит большой и представляющий значительный интерес раздел, посвященный географии России. Упущенный в русской версии фрагмент является изданием труда Винсгейма 1739 г. “О Российской империи”. Факт хорошего знакомства основоположника политической географии Бюшинга с книгой Винсгейма подтверждается тем, что немецкоязычный экземпляр “Краткой политической географии” хранился в личной библиотеке Бюшинга, и благодаря тому, что эта библиотека была выкуплена Екатериной II для Эрмитажа, а затем передана в Императорскую публичную библиотеку, мы можем ознакомиться с этим экземпляром и пометками Бюшинга к Винсгейму. Таким образом, книга Винсгейма — не только первая с названием “политическая география”, но и ключевое звено в развитии дисциплины, центровую ось начального периода развития которой можно обозначить как Гюбнер — Винсгейм — Бюшинг — Ратцель. Ее восстановление дает нам шанс переосмыслить и возраст, и положение этой науки в системе знаний, у истоков которой в России, вместе с Винсгеймом, стояли Эйлер, Делиль, Крафт, Татищев, Бюшинг и многие другие выдающиеся ученые. Благодаря повторному открытию Винсгейма можно утверждать, что политическая география — это одна из старейших гуманитарных наук, с которой во многом началась история систематических знаний в области географии, политологии и международных отношений.

Ключевые слова: политическая география, историческая география, страноведение, Винсгейм, Крафт, Бюшинг, Татищев, Гюбнер, история географии, XVIII век

DOI: 10.31857/S0869607125010082, EDN: LHMGM

Нельзя изучить географию, не зная ее истории.

Ф. Ратцель

В науке не существует консенсуса по поводу того, когда появилась дисциплина политическая география и первые книги по ней. В литературе присутствуют разные точки зрения по поводу автора это термина: Маккиндер, Челлен, Ратцель, Бюшинг, Кант, Тюрго и др. Цель данного исследования — доказать, что первой в мире в этом вопро-

се была Петербургская научная школа по политической географии XVIII в. во главе с Х. Н. фон Винсгеймом. В ее работе закрепилось использование термина "политическая география" для описания стран мира и был написан первый учебник с соответствующим названием. К таким выводам автор приходит с помощью методов сравнительно-исторического, биографического, библиографического и источниковедческого анализа, проведенного на основе обширного числа редких источников из библиотек и архивов России, некоторые из которых вводятся в научный оборот впервые.

“Краткая политическая география” Христиана Николая фон Винсгейма — первая в мире книга, названная именно политической географией. Она была выпущена по решению Правительствующего Сената двумя изданиями на русском и немецком языках в Санкт-Петербурге в типографии Императорской Академии наук в 1745 г. [7, 42] в качестве приложения к учебному атласу географии мира, вышедшему там же в 1737 г. [3].

Это открытие сделал в середине 1990-х гг. доцент Николай Владимирович Каледин, основатель (в 2002 г.) и первый заведующий кафедрой региональной политики и политической географии Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета [14, с. 24, 12 15, 16]. Поскольку СПбГУ ведет свою историю от Академического университета, который в XVIII в. был образовательным учреждением в составе Императорской Академии наук, можно сказать, что именно этот первый российский университет, наряду с Российской академией наук, является местом рождения учебника Х. Н. фон Винсгейма [24, с. 26–27].

Христиан Николай фон Винсгейм (рис. 1) (1694–1751) (Christian Nicolaus von (de) Winsheim, иногда Христиан Никола де Винсгейм) — дворянин, лютеранин, родился 16 апреля 1694 г. в городе Анклам. В 1718 г. уехал в Россию и занимался частной



Рис. 1. Х. Н. фон Винсгейм (предположительно). Фрагмент картины Г. А. Румянцевой “М. В. Ломоносов на заседании Конференции Академии наук”. МАЭ РАН.

Fig. 1. Ch. N. von Winsheim (presumably). A fragment of G. A. Rumyantseva’s painting “M. V. Lomonosov at a meeting of the Academy of Sciences Conference”, Kunstkamera.

преподавательской деятельностью в Санкт-Петербурге. С 1 мая 1731 г. — адъюнкт (с 20 января 1735 г. — экстраординарный профессор) по астрономии, действительный член (академик) Петербургской (Императорской) Академии наук (ИАН, сейчас — Российская академия наук). С 20 июля 1742 по 2 июля 1746 г. и с 1 марта 1749 по 4 марта 1751 г. — конференц-секретарь (главный ученый секретарь) ИАН, руководитель Конференц-архива ИАН (сейчас — Архив РАН). С 1742 г. по 4 марта 1751 г. — директор (после ухода с этого поста Л. Эйлера) Географического департамента ИАН (до 1744 г. — совместно с И. Г. Гейнзиусом). В 1747–1751 гг. — руководитель Академической обсерватории ИАН. Основные труды ученого относятся к географии и астрономии. Скончался после непродолжительной болезни в 56 лет 4 марта 1751 г. в Санкт-Петербурге.

Единственная расширенная библиография Х. Н. фон Винсгейма написана Петром Петровичем Пекарским в 1870 г. при подготовке "Истории Императорской Академии наук в Петербурге" [22, с. 474–479] и основывается на дневниковых записях¹ и автобиографии² самого Винсгейма 1737 г. Отдельные биографические сведения установлены по базе данных "Иностранцы в дореволюционной России" (Эрик Амбургер, Институт исследования Восточной и Юго-Восточной Европы имени Лейбница [41]) и другим источникам.

Императорская Академия наук и, в частности, ее географический департамент, размещавшийся в башне Кунсткамеры, рядом с астрономической обсерваторией, руководство которой перешло Винсгейму от Эйлера, был центром географической и картографической науки в России в XVIII в. [9, 31]. Изначальной задачей департамента, осуществленной только в 1745 г., стало издание первого атласа России [2, 25]. Этот же атлас был выпущен отдельными изданиями на немецком языке, и двоянный — на латыни и французском. Однако до этого в 1737 г. был выпущен "Атлас сочиненный к пользе и употреблению юношества и всех читателей Ведомостей и исторических книг", явившийся первым русским атласом мира, приложением к которому и стала "Краткая политическая география". Он печатался с изготовленных в 1737 г. досок по запросам Академической книжной лавки в течение нескольких десятилетий и, по мнению Эйлера, был передовым картографическим произведением своего времени. Винсгейм отдельно выпустил короткий проспект готовящегося российского атласа, содержащий историю его создания, перечень подготовленных для него восьми специальных карт, правила транслитерации русских слов латинскими буквами, толковый словарь географических терминов и таблицу условных картографических знаков.

Книга де Винсгейма была издана анонимно, что не столько отражает позицию ученого, сколько традицию не указывать автора в учебных и справочных изданиях того времени. На анонимность немецкого издания книги указывается даже в комментарии 1955 г. к "Проекту регламента Академической гимназии 1758 г." М. В. Ломоносова, в котором ученый рекомендует учебник для гимназистов: "В классе первых оснований нужнейших наук, в частности, во 2-м и 3-м классе, следует... объяснять географию на глобусе и в атласе по изготовленному для этой цели описанию...". Комментатор указывает, что под "описанием" М. В. Ломоносов подразумевает, возможно, анонимную "Kurtzgefaste politische Geographie zur Erläuterung eines kleinen,

¹ СПФ АРАН, ф. Р-1, оп. 27, д. 86.

² СПФ АРАН, ф. Р-1, оп. 27, д. 86.

in Russischer Sprache publicirten Atlantis entworfen bey der Kayserl. Academie der Wissenschaften”, 1745 (“Краткая политическая география для пояснения малого, изданного на русском языке Атласа, составленного при Имп. Академии наук”, 1745) [21, с. 495]. В то же время в каталожной карточке РГБ содержится уточнение, что автор установлен по изданию “Опыт российской библиографии” В.С. Сопикова еще 1814 г. [27]. В сводном каталоге русской книги гражданской печати XVIII в. также указано, что “в 1749 г. к подготовке второго, исправленного и дополненного издания книги Винсгейма были привлечены М. В. Ломоносов, Г. Ф. Миллер и И. Э. Фишер, однако издание это не было осуществлено” [26, с. 163].

Краткая политическая география состоит из приуроченного, раздела “Политическая география”, индекса (реестра) и 20 глав: о Европе, Португалии, Испании, Франции, Британских островах, Италии, Швейцарии, Германии, Нидерландах, Скандинавии, Польше и Литве, Венгрии и Балканах, Азии, Турции, Персии, Индии, Китае, островных государствах Азии, Африке, Америке.

Интересно, что ключевой раздел “Политическая география”, открывающий книгу Винсгейма, назван в немецкой версии почему-то просто “Abhandlung” (“Трактат”). Но, пожалуй, самый удивительный факт состоит в том, что книга Винсгейма на немецком на 154 страницы (с 292 по 446) длиннее русской и содержит большой и представляющий значительный интерес раздел, посвященный географии России. Русская версия содержит только такое указание на последней странице: “Описание об России особливою главою сообщено будет”. Упущенный в русской версии фрагмент является дополненным и исправленным изданием невышедшего отдельного труда Винсгейма 1739 г. “О Российской империи”, рукопись которого хранится в Русской секции Научно-исследовательского архива Санкт-Петербургского института истории РАН³. Текст этот был в 1744 г. представлен в правительствующий Сенат и получил там замечания, а позднее, в 1745 г., на него написал отрицательный отзыв Ф. И. Миллер, и от намерения его напечатать пришлось отказаться [29, с. 19]. По всей видимости, текст Винсгейма представляет собой первое по времени академическое описание географии Российской империи (если не считать таковым скорее справочник “Цветущее состояние всероссийского государства” 1727 г. И. К. Кириллова и некоторые другие неизданные рукописи — “*Conspectus Geographiae Imperii Russici*” и “*Eine kürzte geographische Beschreibung der ganzen Russischen Reiches aus Stralenberg. Veränderten Russland, Hübner, Olearius und andere excexpiert und zum Gebrauch der Geograph. Jugend in diese Ordnung gebracht von einem Liebhaber der Geographie. 1735*”).

Печатание в немецком издании книги описания России, случившееся без согласия Правительствующего Сената и Конференции Академии имели большие негативные последствия для книги. 15 января 1746 г. на нее поступает донос⁴, указывающий, что издание с ошибками в главе про Россию было напечатано в обход решения академиков. Текст, подписанный И. А. Делилем, И. Г. Гмелиным, П. А. Леруа, В. К. Тредиаковским, И. Вейтбрехтом, Г. Ф. Миллером, Г. В. Рихманом и М. В. Ломоносовым, требует изъять книгу из продажи, что по всей видимости и было сделано и привело к тому, что книга осталась неизвестна зарубежному читателю. Ровно через год, 15 января 1747 г., Винсгейм подготовил ответ на замечания и отправил предло-

³ РС НИА СПб ИИ РАН, кол. 115, оп. 1, д. 411.

⁴ СПФ АРАН, ф. 20, оп. 3, д. 121.

жения 98 уточнений президенту Академии наук К. Г. Разумовскому, но переиздать книгу уже не получилось.

Согласно данным РНБ и WorldCat и другим источникам, известно не менее восемнадцати русскоязычных (РНБ, РГБ (3), Библиотека Конгресса, РГИБ (2), БАН, Кунсткамера, библиотеки Санкт-Петербургского, Казанского и Саратовского университетов, Смоленская, Кировская, Нижегородская и Новосибирская областные библиотеки, музеи “Царское село” и “Ростовский Кремль”) и шести немецкоязычных (РНБ (2), РГБ, Ростокский и Тюбингенский университеты, Региональная библиотека Ойтена) экземпляров книги в библиотеках мира. Экземпляры РНБ и Смоленской областной библиотеки включены в Реестр книжных памятников России. Два русскоязычных экземпляра (из собраний Российской национальной библиотеки и Российской государственной исторической библиотеки) были оцифрованы⁵, немецкоязычный экземпляр оцифрован в альма-матер Винсгейма — Ростокском университете⁶. Исследователь Л. Бордан установил также, что существовал, но был впоследствии утерян рукописный перевод книги Винсгейма на румынский язык [32].

Сохранилась немецкая рукопись⁷, рукопись русского перевода⁸ (ошибочно атрибутированная за авторством Г. В. Крафт) и корректурный экземпляр немецкого издания книги, который был отреставрирован в 1983 г.⁹ К сожалению, книга Винсгейма была упущена при подготовке географом Леонидом Павловичем Весиним очень скрупулезного исторического обзора учебников общей и русской географии, изданных со времени Петра I по 1876 г. [13], в котором должна была бы занять почетное шестое место по старшинству.

Винсгейм не является автором термина “политическая география”, он в качестве синонима исторической географии, по всей видимости, входит в мировую науку еще в конце XVII века и к моменту издания книги Винсгейма уже активно использовался в российской академической среде. Сам Винсгейм приводит более точное и узкое определение дисциплины во вводном параграфе “Политическая география” своей книги, говоря, что она дает “общее понятие о разного рода правительствах и государствах на свете” [7, с. 5]. Правда, тут же он уточняет, что “подлинное различие силы, высочества и прочих преимуществ владеющих особ до географии не надлежит, но из политических правил усмотрено быть должно” [7, с. 6], что может быть интерпретировано сегодня, как необходимость различения предмета политической географии и политологии. Винсгейм вводит и другие ключевые для политической географии определения, например, вполне удачно союзное государство [федерация] — где “каждая провинция сохраняет особую роль своего правительства, и с прочими [взаимодействует] только в том, что до общего интереса надлежит” [7, с. 5].

Первым использованием собственно термина “политическая география” в российских изданиях, по-видимому, можно считать учебник академика Императорской Академии наук и коллеги Винсгейма Георга Вольфганга Крафта (1701–1754) “Крат-

⁵ Оцифрованная копия: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_A1_3656/ (РНБ), https://rusneb.ru/catalog/000207_000017_RU_RGDB_BIBL_0000353531/ (РГИБ).

⁶ Оцифрованная копия: <https://purl.uni-rostock.de/rosdok/ppn829370757> (Ростокский университет).

⁷ СПФ АРАН, ф. Р-I, оп. 28, д. 1.

⁸ СПФ АРАН, ф. Р-II, оп. 1, д. 169.

⁹ СПФ АРАН, ф. Р-I, оп. 22, д. 12.

кое руководство к математической и натуральной географии", изданный в Императорской Академии наук на немецком в 1738-м [36], и на русском в 1739 г. [19]. Немецкое издание было также переиздано в 1764 г. Крафт определяет предмет "политической или исторической географии" в качестве "разных стран и земель, которые на различные государства, области и города разделяются и владениям великих Потентатов (властелинов) подвержены" [19, с. 2]. Однако далее он указывает, что этот предмет ближе истории и не уделяет ему больше внимания в учебнике. Н. В. Каледин указывает, что именно по этому учебнику начинал преподавать географию М. В. Ломоносов, с большим уважением относившийся в Крафту [14, с. 25]. Можно предположить, что "Политическая география" Винсгейма, как бы дополняет Крафта, в которой описаны только два из трех направлений географии того времени: математическая и натуральная.

Почти одновременно с Крафтом термин "политическая география" начал употреблять в рукописях выдающийся русский историк и географ Василий Никитич Татищев (1686–1750). Он был знаком с книгой Крафта, написал на нее рецензию и оставил на ней пометку: "На память к пополнению и поправлению географии, печатанной в 1739 г." [29, с. 18]. В том же 1739 г. Им была закончена в какой-то мере 43-я глава первой части первой версии "Истории Российской" — "О географии вообще и о русской" [29 с. 19]. В ней он так определяет предмет политической географии: "описание селения великие и малые, яко грады, пристани и пр., правительства гражданские и духовные, способности, прилежности и искусства, в чем либо того предела обыватели упражняются и преимуществуют, яко же их нравы и состояния и как сии обстоятельства по временам пременяются" [29, с. 211]. Во втором томе фактически первой российской энциклопедии (к сожалению, незаконченной, доведенной только до буквы "К") — "Лексиконе" Татищева (представлена в Академии наук в том же 1739-м [29, с. 18] или, по другим сведениям, в 1745 г., издана в Горном училище после смерти автора только в 1793 году), политическая география определяется как "описывающее пределы и положения, имя, границы, народы, переселения, строения, или селения, правление, силу, довольство и недостатки" направление географии [29, с. 39].

Татищев и Винсгейм были знакомы, на что указывают, по меньшей мере, пометки первого, сохранившиеся на неизданной рукописи Винсгейма "О Российской империи" 1739 г. Более того, Татищев хвалит книгу Винсгейма в своей знаменитой "Истории Российской": "Изрядное введение в географию и ландкарты всего Российского государства на 20 больших листах сочинила [Академия наук], и хотя оные, яко первое издание, многих поправок требует, однакож доднесь между всеми знатными суть безспорно лучшие" [29, с. 217]. А Винсгейм с почтением упоминает о тайном советнике, русском ученом, написавшем прекрасный неизданный труд о Сибири в своей книге [42, с. 300].

Н. В. Каледин обращает внимание на первенство (по меньшей мере, в русскоязычной традиции) в использовании термина "политическая география" Крафтом [14, с. 25], а Р. Ф. Туровский — Татищевым [30, с. 6], хотя они оба написали свои тексты на русском в 1739 г. (но справедливости ради, Крафт опубликовал его и на немецком тоже годом ранее). Но все же у самой идеи выделения в географическом знании "политического" компонента даже в России более древняя история. Автор этой идеи и основополагающего труда, заложившего традицию политической географии — немецкий географ Иоганн Гюбнер (1668–1731). Подробное описание истории перевода и издания его классической книги 1693 г. по политической гео-

графии “Kurtze Fragen aus der alten und neuen Geographie” (“Краткие вопросы по старой и новой географии”) [11] на русский язык в 1719 г. сделал историк географии А. И. Андреев [1, с. 3–4]. Он же подчеркивает, что книга Гюбнера — “первая большая политическая география, появившаяся у нас”. В то же время Гюбнер не использует именно термин “политическая география”, он пишет о том, что Земной круг состоит из математического, натурального и политического разделений. Последнее “Потен-таты на свете учинили” [11, с. 3] — прямо, как у Крафта. И далее расшифровывает, что “Всем светом никогда один не владел, но многие области в нем разделились, того ради имеем ныне цесарства [империи], царства, королевства... [и т.д.]. И в этом политическом разделении обычно границы subtilны, и едва меж собой несвязанными точками означены, которые потом красками расцветены бывають...” [11, с. 6]. Книга Гюбнера издавалась 36 раз общим тиражом более 100 000 экземпляров, была переведена на большинство европейских языков и заложила традиции географического страноведческого описания. В России она была переведена и издана силами Я. В. Брюса по повелению императора Петра I, который ставил целью обеспечить русскую науку лучшими учебниками по географии в Европе. Книга Гюбнера стала третьим переведенным учебником по географии в России после книг по общей (преимущественно физической или математической, т.е. астрономической) географии 1710 г. (автор не установлен) и 1718 г. (автор — Б. Варена, также Варениус, Варений) [13, с. 1–16]. 13-я глава книги Гюбнера о России была заменена на текст неизвестного автора, что, несомненно, не могло не повлиять на желание Винсгейма написать свою версию этого раздела. Именно членение Гюбнером поверхности Земли на математическое, натуральное и политическое разделение повлияло на то, что почти параллельно Крафт, Татищев и Винсгейм стали делить географию на математическую, натуральную (физическую) и политическую (историческую).

Книга Гюбнера стала третьим переведенным напечатанным учебником по географии в России после книг по общей (в т.ч. политической) географии И. ван Келена 1710 г. и преимущественно физической и математической, т.е. астрономической, географии 1718 г. (автор — Б. Варена, также Варениус, Варений) [13, 1876, с. 1–16]. Таким образом первым печатной книгой по политической географии, появившейся на русском языке является книга “География, или Краткое земнаго круга описание”, вышедшая в 1710 г. и переиздававшаяся в 1715 и 1716 гг. Долгое время происхождение этого текста было неизвестным, но сегодня исследователи Германского исторического института в Москве и Центра истории России Нового времени НИУ ВШЭ установили, что это перевод с нидерландского, по-видимому, также вдохновленного Гюбнером, текста голландского картографа Иоганна ван Келена, сопровождавшего его атлас “De Groote Nieuwe Vermeerderde Zee-Atlas” (“Большой новый увеличенный морской атлас”) 1697 г.

До нас дошла и рукопись учебника по географии из личной библиотеки Петра I¹⁰, содержащая большой раздел по политико-географическому страноведению: перевод с французского изданной в Амстердаме в 1715 г. книги Николаса Шемеро “География практическая”. Французский оригинал книги, с которого, видимо, был сделан перевод, хранился в личной библиотеке царевича Алексея Петровича, был подготовлен в изданию, но так и не вышел в свет.

¹⁰ НИОР БАН. П. I. Б. 66 (17.15.15).

Первой именно российской книгой по политической географии (без использования этого термина) стал труд петербургского академика Жозефа-Никола Делиля (1688–1768) — предшественника Эйлера и Винсгейма на посту руководителя Географического департамента. В 1727 г. он издал (и переиздал в 1728 г.) на французском языке в Типографии Академии наук вторую часть, посвященную астрономии и географии, “Сокращения математического ко употреблению его величества императора всея России”. В 1728 г. вышел перевод книги на русский, выполненный И. С. Горлицким. География Делиля почти вся посвящена политико-страноведческому описанию, что объясняется тем, что писалась она, в первую очередь, для подраставшего императора Петра II.

Нельзя не упомянуть, что в той же типографии Императорской Академии наук за три года до книги Винсгейма, в 1742 г., одновременно на русском и немецком вышел еще один учебник фактически по политической географии: “Краткое руководство к географии. В пользу учащагося при гимназии юношества в Санктпетербурге” [20, 37]. Причем в библиотеках сохранились два разных издания, датированных 1742 г., но отличающихся набором и орфографией, но позднее было установлено, что второе — перепечатка 1752 г. Фактически это сокращенный и адаптированный пересказ книги Гюбнера, и хотя автор книги до сих пор не установлен, можно полагать, что это было второе непереводное учебное издание по политической географии в России. Есть вероятность того, что автор этой книги — тоже Винсгейм или Крафт, потому что они также издавали свои книги параллельно на немецком и русском языках в этой же типографии примерно в эти же годы: в 1738 и 1745 гг. Тем не менее книги 1727 (Делиля) и 1742 гг. представляют собой очень краткие описания по политической географии и по своей широте никак не могут сравниться с учебником Винсгейма 1745 г. Библиограф РГБ В. Ж. Нургалиев выдвигает гипотезу о том, что автором этой книги мог быть либо Крафт, либо Винсгейм. Надо признать, что все же больше оснований считать, что этот текст — Крафта, уехавшего из России за год до издания книги Винсгейма.

Несмотря на эпизодически встречавшиеся использования термина “политическая география” и до этого, например, Н. Сансоном в 1665 г. [40], по всей видимости, именно книга Гюбнера стала источником выделения политической географии и во многих других национальных академических традициях [34]. В Англии в 1722 г. Выходит справочник “Historico-Political Geography” (“Историко-политическая география”) Р. Пашуда [38]. Во Франции студент Сорбонны и будущий известный философ и экономист Анн Робер Жак Тюрго в 1751 г. пишет эссе с планом (в итоге неосуществленном) о книге по политической географии [35], в котором предлагает разделить теоретическую и историческую политическую географию. В Пруссии И. Кант в 1757 г. также выделяет страноведческую политическую географию на своих лекциях, правда, указывает, что “она полностью основана на физической географии” [17].

Н. В. Каледин пишет, что общепризнанный основатель современной политической географии Фридрих Ратцель в 1902 г. в книге “Земля и жизнь. Сравнительное землеведение” отмечает, что “многотомное сочинение Бюшинга “Новое описание земли” с 1754 г., даже и вне пределов Германии, господствовало над всеми политическими географиями” [23, с. 47]. Однако, как обращает внимание Николай Владимирович, есть все основания считать, что на становление научного подхода Антона Фридриха Бюшинга (1724–1793) могла повлиять более ранняя книга Х. Н. фон Винсгейма 1745 г. Таким образом, можно было бы считать, что книга

Винсгейма не только первая с названием “политическая география”, но и является ключевым звеном в развитии дисциплины, центровую ось начального периода развития которой можно обозначить как Губнер — Винсгейм — Бюшинг — Ратцель. Молодой Бюшинг действительно прожил в Санкт-Петербурге около полугода в 1749 г., работал здесь гувернером сына датского посла, проповедовал в евангелических приходах, имел широкие знакомства среди немецкой диаспоры и, возможно, был знаком с самим Винсгеймом. В 1761—1765 гг. он вновь работал в Петербурге: уже пастором лютеранской церкви Св. Петра и Павла (Петрикирхе) и директором немецкой школы (Петришуле) при ней [4]. Уже в 1763 и 1766 гг. вышли первые переводы на русский язык книг по географии и страноведению Бюшинга [5, 6].

Факт хорошего знакомства Бюшинга с книгой Винсгейма подтверждается тем, что немецкоязычный экземпляр “Краткой политической географии” Винсгейма хранился в личной библиотеке Бюшинга, и благодаря тому, что эта библиотека была выкуплена Екатериной II для Эрмитажа, а затем передана в Императорскую публичную библиотеку (ныне РНБ), мы можем ознакомиться с этим экземпляром и записями в ней рукой Бюшинга на с. 306, 345, 347, 407, 408 (рис. 2) [18]. Более того, Бюшинг упоминает книгу Винсгейма в одном из своих трудов, правда, не очень лестно: “Хотя в 1745 в Санкт-Петербурге вышла Краткая политическая география, в которой представлено достаточно широкое описание Российского Государства, оно столь ошибочно и неадекватно, что даже удивительно” [33, с. 11].

Книги Губнера, Винсгейма и Бюшинга оказали большое влияние на издание следующего русского учебника по политической географии: очень основательной “Политической географии” Ивана Михайловича Греча и Сергея Федоровича Наконвальнина, изданной для преподавания в Сухопутном шляхетном кадетском корпу-

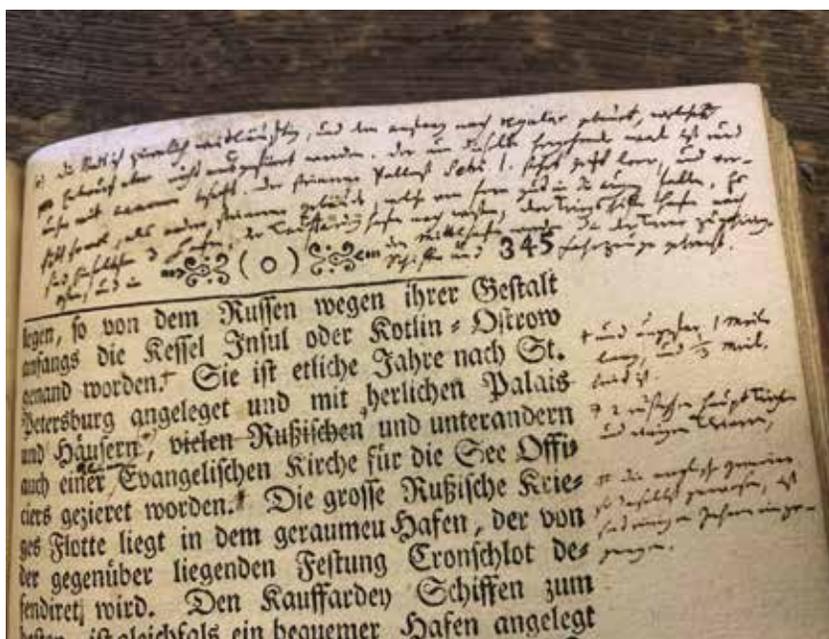


Рис. 2. Пометки А. Ф. Бюшинга в книге Х. Н. фон Винсгейма, РНБ.

Fig. 2. Notes by A. F. Bushing in the book by Ch. N. von Wiensheim, National Library of Russia.

се [10]. Труд, к сожалению, остался незаконченным, было издано четыре первых тома в 1758–1772 гг. Также страноведческую традицию Винсгейма продолжила книга его ученика Ивана Ивановича Стафенгагена по исторической географии, вышедшая в Академии наук в 1753 г. [Стафенгаген, 1753].

По итогам нашего небольшого историографического экскурса можно сформулировать следующие открытые вопросы: 1) является ли Х. Н. фон Винсгейм автором анонимной книги по политической географии 1742 г.; 2) почему в русскую версию “Краткой политической географии” Х. Н. фон Винсгейма 1745 г. не вошел раздел о России; 3) является ли раздел о России из немецкого издания “Краткой политической географии” Х. Н. фон Винсгейма 1745 г. публикацией его неизданного труда “О Российской империи” 1739 г.

“Краткая политическая география” Х. Н. фон Винсгейма — это утраченная увертюра к богатой истории российской и мировой научной школы географии и страноведения. Ее восстановление дает нам шанс переосмыслить и возраст, и положение этой науки в системе знаний, у истоков которой в России, вместе с Винсгеймом, стояли Эйлер, Делиль, Крафт, Татищев, Крашенинников, Бюшинг и многие другие выдающиеся ученые. Политическая география — трубят нам заключительные фанфары увертюры Винсгейма — это одна из старейших гуманитарных наук, с которой во многом началась история систематических знаний в области географии, политологии и международных отношений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев А. И.* Ньютон и русская география XVIII века // Известия Всесоюзного Географического общества. — 1943. — Вып. 3. — С. 3–12.
2. Атлас российской: состоящей из девятнадцати специальных карт представляющих Всероссийскую империю с пограничными землями: Сочиненной по правилам географическим и новейшим обсервациям: С приложенною притом генеральною картою великия сея Империи / Старанием и трудами Императорской Академии наук. — Санктпетербург: [Типография Академии наук], 1745. — 19 л.
3. Атлас сочиненный к пользе и употреблению юношества и всех читателей Ведомостей и исторических книг — Санктпетербург: При Императорской Академии наук, 1737. — 27 с.
4. *Белковец Л. П.* Россия в немецкой исторической журналистике XVIII в.: Г. Ф. Миллер и А. Ф. Бюшинг. — Томск: Издательство Томского университета, 1988. — 284 с.
5. *Бюшинг А. Ф.* Руководство к основательному и полезному познанию географического и политического состояния европейских государств и республик / Переведено с немецкаго Алексеем Разумовым. — Санктпетербург: При Императорской Академии наук, 1763. — 180 с.
6. *Бюшинг А. Ф.* Д. Антона Фридерика Бишинга из сокращенной его географии три главы о географии вообще, о Европе и о Российской империи / переведенныя с немецкаго на российской язык Иваном Долинским. — М.: Печатаны при Императорском Московском университете, 1766. — 104 с.
7. *Винсгейм фон Х. Н.* Краткая политическая география: к изъяснению изданнаго на российском языке небольшого атласа: сочиненная для употребления Гимназии при Императорской Академии наук. — В Санктпетербурге: [Типография Академии наук], 1745. — 339 с.
8. *Гнучева В. Ф.* Географический департамент Академии наук XVIII века / Под ред. А. И. Андреева. — М., Л.: Издательство Академии наук СССР, 1946. — 445 с.
9. *Греков В. И.* Очерки из истории русских географических исследований в 1725–1765 гг. — М.: Издательство Академии наук СССР, 1960. — 425 с.

10. *Греч И. М., Наковальнин С. Ф.* Политическая география — Санктпетербург: [Типография Сухопуттного кадетского корпуса], 1758. — 184 с.
11. Гюбнер И. Земноводного круга краткое описание из старой и новой географии / из старья и новья географии по вопросам и ответам чрез Ягана Гибнера собраное. И на немецком диалекте в Лейпцике. Напечатано; А ныне повелением великаго государя царя и великаго князя. Петра Перваго всероссийскаго императора. При наследственном благороднейшем государе царевиче Петре Петровиче. Нароссийском; [ред. Я. В. Брюс]. — Напечатано в Москве: [б. и.], 1719. — 392 с.
12. *Елацков А. Б., Каледин Н. В.* Историческое развитие отечественной политической географии и геополитики // Псковский регионологический журнал — 2019. — № 4 (40). — С. 3–15.
13. Исторический обзор учебников общей и русской географии, изданных со времени Петра Великого по 1876 год / (1710–1876) / Сост. Л. Весин. — СПб: Типография братьев Пантелеевых, 1876. — 696 с.
14. *Каледин Н. В.* Политическая география: истоки, проблемы, принципы научной концепции. — СПб.: Издательство СПбГУ 1996. — 163 с.
15. *Каледин Н. В., Елацков А. Б.* Возникновение и становление политической географии в России // Актуальные проблемы мировой политики. — Вып. 10 / под ред. Т. С. Немчиновой. — СПб.: Издательство СПбГУ, 2020. — С. 614–626.
16. *Каледин Н. В., Чистобаев А. И., Каледин В. Н., Елацков А. Б.* Развитие политической географии и геополитики в Балтийском регионе как научно-образовательных направлений: исторический вклад Санкт-Петербургского университета // Балтийский регион. — 2019. — Т. 11, № 2. — С. 136–152.
17. *Кант И.* Физическая география. — Калининград: Музей-заповедник “Музей Мирового океана”, 2023. — 499 с.
18. *Королев С. В.* Библиотека географа Антона Фридриха Бюшинга: справочник-указатель — СПб: Российская национальная библиотека, 2020. — 650 с.
19. *Крафт Г. В.* Краткое руководство к математической и натуральной географии: С употреблением земнаго глобуса и ландкарт: Сочинено в пользу российского юношества / И переведено с немецкаго языка [Иваном Голубцовым]. — Санктпетербург: при Императорской Академии наук, 1739. — 236 с.
20. Краткое руководство к географии. В пользу учащагося при гимназии юношества в Санктпетербурге 1742 года. — [Санкт-Петербург]: печатано при Императорской Академии наук, [1742]. — 66 с.
21. *Ломоносов М. В.* Полное собрание сочинений. Т. 9. Служебные документы. 1742–1765 гг. / подгот. Г. П. Блоком; ред. А. И. Андреев и др. — М. ; Л.: Издательство Академии наук СССР, 1955. — 1018 с.
22. *Пекарский П. П.* История Императорской Академии наук в Петербурге. — СПб.: Отделение русского языка и словесности Императорской Академии наук, 1870. — 774 с.
23. *Ратцель Ф.* Земля и жизнь. Сравнительное землеведение. Т. 1. — СПб.: Брокгауз-Ефрон, 1903. — 340 с.
24. *Ростовцев Е. А., Тихонов И. Л.* Три века Петербургского университета. — СПб.: Издательство СПбГУ, 2024. — 464 с.
25. *Свенске К. Ф.* Материалы для истории составления Атласа Российской империи, изданнаго Императорскою Академиею наук в 1745 году / собраны из Архива Императорской Академии наук Карлом Свенске. — СПб: Типография Императорской Академии наук, 1866. — 204 с.

26. Сводный каталог русской книги гражданской печати XVIII века (1725–1800) — М.: Книга, 1962. — Том 1 (А–И). — 436 с.
27. *Сони́ков В. С.* Опыт российской библиографии, или полный словарь сочинений и переводов, напечатанных на словенском и российском языках, от начала заведения типографий, до 1813 года, с предисловием, служащим введением в сию науку, совершенно новую в России, с историею о начале и успехах книгопечатания как в Европе вообще, так и особенно в России, с примечаниями о древних и новых редких книгах и их изданиях, и с краткими из оных выписками. — СПб.: в типографии императорского театра, 1814.
28. *Тати́щев В. Н.* Избранные труды по географии России / Под редакцией, со вступительной статьей и комментариями А. И. Андреева. — М.: Географгиз, 1950. — 254 с.
29. *Тати́щев В. Н.* Лексикон российский исторический, географический, политический и гражданский. Ч. 2. Г — Ж. — СПб.: типография Горного училища, 1793 г. — 216 с.
30. *Туровский Р. Ф.* Политическая география — Смоленск: Издательство СГУ, 1999. — 381 с.
31. *Фель С. Е.* Картография России XVIII века — М.: Геодезиздат, 1960. — 226 с.
32. *Bordas L.* O carte manuscrisă pierdută. Geografia lumii copiată de Sava Popovici din Rășinari (1785) // Revista de istorie și teorie literară. — 2023. — No. 1–4. — Pp. 369–375.
33. *Büsching A. F.* Neue Erdbeschreibung: Erster Theil, Welcher Dänemark, Norwegen, Schweden, das ganze rußische Kaiserthum, Preussen, Polen, Hungarn, und die europäische Turkey, mit denen dazu gehörigen und einverleibten Ländern, enthält. Vierte auflage. Hamburg, 1760. — 996 p.
34. *Hafeznia M. R.* A New Approach to the History of Political Geography in the World // Geopolitics Quarterly. — 2014. — Vol. 10, Iss. 33. — Pp. 1–36.
35. *Heffernan M.* On geography and progress: Turgot's plan d'un ouvrage sur la géographie politique (1751) and the origins of modern progressive thought // Political Geography. — 1994. — Vol. 13, No. 4. — Pp. 328–343.
36. *Krafft G. W.* Kurtze Einleitung zur Mathematischen und Naturlichen Geographie, nebst dem Gebrauch der Erd-Kugeln und Land-Charten, zum Nutzen der Russischen studirenden Jugend. — St. Petersburg: gedruckt bey der Kaiserl. Academie der Wissenschaften, 1738. — 295 p.
37. Kurtze Einleitung in die Geographie. Zum Nutzen der studierenden Jugend im Gymnasio allda heraus gegeben zu St. Petersburg Anno 1742. — [СПб.]: gedruckt bey der Kayserl. Academie der Wissenschaften. — [1742]. — 56 с.
38. *Paschoud R.* Historico-Political Geography, etc. — London: J. Read, 1722. — 424 p.
39. Immatriculation von Christianus Nicolaus de Winsheim / Matrikelportal Rostock — Datenbankedition der Immatriculationen an der Universität Rostock seit 1419 [База данных о зачислении в Ростокский университет с 1419 г.]. — URL: <http://purl.uni-rostock.de/matrikel/100016313> (дата обращения: 19.09.2024).
40. *Sanson N.* Introduction à la Géographie. — Paris: Durand, 1665. — 575 p.
41. *Winsheim von, Christian Nikolaus* / Erik-Amburger-Datenbank des Leibniz-Instituts für Ost- und Südosteuropaforschung. — URL: <https://amburger.ios-regensburg.de/index.php?id=52267&mode=1> (дата обращения: 19.09.2024).
42. *Winsheim von Ch. N.* Kurtzgefasste politische Geographie zur Erläuterung eines kleinen, in Russischer Sprache publicirten Atlantis entworfen bey der Kayserl. Academie der Wissenschaften. — St. Petersburg [St.-Peterburg: Gedruckt bey der Kayserlichen Academie der Wissenschaften], 1745. — 474 p.

Winsheim's "Political Geography" as a Starting Point in the Development of the Russian and World Academic School of Geography and Regional Studies

I. Y. Okunev*

MGIMO University, Moscow

**E-mail: iokunev@mgimo.ru*

The "Brief Political Geography" by Christian Nikola von Winsheim is the first book in the world specifically called political geography. It was issued by decision of the Governing Senate in two editions in Russian and German in St. Petersburg at the printing house of the Imperial Academy of Sciences in 1745 as an appendix to the educational atlas of the geography of the world, published there in 1737. The amazing fact is that the German book is 154 pages longer than the Russian one and contains a large and interesting section on the geography of Russia. The fragment omitted in the Russian version is an edition of Winsheim's work of 1739 "On the Russian Empire". The fact that the founder of political geography Bushing was well acquainted with the book of Winsheim is confirmed by the fact that a German-language copy of the "Brief Political Geography" was kept in Bushing's personal library, and due to the fact that this library was bought by Catherine II for the Hermitage, and then transferred to the Imperial Public Library, we can get acquainted with this copy and the notes of Bushing to Winsheim. Thus, Winsheim's book is not only the first with the title "political geography", but also a key link in the development of the discipline, the center axis of the initial period of development of which can be designated as Hubner — Winsheim — Bushing — Ratzel. Its restoration gives us a chance to rethink both the age and the position of this science in the knowledge system, at the origins of which in Russia, along with Winsheim, stood Euler, Delisle, Krafft, Bushing, Tatishchev and many other outstanding scientists. Thanks to the rediscovery of Winsheim, it can be argued that political geography is one of the oldest humanities, which in many ways began the history of systematic knowledge in the field of geography, political science and international relations.

Keywords: political geography, historical geography, regional studies, Winsheim, Krafft, Bushing, Tatishchev, Hubner, history of geography, XVIII century

REFERENCES

1. *Andreev A. I.* N'yuton i russkaya geografiya XVIII veka // *Izvestiya Vsesoyuznogo Geograficheskogo obshchestva*. — 1943. — Vy'p. 3. — S. 3–12.
2. *Atlas rossijskoj: sostoyashhej iz devyatnadcziati special'ny'x kart predstavlyayushhix Vserossijskuyu imperiyu s pogranichny'mi zemlyami: Sochinenoj po pravilam geograficheskim i novejsim observacijam: S prilozhennoy pritom general'noy kartoy velikiya seya Imperii / Staraniem i trudami Imperatorskoj Akademii nauk*. — Sanktpeterburg: [Tipografiya Akademii nauk], 1745. — 191 s.
3. *Atlas sochinenny'j k pol'ze i upotrebleniyu yunoshestva i vsech chitatelej Vedomostej i istoricheskix knig* — Sanktpeterburg: Pri Imperatorskoj Akademii nauk, 1737. — 27 s.
4. *Belkovecz L. P.* Rossiya v nemeckoj istoricheskij zhurnalistike XVIII v.: G. F. Miller i A. F. Byushing. — Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, 1988. — 284 s.
5. *Byushing A. F.* Rukovodstvo k osnovatel'nomu i poleznomu poznaniyu geograficheskago i politicheskago sostoyaniya evropejskix gosudarstv i respublik / Perevedeno s nemeckago Alekseem Razumovy'm. — Sanktpeterburg: Pri Imperatorskoj Akademii nauk, 1763. — 180 s.

6. *Byushing A. F.* D. Antona Friderika Bishinga iz sokrashhennoj ego geografii tri glavy' o geografii voobshhe, o Evrope i o Rossijskoj imperii / perevedenny'ya s nemeczskago na rossijskoj yazy'k Ivanom Dolinskim. — M.: Pechatany' pri Imperatorskom Moskovskom universitete, 1766. — 104 s.

7. *Vinsgejm fon X. N.* Kratkaya politicheskaya geografiya: k iz'yasneniyu izdannago na rossijskom yazy'ke nebol'shago atlasa: sochinennaya dlya upotrebleniya Gimnazii pri Imperatorskoj Akademii nauk. — V Sanktpeterburge: [Tipografiya Akademii nauk], 1745. — 339 s.

8. *Gnucheva V. F.* Geograficheskij departament Akademii nauk XVIII veka / Pod red. A. I. Andreeva. — M., L.: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1946. — 445 s.

9. *Grekov V. I.* Oчерki iz istorii russkix geograficheskix issledovanij v 1725–1765 gg. — M.: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1960. — 425 s.

10. *Grech I. M., Nakoval'nin S. F.* Politicheskaya geografiya — Sanktpeterburg: [Tipografiya Suxoputnogo kadetskogo korpusa], 1758. — 184 s.

11. *Gyubner I.* Zemnovodnogo kruga kratkoe opisanie iz staroj i novoj geografii / iz stary'ya i novy'ya geografii po voprosam i otvetam chrez Yagana Gibnera sobranoe. I na nemeczkom dialekte v Leipcike. Napechatano; A ny'ne poveleniem velikago gosudarya czarya i velikago knyazya. Petra Pervago vsrossiiskago imperatora. Pri nasledstvennom blagorodneisem gosudare czareviche Petre Petroviche. Narossiiskom; [red. Ya. V. Bryus]. — Napechatano v Moskve: [b. i.], 1719. — 392 s.

12. *Elaczkov A. B., Kaledin N. V.* Istoricheskoe razvitie otechestvennoj politicheskoy geografii i geopolitiki // Pskovskij regionologicheskij zhurnal — 2019. — № 4 (40). — С. 3–15.

13. Istoricheskij obzor uchebnikov obshhej i russkoj geografii, izdannyy'x so vremeni Petra Velikogo po 1876 god / (1710–1876 g.) / Sost. L. Vesin. — SPb.: Tipografiya brat'ev Panteleevy'x, 1876. — 696 s.

14. *Kaledin N. V.* Politicheskaya geografiya: istoki, problemy', principy' nauchnoj koncepcii. — SPb.: Izdatel'stvo SPbGU 1996. — 163 s.

15. *Kaledin N. V., Elaczkov A. B.* Vozniknovenie i stanovlenie politicheskoy geografii v Rossii // Aktual'ny'e problemy' mirovoj politiki. — Vy'p. 10 / pod red. T.S. Nemchinovoj. — SPb.: Izdatel'stvo SPbGU, 2020. — S. 614–626.

16. *Kaledin N. V., Chistobaev A. I., Kaledin V. N., Elaczkov A. B.* Razvitie politicheskoy geografii i geopolitiki v Baltijskom regione kak nauchno-obrazovatel'ny'x napravlenij: istoricheskij vklad Sankt-Peterburgskogo universiteta // Baltijskij region. — 2019. — T. 11, № 2. — S. 136–152.

17. *Kant I.* Fizicheskaya geografiya. — Kaliningrad: Muzej-zapovednik “Muzej Mirovogo okeana”, 2023. — 499 s.

18. *Korolev S. V.* Biblioteka geografa Antona Fridrixa Byushinga: spravochnik-ukazatel' — SPb.: Rossijskaya nacional'naya biblioteka, 2020. — 650 s.

19. *Kraft G. V.* Kratkoe rukovodstvo k matematicheskoy i natural'noj geografii: S upotrebleniem zemnago globusa i landkart: Sochineno v pol'zu rossijskago yunoshestva / I perevedeno s nemeczskago yazy'ka [Ivanom Golubczovy'm]. — Sanktpeterburg: pri Imperatorskoj Akademii nauk, 1739. — 236 s.

20. Kratkoe rukovodstvo k geografii. V pol'zu uchashhagosya pri gimnazii yunoshestva v Sanktpeterburge 1742 goda. — [Sankt-Peterburg]: pechatano pri Imperatorskoj Akademii nauk, [1742]. — 66 s.

21. *Lomonosov M. V.* Polnoe sobranie sochinenij. T. 9. Sluzhebny'e dokumenty'. 1742–1765 gg. / podgot. G. P. Blokom; red. A. I. Andreev i dr. — M.—L.: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1955. — 1018 c.

22. *Pekarskij P. P.* Istoriya Imperatorskoj Akademii nauk v Peterburge. — SPb.: Otdelenie russkogo yazy'ka i slovesnosti Imperatorskoj Akademii nauk, 1870. — 774 s.

23. *Ratcel' F.* Zemlya i zhizn'. Sravnitel'noe zemlevedenie. T. 1. — SPb.: Brokgauz-Efron, 1903. — 340 c.

24. *Rostovcev E. A., Tixonov I. L.* Tri veka Peterburgskogo universiteta. — SPb.: Izdatel'stvo SPbGU, 2024. — 464 s.

25. *Svenske K. F.* Materialy' dlya istorii sostavleniya Atlasa Rossijskoj imperii, izdannago Imperatorskoju Akademiejy nauk v 1745 godu / sobrany' iz Arxiva Imperatorskoj Akademii nauk Karlom Svenske. — SPb.: tipografiya Imperatorskoj Akademii nauk, 1866. — 204 s.

26. Svodny'j katalog russkoj knigi grazhdanskoj pečati XVIII veka (1725–1800) — M.: Kniga, 1962. — Tom 1 (A–I). — 436 s.

27. *Sopikov V. S.* Opy't rossijskoj bibliografii, ili polny'j slovar' sochinenij i perevodov, napechatanny'x na slovenskom i rossijskom yazy'kax, ot nachala zavedeniya tipografij, do 1813 goda, s pre-disloviem, sluzhashhim vvedeniem v siyu nauku, sovershenno novuyu v Rossii, s istoriejy o nachale i uspechax knigopechataniya kak v Evrope voobshhe, tak i osobenno v Rossii, s primechaniyami o drevnix i novy'x redkix knigax i ix izdaniyax, i s kratkimi iz ony'x vy'piskami. — SPb.: v tipografii imperatorskogo teatra, 1814.

28. *Tatishhev V. N.* Izbranny'e trudy' po geografii Rossii / Pod redakciej, so vstupitel'noj stat'ej i kommentariyami A. I. Andreeva. — M.: Geografiz, 1950. — 254 s.

29. *Tatishhev V. N.* Leksikon rossijskij istoricheskij, geograficheskij, politicheskij i grazhdanskij. Ch. 2. G — Zh. — SPb.: tipografiya Gornogo uchilishha, 1793 g. — 216 s.

30. *Turovskij R. F.* Politicheskaya geografiya — Smolensk: Izdatel'stvo SGU, 1999. — 381 s.

31. *Fel' S. E.* Kartografiya Rossii XVIII veka — M.: Geodezizdat, 1960. — 226 s.

32. *Bordas L.* O carte manuscrisă pierdută. Geografia lumii copiată de Sava Popovici din Rășinari (1785) // Revista de istorie și teorie literară. — 2023. — No. 1–4. — Pp. 369–375.

33. *Büsching A. F.* Neue Erdbeschreibung: Erster Theil, Welcher Dänemark, Norwegen, Schweden, das ganze rußische Kaiserthum, Preussen, Polen, Hungarn, und die europäische Turkey, mit denen dazu gehörigen und einverleibten Ländern, enthält. Vierte auflage. Hamburg, 1760. — 996 p.

34. *Hafeznia M. R.* A New Approach to the History of Political Geography in the World // Geopolitics Quarterly. — 2014. — Vol. 10, Iss. 33. — Pp. 1–36.

35. *Heffernan M.* On geography and progress: Turgot's plan d'un ouvrage sur la géographie politique (1751) and the origins of modern progressive thought // Political Geography. — 1994. — Vol. 13, No. 4. — Pp. 328–343.

36. *Krafft G. W.* Kurtze Einleitung zur Mathematischen und Naturlichen Geographie, nebst dem Gebrauch der Erd-Kugeln und Land-Charten, zum Nutzen der Russischen studirenden Jugend. — St. Petersburg: gedruckt bey der Kaiserl. Academie der Wissenschaften, 1738. — 295 p.

37. Kurtze Einleitung in die Geographie. Zum Nutzen der studierenden Jugend im Gymnasio allda heraus gegeben zu St. Petersburg Anno 1742. — [SPb.]: gedruckt bey der Kayserl. Academie der Wissenschaften. — [1742]. — 56 c.

38. *Paschoud R.* Historico-Political Geography, etc. — London: J. Read, 1722. — 424 p.

39. Immatrikulation von Christianus Nicolaus de Winsheim / Matrikelportal Rostock — Datenbankedition der Immatrikulationen an der Universität Rostock seit 1419 [База данных о зачислении в Ростокский университет с 1419 г.]. — URL: <http://purl.uni-rostock.de/matrikel/100016313> (application date: 19.09.2024).

40. *Sanson N.* Introduction à la Géographie. — Paris: Durand, 1665. — 575 p.

41. *Winsheim von, Christian Nikolaus* / Erik-Amburger-Datenbank des Leibniz-Instituts für Ost- und Südosteuropaforschung. — URL: <https://amburger.ios-regensburg.de/index.php?id=52267&mode=1> (application date: 19.09.2024).

42. *Winsheim von Ch. N.* Kurtzgefasste politische Geographie zur Erläuterung eines kleinen, in Russischer Sprache publicirten Atlantis entworffen bey der Kayserl. Academie der Wissenschaften. — St. Petersburg [St.-Peterburg: Gedruckt bey der Kayserlichen Academie der Wissenschaften], 1745. — 474 p.

УДК: 631.416.9+574.2

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ И ЦИНКА В ОБЪЕКТАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И В ВОЛОСАХ НАСЕЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ОКТЯБРЬСКОГО РАЙОНА ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА-ЮГРЫ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2025 г. А. В. Синдирева^{а, *}, М. А. Белов^{а, **}, Д. О. Пузанов^{б, ***},
С. С. Вешкурцева^{а, ****}

^аТюменский государственный университет, Тюмень, Россия

^бООО «РН-Юганскнефтегаз», Нефтеюганск, Россия

*E-mail: sindireva72@mail.ru

**E-mail: m.blvv@yandex.ru

***E-mail: puzanov31292@mail.ru

****E-mail: king805@mail.ru

Поступила в редакцию 26.11.2024 г.

После доработки 25.02.2025 г.

Принята к публикации 10.03.2025 г.

В рамках исследований в 2019–2022 гг. проведена оценка содержания меди и цинка в компонентах окружающей среды и волосах населения территории Октябрьского района Ханты-Мансийского автономного округа-Югры Тюменской области. Содержание подвижных форм микроэлементов в почвах агроценозов исследуемого района изменяется в зависимости от типа почв: меди — от 0.57 до 0.85 мг/кг, цинка — от 13.5 до 22.53 мг/кг. Эти значения не превышают предельно допустимых концентраций, но по агрохимическим градациям классифицируются как высокие. Содержание меди и цинка в овощных культурах, произрастающих на исследуемых почвах, в среднем составляет: картофель — медь 0.07 мг/кг, цинк — 0.34 мг/кг, морковь — медь 0.08 мг/кг, цинк — 0.50 мг/кг, свекла — медь 0.07 мг/кг, цинк — 0.50 мг/кг. Превышения предельно допустимых концентраций не обнаружено. Результаты анализа показывают, что в овощах, выращенных на дерново-подзолистых и подзолистых почвах, наиболее высокие концентрации меди и цинка, в отличие от овощей, произрастающих на серых лесных почвах.

Среднее содержание меди и цинка в водных объектах Октябрьского района ХМАО составляет: медь — 0.025 мг/л, цинк — 0.65 мг/л, что также не превышает допустимых значений и в то же время характеризуется как низкое.

Изучено содержание меди и цинка в волосах населения, постоянно проживающего на территории Октябрьского района. Установлена зависимость уровня микроэлементов в биосубстратах от пола, возраста и места проживания. С возрастом среднее содержание меди и цинка в волосах населения увеличивается. Количество этих элементов также зависит от пола: у женщин (среднее содержание меди — 59.65 мг/кг, цинка — 212.47 мг/кг) больше, чем у мужчин (среднее содержание меди — 21.87 мг/кг, цинка — 152.53 мг/кг). Установлена взаимосвязь содержания меди и цинка в воде и в волосах жителей региона, что позволяет сделать вывод о том, что питьевая вода является одним из источников элементов для человека.

Ключевые слова: медь, цинк, почвы, овощные культуры, вода, волосы населения

DOI: 10.31857/S0869607125010096, EDN: LHDMDE

ВВЕДЕНИЕ

Элементы, содержащиеся в организмах в очень небольших количествах, принято называть микроэлементами. Микроэлементы влияют на направленность действия ферментов и их активность [5]. Содержание микроэлементов в массе живых организмов составляет от 0.01 до 0.0001% [9].

Медь и цинк участвуют в круговороте веществ, влияют на биохимические процессы в живых организмах и поддерживают функционирование экосистем в целом [4]. Медь необходима для работы ферментов, участвующих в дыхании и энергетическом обмене растений и животных, играет важную роль в иммунной системе, участвуя в выработке ферментов, убивающих патогенные микроорганизмы. Цинк участвует более чем в 300 ферментативных реакциях, метаболических функциях, регуляции экспрессии генов, апоптозе и иммуномодуляции, тем самым демонстрируя свою важную роль в поддержании общего здоровья и благополучия [15].

В условиях Крайнего Севера России может отмечаться недостаток, избыток и дисбаланс содержания меди и цинка в живых организмах, которые участвуют в обмене белков, жиров, углеводов, синтезе белка в организме, теплообмене, кроветворении, костеобразовании, размножении, реакциях иммунитета [3]. С одной стороны, это может быть обусловлено природными факторами, с другой — интенсивное развитие северных территорий может быть причиной антропогенного поступления тяжелых металлов в объекты окружающей среды и, как следствие, в организм человека.

Недостаток этих микроэлементов может привести к серьезным нарушениям здоровья у людей и животных. Дефицит меди и цинка может вызывать анемию, задержку роста, иммунодефицитные состояния и нарушения репродуктивной функции. Профицит меди и цинка в окружающей среде также оказывает негативное воздействие на здоровье. Избыток меди может приводить к нарушению функций печени, почек и нервной системы, а избыток цинка — к нарушению всасывания других микроэлементов и другим негативным последствиям [12].

Дисбаланс между медью и цинком может возникать как при недостатке, так и при избытке одного из этих элементов. Это может приводить к нарушению обмена веществ, снижению иммунитета, нарушению репродуктивной функции и другим заболеваниям. Например, избыток меди приводит к дефициту цинка и молибдена [8]. Избыток, недостаток и дисбаланс микроэлементов в системе "почва — растение" может препятствовать росту сельскохозяйственных культур, тем самым снижая их урожайность. На загрязненных почвах у чувствительных растений могут развиваться токсические эффекты, которые могут замедлить рост растений или даже привести к их гибели [14].

Для решения проблемы дефицита, профицита и дисбаланса меди и цинка необходимо предпринимать меры по контролю над промышленными выбросами, правильному использованию удобрений и пестицидов в сельском хозяйстве, а также обеспечению сбалансированного питания для людей и животных. В связи с этим необходима комплексная оценка содержания микроэлементов в объектах окружающей среды.

Цель исследования: экологическая оценка содержания меди и цинка в объектах окружающей среды и в волосах населения Октябрьского района ХМАО-Югры Тюменской области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб и анализ почв, растений, воды проведен в Октябрьском районе ХМАО-Югры в 2019–2022 гг. Выбраны три населенных пункта (рис. 1) в различных частях района: северная часть — поселок (п.) Перегребное; центральная часть — поселок городского типа (пгт.) Приобье; юго-западная часть — поселок (п.) Уньюган.

Почвенный покров района складывается в основном из: подзолистых почв на наиболее дренированных участках; дерново-подзолистых почв под хвойными лесами, где преобладает кислая листовая подстилка, способствующая выщелачиванию оснований из верхних слоев почвы; серых лесных почв, сформированных под смешанными лесами, расположенными на суглинистых породах [2, 10]. Промышленность района представлена традиционными отраслями (лесозаготовка, лесопереработка, рыбодобыча и рыбообработка) и отраслями, история развития которых на территории Октябрьского района сравнительно небольшая (разведка недр и добыча нефти). Данный вид антропогенного воздействия может оказывать влияние на микроэлементный статус территории.

Почвы и растения. Всего за время исследования отобрано свыше 70 проб почв (агроценозов и фоновых территорий) в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017. Почвы и почвенный покров пахотных угодий характеризуются как пригодные для ведения очагового земледелия, возделывания в основном овощных культур. Отбор проб проводился одновременно с растительными образцами в период физиологической спелости растений. Растения представлены сельскохозяйственными культурами, которые человек употребляет в пищу (картофель, морковь, свекла). Образцы проанализированы на содержание меди и цинка методом плазменной атомно-абсорбционной спектрофотометрии в соответствии с ГОСТ 32343-2013.

Водные объекты. В ходе исследования водных объектов в период с 2019 по 2022 г. отобрано и проанализировано 60 образцов из поверхностных водных объектов — источников питьевого водоснабжения и грунтовой воды (из водоносных скважин). Отбор проб воды проведен в соответствии с ГОСТ 31861-2012. Пробы на содержание меди и цинка проанализированы методом плазменной атомно-абсорбционной



Рис. 1. Картограммы отбора проб на территории п. Перегребное, пгт. Приобье, п. Уньюган Октябрьского района Ханты-Мансийского автономного округа — Югры Тюменской области.

Fig. 1. Schematic maps on the territory of the village of Peregrebnoye, the village of Priobyeye, the village of Unyugan of the Oktyabrsky district of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra of the Tyumen Region.

спектрофотометрии по “Методике выполнения измерений массовой концентрации железа, кадмия, кобальта, марганца, никеля, меди, цинка, хрома и свинца в пробах природных и сточных вод”.

Биологические образцы (волосы). Отбор волос проводился согласно МУК 4.1.763-4.1.779-99 “Определение химических соединений в биологических средах”.

Всего было исследовано 57 человек: 22 человека до 18 лет; 35 человек в возрасте от 18 до 85 лет, постоянно проживающих на территории Октябрьского района ХМАО-Югры Тюменской области. При отборе проб волос населения проведен опрос. Люди, употребляющие с пищей витаминно-минеральные комплексы и/или биологически активные добавки, имеющие крашенные волосы и работающие в условиях вредности по химическому фактору, к исследованию не допускались.

По окончании полученные данные подвергали статистической обработке с использованием пакета программ MS EXCEL. В ходе обработки информации проведен корреляционный анализ и применен метод оценки статистической значимости по методу Стьюдента. Во всех процедурах статистического анализа рассчитывали достигнутый уровень значимости (p). При этом за критический уровень значимости принимали $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Уровень содержания меди и цинка в почве может варьироваться в зависимости от ее типа в целом, гранулометрического состава, кислотности, содержания органических веществ, а также других физико-химических факторов среды. В исследовании проанализированы подвижные формы меди и цинка, поскольку они являются доступными для растений и с позиции диагностики питания растений являются наиболее информативными. Содержание подвижных форм меди и цинка в исследуемых почвах представлено в табл. 1.

В дерново-подзолистых почвах в п. Перегребное содержание подвижных форм меди в среднем составляет 0.85 ± 0.07 мг/кг, а цинка — 13.5 ± 1.89 мг/кг. Содержание подвижных форм меди в подзолистых почвах в пгт. Приобье в среднем 0.57 ± 0.10 мг/кг, а цинка 22.53 ± 0.45 мг/кг. В серых лесных почвах п. Уньюган содержание подвижных форм меди и цинка в среднем составляет 0.62 ± 0.93 мг/кг и 21.05 ± 3.15 мг/кг соответственно. Самое высокое содержание меди зафиксировано

Таблица 1. Содержание подвижных форм меди и цинка в почвах Октябрьского района ХМАО-Югры Тюменской области

Table 1. The content of mobile forms of copper and zinc in the soils of the Oktyabrsky district of KhMAO-Yugra, Tyumen Region

Район исследования / Research area	Тип почв / Soil type	Содержание, мг/кг / Content, mg/kg	
		Cu	Zn
Уньюган	Серые лесные	0.62 ± 0.93	21.05 ± 3.15
Приобье	Подзолистые	0.57 ± 0.10	22.53 ± 0.45
Перегребное	Дерново-подзолистые	0.85 ± 0.07	13.5 ± 1.89
ПДК*, мг/кг		3	23

* Согласно СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”.

в дерново-подзолистых почвах (0.85 ± 0.07 мг/кг). Наивысшее содержание цинка в почвах агроценозов исследуемых населенных пунктов наблюдается в пгт. Приобье (22.53 ± 0.45 мг/кг) и в п. Уньюган (21.05 ± 3.15 мг/кг), а наименьшая концентрация зафиксирована в пробах почвы в п. Перегребное 13.5 ± 1.89 мг/кг.

Согласно агрохимическим градациям “Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения” и гигиеническим нормативам СанПиН 1.2.3685-21 среднее содержание подвижных форм меди ($>0.5-3.0$ мг/кг) и цинка ($>5.0-23.0$ мг/кг) в обследуемых почвах характеризуется как высокое. В то же время превышений гигиенических нормативов по содержанию подвижных форм меди и цинка на исследуемой территории не установлено. Однако встречаются территории как с избытком, так и с недостатком меди. Содержание цинка практически во всех образцах почвы выше нормы, и его значение в 70% обследованных проб приближается к ПДК (23 мг/кг). Необходимо отметить, что содержание подвижных форм цинка на исследуемых территориях гораздо выше, чем его уровень для тех же типов почв на юге Тюменской области, который составляет в среднем от 0.6 до 1.5 мг/кг и характеризуется, напротив, как низкий [6]. Очевидно, это объясняется характером антропогенного воздействия на территорию — разведка недр и добыча нефти. Так, использование химических реагентов, таких как буровые растворы и ингибиторы коррозии, которые могут содержать цинк или способствовать его мобилизации, а также аварии и утечки нефтепродуктов, приводят к поступлению цинка в почву. Кроме того, выбросы тяжелых металлов при сжигании топлива и отходов, связанных с нефтедобычей, также увеличивают концентрацию цинка в окружающей среде.

Содержание тяжелых металлов в растениях прежде всего зависит от биологических особенностей культуры. Среди эдафических факторов важнейшим являются тип почвы и ее характеристики (гранулометрический состав, pH, содержание органического вещества). И самое главное — наличие доступных (подвижных) соединений микроэлементов в почве. Поэтому особенности аккумуляции цинка и меди в почвах оказывают влияние на накопление этих микроэлементов в растениях [6]. Содержание меди и цинка в продукции растениеводства представлено в табл. 2.

Согласно данным (табл. 2), наиболее высокое содержание меди отмечается: в образцах картофеля в п. Перегребное (0.13 ± 0.001 мг/кг), выращенных на дерново-подзолистых почвах; в пробах моркови в п. Уньюган и п. Перегребное (0.10 ± 0.015 мг/кг); в пробах свеклы в п. Уньюган (0.10 ± 0.015 мг/кг), выращенных на серых лесных почвах.

Среднее значение содержания меди во всех исследуемых культурах по населенным пунктам составило 0.079 ± 0.011 мг/кг и не превышает ПДК, который составляет 5 мг/кг.

В соответствии с полученными результатами (табл. 2) наиболее высокое среднее содержание цинка содержится: в пробах картофеля в п. Уньюган (0.41 ± 0.069 мг/кг), выращенных на серых лесных почвах; в пробах моркови и свеклы в пгт. Приобье (0.66 ± 0.059 мг/кг и 0.83 ± 0.006 мг/кг соответственно) выращенных на подзолистых почвах. Средний показатель для всех образцов составляет 0.69 мг/кг. Самые высокие средние значения зафиксированы в п. Перегребном (1.3 мг/кг), а самые низкие — в п. Уньюган (0.41 мг/кг). ПДК цинка в овощах составляет 10 мг/кг, таким образом, во всех исследуемых культурах не установлено превышение гигиенических нормативов. Результаты анализа показывают, что в овощах, выращенных на дерново-подзолистых и подзолистых почвах, более высокое содержание меди и цинка, в отличие от растений, произрастающих на серых лесных почвах.

Таблица 2. Содержание меди и цинка в продукции растениеводства Октябрьского района ХМАО-Югры Тюменской области**Table 2.** Copper and zinc content in crop production Oktyabrsky district of KhMAO-Yugra, Tyumen Region

Район исследования / Research area	Сельскохозяйственная культура / Agricultural culture	Содержание, мг/кг / Content, mg/kg		ПДК*, мг/кг / MPC, mg/kg	
		Cu	Zn	Cu	Zn
Уньюган	Картофель белый Сорт: Елизавета	0.04 ± 0.005	0.41 ± 0.069		
Приобье		0.04 ± 0.005	0.31 ± 0.043		
Перегребное		0.13 ± 0.001	0.32 ± 0.035		
Уньюган	Морковь Сорт: Витаминная 6	0.10 ± 0.015	0.36 ± 0.054		
Приобье		0.05 ± 0.005	0.66 ± 0.059	5	10
Перегребное		0.10 ± 0.015	0.49 ± 0.064		
Уньюган	Свекла Сорт: Бордо 237	0.10 ± 0.015	0.48 ± 0.038		
Приобье		0.07 ± 0.005	0.83 ± 0.006		
Перегребное		0.04 ± 0.005	0.21 ± 0.027		

* Согласно СанПиН 2.3.2.1078-01 “Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов”.

В целом по результатам анализа отмечаются низкие значения исследуемых микроэлементов в овощных культурах, произрастающих в Октябрьском районе ХМАО-Югры Тюменской области.

На рис. 2 представлены коэффициенты биологического накопления меди и цинка в пробах сельскохозяйственных культур, выращенных на территории Октябрьского района Ханты-Мансийского автономного округа — Югры Тюменской области. Коэффициент накопления рассчитан как отношение содержания элемента в растении к содержанию его подвижных форм в почве. Этот показатель позволяет оценить способность растений накапливать элементы из почвы.

В соответствии с полученными данными (рис. 2) более высокие показатели коэффициента биологического накопления по меди в пробах моркови (0.06) и свеклы (0.16), выращенных на серых лесных почвах. Более высокие показатели по двум элементам в пробах картофеля (медь — 0.06, цинк — 0.02) и моркови (медь — 0.12, цинк — 0.036), выращенных на дерново-подзолистых почвах. Согласно данным (рис. 2), на подзолистых почвах свекла обладает большей способностью к накоплению меди (0.12) и цинка (0.036), в отличие от картофеля и моркови.

Коэффициент накопления зависит от почвенных условий, биологических особенностей культур и свойств элементов. Этот показатель для меди выше, чем цинка, что может говорить о высокой доступности меди для растений. Очевидно, что в данном случае срабатывают биологические механизмы защиты самих сельскохозяйственных культур. Известно, что растения при высоком содержании элемента в почве могут поглощать только необходимое его количество, не превышающее пороговое значение.

Таким образом, несмотря на высокое содержание меди и цинка в почве, установлено низкое содержание меди и цинка в овощной продукции, выращиваемой на территории Октябрьского района ХМАО-Югры, что подтверждается довольно низкими

коэффициентами биологического накопления. Поскольку данный регион не является сельскохозяйственным, вклад возделываемой растениеводческой продукции в формирование микроэлементного статуса местного населения невелик. В то же время многие авторы отмечают, что местная вода, предназначенная для питьевых нужд, является довольно значимым источником микроэлементов для человека [4, 5, 9]. Поэтому при оценке элементного статуса территории необходимо учитывать содержание микроэлементов (в частности, меди и цинка) в водных объектах. В наших исследованиях представлено обобщенное содержание в объектах водоснабжения Октябрьского района (табл. 3).

Анализ показал (табл. 3), что содержание меди в поверхностных и грунтовых водах находится на одинаковом уровне: от 0.02 ± 0.003 до 0.04 ± 0.007 мг/л. Средний показатель составляет 0.025 мг/л при максимально допустимой концентрации 1 мг/л. Усредненные значения по населенным пунктам также не превышают норму.

Наиболее высокий уровень содержания цинка был обнаружен в образцах, отобранных из скважин. Содержание цинка в поверхностных водах в среднем составляет 0.7 мг/л. Максимальная средняя концентрация зафиксирована в п. Уньюган (0.87 ± 0.121 мг/л), а минимальная — в пгт. Приобье (<0.001 мг/л). Средний показатель равен 0.65 мг/л, что не превышает ПДК, равного 5 мг/л.

Анализ содержания меди и цинка в поверхностных и грунтовых водах показал, что их концентрации не превышают предельно допустимых уровней. В целом уровень содержания меди и цинка в грунтовых и поверхностных водах является важным показателем, поскольку служит одним из критериев биогеохимического прогноза микроэлементного статуса разных ландшафтов.

Таким образом, комплексный анализ объектов окружающей среды на содержание меди и цинка позволяет использовать эти данные в целях экологического мониторинга. Однако для более полной характеристики микроэлементного статуса территории

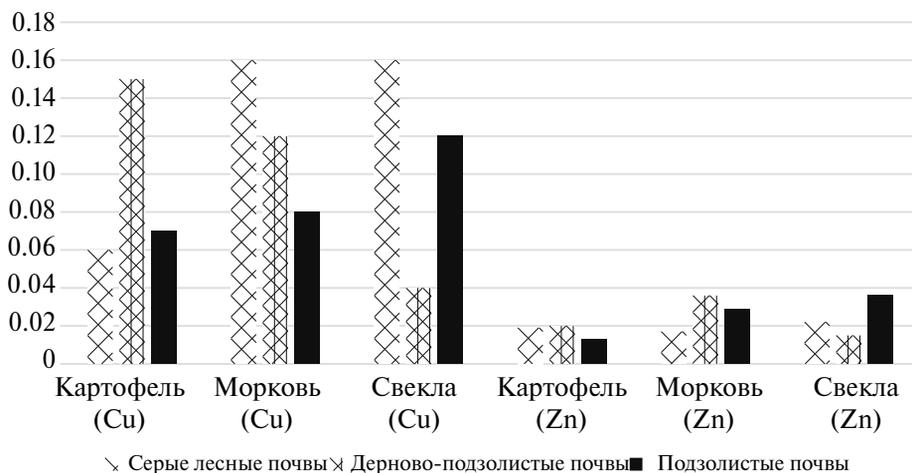


Рис. 2. Коэффициент накопления меди и цинка в пробах сельскохозяйственных культур, выращенных на территории Октябрьского района Ханты-Мансийского автономного округа — Югры Тюменской области.

Fig. 2. The coefficient-accumulation of copper and zinc in samples of agricultural crops grown in the Oktyabrskiy district of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra of the Tyumen Region.

Таблица 3. Содержание меди и цинка в пробах воды Октябрьского района ХМАО-Югры Тюменской области**Table 3.** Copper and zinc content in water samples Oktyabrsky district of KhMAO-Yugra, Tyumen Region

Район исследования / Research area	Тип водного объекта / Type of water body	Тип водоснабжения / Type of water supply	Содержание, мг/л / Content, mg/kg	
			Cu	Zn
Уньюган	Поверхностные воды	Система общего водоснабжения	0.02 ± 0.003	0.58 ± 0.081
Уньюган	Грунтовые воды	Скважина	0.03 ± 0.002	0.87 ± 0.121
Приобье	Грунтовые воды	Скважина	0.03 ± 0.002	0.81 ± 0.145
Приобье	Поверхностные воды	Система общего водоснабжения	0.04 ± 0.007	0.64 ± 0.070
Приобье	Поверхностные воды	Речной водозабор	<0.001	<0.001
Перегребное	Поверхностные воды	Речной водозабор	0.03 ± 0.002	0.73 ± 0.102
Перегребное	Грунтовые воды	Система общего водоснабжения	<0.001	0.3 ± 0.003
ПДК*, мг/л		-	1	5

* Согласно СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”.

необходимо определение содержания элементов, в частности меди и цинка, в организме человека. Помимо природных условий территории, уровня техногенной нагрузки в регионе, микроэлементозы связаны с профессиональной деятельностью населения, приемом медикаментов, использованием косметики и средств бытовой химии. На территории Октябрьского района ХМАО-Югры большая часть людей работают в нефтегазовой отрасли, и район исследования относится к нефтегазопромысловому. Близость к широтам Крайнего Севера, суровые климатические условия вместе с профессиональной деятельностью введут к ухудшению здоровья населения, что может усугубляться недостатком или дисбалансом физиологически активных веществ и микроэлементов.

Многие исследователи отмечают, что волосы человека позволяет оценить уровень микроэлементов в организме за последние несколько месяцев. Также можно использовать метод анализа крови или мочи. Однако они отражают лишь текущую информацию об их содержании в организме. Содержание меди и цинка в волосах населения приведено в табл. 4.

Исследования показали, что с возрастом средний уровень меди и цинка в волосах в основном увеличивается. Исключение составляют показатели у жителей с. Перегребное, где такая зависимость не установлена. Самые низкие показатели отмечены у детей из пгт. Приобье (2.09 ± 0.18 мг/кг (Cu) и 88.75 ± 11.53 мг/кг (Zn)), самые высокие у взрослых из п. Уньюган (97.12 ± 12.62 (Cu) мг/кг и 307.8 ± 18.42 мг/кг (Zn)). В целом как по меди, так и по цинку наиболее высокое содержание в волосах отмечается у населения п. Уньюган и превышает допустимый физиологический уровень [7].

Представляют также интерес не только возрастные, но и половые отличия в накоплении меди и цинка в волосах населения на определенной территории (табл. 5).

Таблица 4. Содержание меди и цинка в волосах населения Октябрьского района ХМАО-Югры Тюменской области**Table 4.** The content of copper and zinc in the hair of the population Oktyabrsky district of KhMAO-Yugra, Tyumen Region

Район исследования / Research area	Группы населения / Population groups	Содержание, мг/кг / Content, mg/kg	
		Cu	Zn
Уньюган	Дети	58.84 ± 7.67*	253.38 ± 35.47
	Взрослые	97.12 ± 12.62*	307.8 ± 18.42*
Приобье	Дети	2.09 ± 0.18 ^x	88.75 ± 11.53 ^x
	Взрослые	11.9 ± 1.54* ^x	188.8 ± 16.99* ^x
Перегребное	Дети	18.9 ± 3.59 ^x	202.76 ± 32.44
	Взрослые	10.43 ± 5.73 ^x	151.91 ± 24.30 ^x
Среднее значение	Дети	24.71	123.56
	Взрослые	74.15	243.95
Допустимый уровень, мг/кг [7]		от 11 до 17	от 180 до 230

* Достоверность различий между группами “дети” и “взрослые” в пределах района при $p \leq 0.05$;
^x — достоверность различий по отношению к самому высокому значению между районами соответственно между группами “дети” и “взрослые” при $p \leq 0.05$.

Таблица 5. Содержание меди и цинка в волосах женщин и мужчин Октябрьского района ХМАО-Югры Тюменской области**Table 5.** The content of copper and zinc in the hair of women and men Oktyabrsky district of KhMAO-Yugra, Tyumen Region

Район исследования / Research area	Группы населения / Population groups	Содержание, мг/кг / Content, mg/kg	
		Cu	Zn
Уньюган	Мужчины	50.26 ± 5.54	389.43 ± 39.17
	Женщины	134.41 ± 10.12*	408.48 ± 31.55
Приобье	Мужчины	7.12 ± 0.17 ^x	156.17 ± 12.13 ^x
	Женщины	14.0 ± 1.51* ^x	154.04 ± 17.14 ^x
Перегребное	Мужчины	11.14 ± 3.53 ^x	199.02 ± 17.45 ^x
	Женщины	26.24 ± 3.76* ^x	159.03 ± 14.17 ^x
Среднее значение	Мужчины	21.74	204.29
	Женщины	46.83	220.88
Допустимый уровень, мг/кг [7]		от 11 до 17	от 180 до 230

* Достоверность различий между группами “мужчины” и “женщины” в пределах района при $p \leq 0.05$; ^x — достоверность различий по отношению к самому высокому значению между районами соответственно между группами “мужчины” и “женщины” при $p \leq 0.05$.

Согласно данным табл. 5, содержание меди в волосах жителей исследуемых населенных пунктов отличается в зависимости от пола: в среднем по всей территории исследования у женщин концентрация выше — 46.83 мг/кг, чем у мужчин — 21.74 мг/кг. Наибольшие показатели у жителей п. Уньюган — 50.26 мг/кг у мужчин и 134.41 мг/кг у женщин. По содержанию цинка в волосах мужчин и женщин достоверных отличий не установлено.

Обнаруженные количественные различия в содержании микроэлементов в зависимости от пола и возраста свидетельствуют о том, что химический состав волос, помимо природных и антропогенных факторов окружающей среды, зависит от особенностей метаболизма человека.

Для выявления степени влияния содержания различных факторов окружающей среды на элементный состав волос человека проведен корреляционный анализ. Проведена оценка связей между уровнем меди и цинка в биосубстратах (волосы взрослого населения) и их содержанием в окружающей среде (вода, овощная продукция).

Между содержанием меди и цинка в овощных культурах и их уровнем в организме человека не установлено положительной связи.

Взаимосвязь меди и цинка в питьевой воде и в волосах человека характеризуется высокой (для Cu) и функциональной (для Zn) связью, коэффициент корреляции составляет соответственно 0.82 и 0.99. Это указывает на то, что химический состав воды может оказывать значительное влияние на микроэлементный статус населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории Октябрьского района Ханты-Мансийского автономного округа — Югры изучено содержание меди и цинка в системе почва-растение, в воде и в волосах населения, проживающего в различных населенных пунктах территории.

Содержание подвижных форм меди и цинка в почвах исследуемой территории составляет в среднем: меди от 0.57 до 0.85 мг/кг, цинка от 13.5 до 22.53 мг/кг. Согласно агрохимическим градациям, среднее содержание подвижных форм меди и цинка в обследуемых почвах характеризуется как высокое. В то же время превышений гигиенических нормативов по содержанию подвижных форм меди и цинка на исследуемой территории не установлено.

Коэффициент биологического накопления меди и цинка зависит от почвенных условий, биологических особенностей культур и свойств элементов. Коэффициент биологического накопления растениями картофеля, свеклы, моркови для меди выше, чем цинка, что может говорить о высокой доступности меди для растений. В то же время валовое содержание меди в растениях овощных культур ниже, нежели цинка. По результатам анализа отмечаются низкие значения исследуемых микроэлементов в овощных культурах, произрастающих в Октябрьском районе ХМАО-Югры Тюменской области.

Содержание меди в поверхностных и грунтовых водах находится на одинаковом уровне: от 0.02 до 0.04 мг/л, при этом усредненные значения по населенным пунктам не превышают норму. Наиболее высокий уровень содержания цинка был обнаружен в образцах, отобранных из скважин. Среднее содержание цинка в воде составляет 0.65 мг/л, что не превышает ПДК. Отмечена высокая корреляция между уровнем меди и цинка в водных источниках, используемых для питьевого водоснабжения и в волосах населения, проживающего на данной территории.

Накопление микроэлементов, в частности, меди и цинка в организме жителей Октябрьского района ХМАО-Югры Тюменской области определяется рядом фак-

торов: природные (содержание Cu, Zn в объектах окружающей среды), уровень антропогенной нагрузки, включая загрязнение воздуха, воды, почвы, продуктов питания, методы ведения сельского хозяйства, характер питания, образ жизни, генетические факторы, пол, возраст и другие. Обращает на себя внимание значительная вариабельность распределения меди и цинка в зависимости от географического расположения административного района, среди изученных районов жители п. Уньюган имеют повышенное содержание меди и цинка по сравнению с другими районами и установленными физиологическими нормативами. Этот факт требует дополнительного изучения и выявления причин повышенного накопления меди и цинка в волосах. Установленные закономерности следует учитывать при разработке программы экологического и санитарно-эпидемиологического мониторинга территории и при разработке природоохранных мероприятий, и при оптимизации микроэлементного статуса населения.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиева А. К., Кубалова Л. М. Биологическая роль химических элементов в зависимости от положения в периодической системе Д. И. Менделеева // Современные наукоемкие технологии. 2014, с. 83.
2. Добринский Л. Н. Экология ХМАО. // Изд. Софт-Дизайн. Тюмень. 1997, с. 288.
3. Клиническая лабораторная диагностика: национальное руководство: в 1 т. — Т. I / Под ред. В. В. Долгова, В. В. Меньшикова. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012, с. 248-249.
4. Никитин Д. П., Новиков Ю. В. Окружающая среда и человек. — М.: Высшая школа, 1986, с. 415.
5. Протасова Н. А. Микроэлементы: биологическая роль, распределение в почвах, влияние на распространение заболеваний человека и животных // Изд-во Соросовский образовательный журнал, № 12, 1998, с. 32–37.
6. Синдирева А. В., Пузанов Д. О., Букин А. В., Томилова Е. В. Содержание меди и цинка в системе почва-растение на примере Октябрьского района Ханты-Мансийского автономного округа — Югры // Вестник Красноярского государственного аграрного университета, № 6 (159), 2020, pp. 99–104.
7. Скальный А. В., Сальникова Е. В., Кудрявцева Е. А., Кустова А. С. Аккумуляция тяжелых металлов и микроэлементов в волосах населения Оренбургской области // Микроэлементы в медицине, 2012, с. 42–45.
8. Тедеева И. Р., Кубалова Л. М. Биологическая роль меди и ее соединений // Изд. Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова. Владикавказ, 2014, с. 92.
9. Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М., Лайдинен Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам // Институт биологии КарНЦ РАН. / Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007, с. 172.
10. Чижев Б. Е. Лес и нефть Ханты-Мансийского округа — Югры. // Изд. Тюмень. Ю. Мандрики, 1998, с. 105.
11. Шейджен А. Х. Биогеохимия. Майкоп // ГУ- РИПП “Адыгея”, 2003, 1028 с.
12. Giovana Clarice, Poggere Amanda, Gasparin Julierme, Zimmer Barbosa, George Wellington, Melo Rodrigo S., Corrêa Antonio, Carlos Vargas Motta. Soil contamination by copper: sources, ecological risks, and mitigation strategies in Brazil. Journal of trace elements and minerals, 4 (2023):100059-100059. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100059>

13. *Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants // A. Kabata-Pendias. 4th Edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011 548 p.

14. *Kumar, Vinod et al.* Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. // *Chemosphere* vol. 262 (2021): 127810.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810>

15. *Schoofs, Hannah, Joyce Schmit, and Lothar Rink.* 2024. Zinc Toxicity: Understanding the Limits // *Molecules* 29, no. 13: 3130.
<https://doi.org/10.3390/molecules29133130>

Ecological Assessment of the Content of Copper and Zinc in Environmental Objects and in the Hair of the Population in the Oktyabrsky District of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra of the Tyumen Region

A. V. Sindireva^{1, *}, M. A. Belov^{2, **}, D. O. Puzanov^{1, *}, S. S. Veshkurtseva^{1, ****}**

¹*Tyumen State University, Tyumen, Russia*

²*LLC RN-Yuganskneftegaz, Nefteyugansk, Russia*

**E-mail: sindireva72@mail.ru*

***E-mail: m.blvv@yandex.ru*

****E-mail: puzanov31292@mail.ru*

*****E-mail: king805@mail.ru*

Abstract — As part of the research in 2019–2022, an assessment of the content of copper and zinc in environmental components and hair of the population of the Oktyabrsky District of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra of the Tyumen Region was carried out. The content of mobile forms of trace elements in the soils of agrocenoses of the studied area varies depending on the type of soil: copper — from 0.57 to 0.85 mg/kg, zinc — from 13.5 to 22.53 mg/kg. These values do not exceed the maximum permissible concentrations, but are classified as high according to agrochemical gradations. The average content of copper and zinc in vegetable crops growing on the studied soils is: potatoes — copper 0.07 mg/kg, zinc — 0.34 mg/kg; carrots — copper 0.08 mg/kg, zinc — 0.50 mg/kg; beetroot — copper 0.07 mg/kg, zinc — 0.50 mg/kg. No excess of the maximum permissible concentrations was detected. The results of the analysis show that vegetables grown on sod-podzolic and podzolic soils have the highest concentrations of copper and zinc, unlike vegetables growing on gray forest soils.

The average content of copper and zinc in the water bodies of the Oktyabrsky district of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug is: copper — 0.025 mg/l, zinc — 0.65 mg/l, which also does not exceed the permissible values and at the same time is characterized as low.

The content of copper and zinc in the hair of the population permanently residing in the Oktyabrsky district was studied. The dependence of the level of trace elements in biosubstrates on gender, age and place of residence has been established. With age, the average copper and zinc content in the hair of the population increases. The amount of these elements also depends on gender: women (average copper content — 59.65 mg/kg, zinc — 212.47 mg/kg) have more than men (average copper content — 21.87 mg/kg, zinc — 152.53 mg/kg). The relationship between the content of copper and zinc in water and in the hair of the inhabitants of the region has been established, which allows us to conclude that drinking water is one of the sources of these elements for humans.

Keywords: copper, zinc, soils, vegetable crops, water, hair of the population

REFERENCES

1. *Alieva A. K., Kubalova L. M.* Biologicheskaya rol' himicheskikh elementov v zavisimosti ot polozheniya v periodicheskoy sisteme D.I. Mendeleeva // *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii.* 2014, s. 83.
2. *Dobrinskij L. N.* Ekologiya HMAO. // *Izd. Soft-Dizajn. Tyumen'.* 1997, s. 288.
3. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika: nacional'noe rukovodstvo: v 1 t. — T. I / Pod red. V. V. Dolgova, V. V. Men'shikova. — M.: GEOTAR-Media, 2012, s. 248-249.*
4. *Nikitin D. P., Novikov Yu. V.* Okruzhayushchaya sreda i chelovek. — M.: Vysshaya shkola, 1986, s. 415.
5. *Protasova N. A.* Mikroelementy: biologicheskaya rol', raspredelenie v pochvah, vliyanie na rasprostranenie zabolevanij cheloveka i zhivotnyh // *Izd-vo Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal, № 12, 1998, s. 32–37.*
6. *Sindireva A. V., Puzanov D. O., Bukin A. V., and Tomilova E. V.* Soderzhanie medi i cinka v sisteme pochva-rastenie na primere Oktyabr'skogo rajona Hanty-Mansijskogo avtonomnogo okruga — YUgry // *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, № 6 (159), 2020, pp. 99–104.*
7. *Skal'nyj A. V., Sal'nikova E. V., Kudryavceva E. A., Kustova A. S.* Akkumulyaciya tyazhelyh metallov i mikroelementov v volosah naseleniya Orenburgskoj oblasti // *Mikroelementy v medicine, 2012, s. 42–45.*
8. *Tedeeva I. R., Kubalova L. M.* Biologicheskaya rol' medi i ee soedinenij // *Izd Severo-Osetinskij gosudarstvennyj universitet im. K. L. Hetagurova Vladikavkaz, 2014, s. 92.*
9. *Titov A. F., Talanova V. V., Kaznina N. M., Lajdinen G. F.* Ustojchivost' rastenij k tyazhelym metallam // *Institut biologii KarNC RAN. / Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2007, s. 172.*
10. *Chizhov B. E.* Les i neft' Hanty-Mansijskogo okruga — YUgry. // *Izd. Tyumen'. Yu. Mandriki, 1998, s. 105.*
11. *Sheudzhen A. H.* Biogeohimiya. Majkop // *GU- RIPP "Adygeya", 2003, 1028 s.*
12. *Giovana Clarice, Poggere Amanda, Gasparin Julierme, Zimmer Barbosa, George Wellington, Melo Rodrigo S., Corrêa Antonio, Carlos Vargas Motta.* Soil contamination by copper: sources, ecological risks, and mitigation strategies in Brazil." *Journal of trace elements and minerals, 4 (2023):100059–100059.* <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100059>.
13. *Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants // *A. Kabata-Pendias. 4th Edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. 548 p.*
14. *Kumar Vinod et al.* Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. // *Chemosphere vol. 262 (2021): 127810.* <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810>
15. *Schoofs Hannah, Joyce Schmit, and Lothar Rink.* 2024. Zinc Toxicity: Understanding the Limits // *Molecules 29, no. 13: 3130.* <https://doi.org/10.3390/molecules29133130>