

ISSN 2587-5566

Том 88, Номер 6

Ноябрь – Декабрь 2024

ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 88, номер 6, 2024

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

Речной сток крупнейших рек России в условиях современного и сценарного глобального потепления

А. Г. Георгиади, И. П. Милюкова, О. О. Бородин, Е. А. Барабанова 855

Методика дистанционной оценки термических характеристик озер зоны многолетней мерзлоты европейской части России

С. А. Кондратьев, С. Д. Голосов, И. С. Зверев, А. М. Расулова, В. Ю. Крылова, А. В. Ревунова 867

Особенности трансформации состава природных вод при изменении увлажненности ландшафтов Валдайской возвышенности

Д. Ю. Баранов, Т. И. Моисеенко 882

Причины и закономерности быстрых изменений состава взвесей в малой городской реке Сетунь

С. Р. Чалов, О. Д. Лошков, Е. А. Крастынь 893

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

Геоинформационный анализ репрезентативности сети федеральных заповедников и национальных парков России по почвенному разнообразию

А. А. Присяжная, О. В. Чернова, Г. В. Митенко, В. В. Снакин 902

Современное состояние качества воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов

С. В. Ясинский, Е. С. Гришанцева, А. М. Расулова, М. А. Фасахов, А. А. Шайдулина, Е. А. Кашутина 912

Оценка экономического ущерба от негативного воздействия вод на сырьевой потенциал лесов побережий озера Байкал и Иркутского водохранилища

Е. Л. Макаренко 934

CONTENTS

Volume 88, No. 6, 2024

Natural Processes and Dynamics of Geosystems

- Water Flow of the Largest Russian Rivers in Modern and Scenario Global Warming
A. G. Georgiadi, I. P. Milyukova, O. O. Borodin, and E. A. Barabanova 855
- Methodology for Remote Assessment of Thermal Characteristics of Lakes in Permafrost Zone of European Russia
S. A. Kondratyev, S. D. Golosov, I. S. Zverev, A. M. Rasulova, V. Yu. Krylova, and A. V. Revunova 867
- Features of Transformation of the Natural Waters' Composition with Changes in the Humidity of Landscapes of the Valdai Hills
D. Yu. Baranov and T. I. Moiseenko 882
- Drivers and Features of Rapid Suspended Sediment Composition Changes in the Small Urban River Setun
S. R. Chalov, O. D. Loshkov, and E. A. Krastyn 893
-

Natural Resource Use and Geoecology

- Geoinformation Analysis of the Representativeness of the Network of Russian Federal Reserves and National Parks in Terms of Soil Diversity
A. A. Prisyazhnaya, O. V. Chernova, G. V. Mitenko, and V. V. Snakin 902
- Current State of Water Quality in the Reservoirs of the Upper Volga and Kama Cascades
S. V. Yasinsky, E. S. Grishantseva, A. M. Rasulova, M. A. Fasahov, A. A. Shaydulina, and E. A. Kashutina 912
- Assessment of Economic Damage Caused by Negative Impact of Water on the Raw Material Potential of Forests on the Coasts of Lake Baikal and the Irkutsk Reservoir
E. L. Makarenko 934
-
-

УДК 556.5.01

РЕЧНОЙ СТОК КРУПНЕЙШИХ РЕК РОССИИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО И СЦЕНАРНОГО ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

© 2024 г. А. Г. Георгиади^{1,*}, И. П. Милюкова¹, О. О. Бородин^{1,2}, Е. А. Барабанова¹

¹Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

*e-mail: georgiadi@igras.ru

Поступила в редакцию 04.09.2024 г.

После доработки 13.09.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Приведены результаты сравнительного анализа изменений стока крупных рек Русской равнины (Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Невы), Сибири (Оби, Иртыша, Енисея, Ангары, Лены, Вилюя) и Дальнего Востока (Амура) в условиях современного глобального потепления и в период сценарных антропогенных изменений климата в XXI в. Он основан на сопоставлении годового и сезонного стока базового периода и периода современного глобального потепления; расчетах на модели месячного водного баланса, разработанной в Институте географии РАН; оценках изменений годового стока рек, полученных методом среднего многолетнего годового водного баланса и данных об атмосферных осадках и испарении, рассчитанных в рамках программы CMIP5 на ансамбле глобальных климатических моделей для периодов современного и сценарного глобального потепления. В период современного потепления по сравнению с предшествующим базовым периодом на Волге, Каме, Северной Двине, Печоре, Оби, Иртыше, Енисее, Ангаре, Лене и Вилюе наблюдалось повышение годового стока и стока основных гидрологических сезонов, особенно ощутимое в зимний, а также в летне-осенний гидрологические сезоны. Тогда как на Дону, наряду с самым значительным из всех рассмотренных рек относительным увеличением зимнего и заметным ростом летне-осеннего стока, выявлено наибольшее снижение стока половодья, а также годового стока. Установлено совпадение знака изменений годового стока Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены и Вилюя в период современного глобального потепления, рассчитанных по данным наблюдений и по уравнению водного баланса с использованием данных об атмосферных осадках и испарении, полученных осреднением результатов расчетов на ансамбле глобальных климатических моделей программы CMIP5. Относительные сценарные изменения годового стока крупных рек в сравнении со стоком базового периода довольно тесно коррелируют с соответствующими изменениями годовых сумм атмосферных осадков, а сценарные изменения суммарного испарения – с изменениями годовой температуры воздуха.

Ключевые слова: современное и сценарное глобальное потепление, крупные реки, климатические изменения годового и сезонного речного стока, модель месячного водного баланса, уравнение годового водного баланса, глобальные климатические модели общей циркуляции атмосферы и океана

DOI: 10.31857/S2587556624060011, EDN: ALPOEU

ВВЕДЕНИЕ

В связи с современным глобальным потеплением значительное внимание уделяется вопросам исследования многолетних изменений стока воды, который весьма чувствителен к происходящим климатическим изменениям. С 1970–1980-х годов все более значительное внимание уделялось оценке сценарных изменений климата и их последствий, в том числе гидрологических (Будыко, 1980). При разработке методов оценки сценарных изменений основной акцент делался на прогнозе влияния антропогенных факторов, приводивших к росту содержания парниковых

газов в атмосфере в результате хозяйственной деятельности. Представление об антропогенном характере глобального потепления, начиная с 1990-х годов, стало господствующим.

В последние десятилетия в рамках этой парадигмы проведено много исследований посвященных изменениям стока рек России в условиях сценарного антропогенного потепления в XXI в. (Водные ..., 2008; Георгиади, Милюкова, 2002, 2023б; Георгиади и др., 2011, 2014; Георгиевский, Голованов, 2019; Георгиевский и др., 1996; Гусев, Насонова, 2010; Кацов, Говоркова, 2013; Кислов и др., 2008; Мотовилов, Гельфан, 2019; Мохов и др., 2003; Arctic ..., 2021; Gelfan

et al., 2022; Georgiadi, 1991; Georgiadi et al., 2010, 2021; Kalugin, 2023).

Значительное число публикаций посвящено оценке изменений гидрологических характеристик в период инструментальных наблюдений, связанных с современным глобальным потеплением (Болгов и др., 2018; Водные ..., 2008; Георгиади, Кашутина, 2016; Георгиади, Милукова, 2023а, 2023б; Георгиади и др., 2014, 2019; Коронкевич и др., 2023; Научно-прикладной ..., 2021; Шпакова, Wang, 2023; Frolova et al., 2022; Georgiadi and Groisman, 2022, 2023; Georgiadi et al., 2018, 2021, 2023; Milyukova et al., 2020; Sinyukovich et al., 2024).

Отметим, что указанные выше два основных направления исследований изменений речного стока весьма слабо связаны между собой.

Статья посвящена сравнительному анализу изменений стока крупных рек в разных регионах России в условиях современного глобального потепления и в период сценарных антропогенных изменений климата в XXI в. Исследование основано на результатах анализа многолетних рядов наблюдений за стоком рек, в том числе

многолетних рядах восстановленных характеристик речного стока, расчетах на модели месячного водного баланса, разработанной в Институте географии РАН, а также на оценках сценарных изменений годового стока рек, определенных методом годового водного баланса с использованием данных климатических сценариев изменений атмосферных осадков и испарения, полученных в рамках программы CMIP5 на ансамбле глобальных климатических моделей.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Данные о речном стоке. Многолетние ряды характеристик речного стока. Исследование основывалось на многолетних рядах расходов воды крупных рек с близким к естественному водным режимом (Северная Двина — Усть-Пинега, Печора — Усть-Цильма) и рядах с восстановленным стоком (с исключенными из него антропогенными изменениями, то есть приведенным к естественным условиям): Волга — Волгоград, Дон — Раздорская, Обь — Салехард, Иртыш — Тобольск, Енисей — Игарка, Ангара — Пашки

Таблица 1. Средний многолетний сток и исследуемые периоды

Река, створ	Площадь бассейна, тыс. км ²	Средний многолетний сток*, км ³	Рассмотренный период, годы:		
			весь период	базовый период	период современного глобального потепления
Волга — Волгоград	1360	260	1879–2020	1931–1980	1981–2020
Кама — Пермь (Камская ГЭС)	169	53.2	1881–2010	1931–1980	1981–2010
Дон — Раздорская	378 (422**)	24.3 (26.1****)	1891–2019	1931–1980	1981–2019
Сев. Двина — Усть-Пинега	348 (357**)	104.9	1882–2020	1931–1980	1981–2020
Печора — Усть-Цильма	248 (322**)	110.4 (134****)	1932–2020	1932–1980	1981–2020
Обь — Салехард	2450 (2890***)	404	1936–2016	1936–1980	1981–2016
Иртыш — Тобольск	969	69	1891–2016	1931–1980	1981–2016
Енисей — Игарка	2470 (2620**)	592	1936–2016	1936–1980	1981–2016
Ангара — Богучаны	866	110	1945–2016	1945–1980	1981–2016
Ангара — Пашки (Иркутская ГЭС)	571	62.1	1899–2020	1931–1980	1981–2020
Лена — Кюсюр	2430 (2490**)	542	1936–2019	1936–1980	1981–2019
Виллой — Хатырык-Хомо	452 (454**)	48.3	1937–2010	1937–1980	1981–2010

Примечания: * пояснения приведены в этом разделе; ** площадь бассейна до устья; *** площадь бассейна с учетом бессточных территорий; **** наблюдаемый сток в замыкающем створе.

и Богучаны, Лена — Кюсюр, Вилюй — Хатырык-Хомо (табл. 1). Для восстановления многолетних рядов антропогенно-измененного стока использовался метод трансформации годового гидрографа средних суточных расходов воды, основанный на методике Калинина—Милюкова (Калинин, Милюков, 1958). На основе этого метода были получены многолетние ряды восстановленных (условно-естественных) средних суточных расходов воды Дона, Оби, Иртыша, Енисея, Ангары, Лены, Вилюя (Георгиади, Милюкова, 2023а; Arctic ..., 2021; Georgiadi et al., 2023; Milyukova et al., 2020). Ряды стока Ангары у с. Пашки были получены по связям с реконструированными средними месячными уровнями воды Байкала (Sinyukovich et al., 2024), а Волги на основе метода рек индикаторов климатических изменений (Георгиади и др., 2014).

Границы гидрологических сезонов, которые принимались постоянными, были определены на основе анализа многолетних данных о средних суточных и средних месячных расходах воды, а также о средних многолетних данных о замерзании рек и разрушении ледового покрова.

Годовой расчетный сток. Изменения годового стока рек для периода наблюдений и периода сценарных его изменений были рассчитаны на основе метода годового водного баланса и осредненных данных, полученных на ансамбле глобальных климатических моделей программы CMIP5 о годовых атмосферных осадках и годовом испарении и уравнении водного баланса. Расчеты проведены для замыкающих створов рек, перечисленных в табл. 1 (кроме Камы, Иртыша и Ангары), а также для Невы (площадь бассейна 281 тыс. км², годовой наблюдаемый сток 74.3 км³), Днепра (504 тыс. км², 53.5 км³), Амура (1850 тыс. км², 338 км³) и Колымы (635 тыс. км², 123 км³).

Данные глобальных климатических моделей об изменениях атмосферных осадков, испарения и температуры воздуха. Основу для оценок изменений речного стока составили средние ансамблевые климатические сценарии, подготовленные в рамках программы CMIP5 (Meehl and Vony, 2011; KNMI¹). Были использованы те из четырех семейств сценариев, которые характеризуются наиболее (RCP8.5) и наименее (RCP2.6) интенсивным ростом средней глобальной годовой температуры воздуха для периодов 2010–2039 и 2040–2069 гг. Более подробно они рассмотрены в публикациях авторов (Георгиади, Милюкова, 2023; Georgiadi et al., 2021).

В качестве базового, для оценки сценарных и современных изменений годового речного стока, был использован период 1931–1980 гг., а в качестве периода современного глобального потепления — 1981–2010 гг.

Для оценки сценарных изменений годового и сезонного стока Вилюя у с. Хатырык-Хомо в качестве входных данных для проведения расчетов на модели месячного водного баланса (ММББ ИГРАН) были использованы данные сценарных изменений среднемесячных атмосферных осадков и температуры воздуха программы CMIP5, полученные на пяти глобальных климатических моделях (GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-ES, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M) проекта ISI-MIP2-The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project², которые были осреднены для периода 2036–2065 гг. Данные о климатических характеристиках для базового периода относятся к 1971–2001 гг. Они были получены на основе реанализа, проведенного в рамках программы EU WATCH (Harding et al., 2011).

МЕТОДЫ

Метод оценки изменений стока в период современного потепления, основанный на многолетних данных наблюдений

Оценки изменений стока основываются на сравнении средних характеристик стока периода современного глобального потепления и предшествующего ему базового периода, отличающихся между собой климатическими условиями. Такой подход довольно широко используется не только для оценки влияния на речной сток климатических изменений, но также и антропогенных воздействий (Водные ..., 2008; Георгиади и др., 2019; Научно-прикладной ..., 2021). За начало периода современного глобального потепления использовали 1981 г. А базовым служил период с 1930-х годов до 1980 г., принятый для исчисления многолетних норм гидрологических характеристик³.

В качестве временной границы между ними, как правило, принимаются годы из периода 1970–1980 гг. (Водные ..., 2008; Георгиади и др., 2019; Научно-прикладной ..., 2021). Это связано с тем, что примерно в эти годы происходило достаточно заметное повышение температуры воздуха, а также на многих реках наблюдалась смена долговременных фаз пониженного/повышенного стока (Водные ..., 2008; Георгиади, Милюкова, 2023а, 2023б; Георгиади и др., 2011, 2014; Научно-прикладной ..., 2021; Georgiadi and Groisman, 2022, 2023; Georgiadi et al., 2021, 2023). Отметим, однако, что, как было показано на основе анализа долговременных фаз в многолетних изменениях годовой и зимней температуры воздуха (Георгиади, Кашутина, 2016; Георгиади, Милюкова, 2023б; Георгиади и др., 2011, 2014),

² <https://www.isimip.org/> (дата обращения 26.08.2024).

³ Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество: Ежегод. изд. Л., СПб.: 1982–2022 гг.

переход к фазе повышенной годовой и зимней температуры воздуха, осредненной по территории бассейнов крупных рек (Волги, Дона, Печоры, Енисей, Лены), происходил зачастую достаточно постепенно в 1970–1980-е годы. При этом в ряде речных бассейнов, например, в бассейнах Северной Двины, Дона и других, такой переход, особенно для зимней температуры воздуха, отчетливо проявлялся во второй половине 1980-х годов (Даниленко, Георгиади, 2022; Шпакова, Wang, 2023; Georgiadi et al., 2023). Что касается атмосферных осадков, то, как правило, переход к долговременному периоду повышенных атмосферных осадков относится к 1960–1970-м и даже к 1950-м годам (Георгиади, Кашутина, 2016; Георгиади, Милюкова, 2023б; Георгиади и др., 2014). Но в связи с тем, что многолетние ряды атмосферных осадков характеризуются значительной неоднородностью, связанной, в том числе, и с поправками на смачивание, введенными в 1960-е годы (Георгиади, Кашутина, 2016), годы смены контрастных фаз для атмосферных осадков могут определяться недостаточно корректно. Кроме того, годы смены долговременных фаз повышенного/пониженного годового и сезонного стока на одной реке и на реках разных регионов существенно отличаются между собой, а также зачастую не совпадают с началом используемого периода современного глобального потепления / повышения температуры воздуха (Георгиади, Кашутина, 2016; Георгиади, Милюкова, 2023а, 2023б; Георгиади и др., 2014; Frolova et al., 2022).

Модель месячного водного баланса Института географии РАН. Это модель, результаты расчетов на которой и послужили одной из основ для настоящего исследования, была разработана для оценки изменений стока крупных речных бассейнов, вызванных климатическими изменениями в условиях теплых эпох геологического прошлого и в условиях сценарных изменений климата в XXI в. (Георгиади, Милюкова, 2002; Георгиади и др., 2011, 2014). В ее основе лежит уравнение среднего многолетнего месячного водного баланса речных водосборов и расчеты выполняются для ячеек регулярной сетки. Модель прошла апробацию для крупных речных бассейнов, характеризующихся существенно отличающимися условиями формирования стока.

Метод среднего многолетнего годового водного баланса. Оценка среднего многолетнего годового речного стока крупных рек России для условий современного и сценарного (антропогенно-обусловленного) глобального потепления основана на использовании уравнения среднего многолетнего водного баланса и данных о современных и сценарных средних многолетних годовых суммах атмосферных осадков и годового

испарения, полученных осреднением результатов расчетов, проведенных в рамках программы CMIP5 (Георгиади, Милюкова, 2023б; Georgiadi et al., 2021). На основе сравнения расчетных значений годового стока базового периода, периодов современного и сценарного глобального потепления оценивались его относительные изменения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменения речного стока в период современного глобального потепления. *Оценки, полученные на основе многолетних рядов годового и сезонного стока.* Оценки изменений стока основывались на рядах стока рек с близким к естественному водным режимом (Северная Двина — Усть-Пинега, Печора — Усть-Цильма) и рядах с восстановленным стоком (с исключенными из него антропогенными изменениями, то есть стоком, приведенным к естественным условиям): Волга — Волгоград, Дон — Раздорская, Обь — Салехард, Иртыш — Тобольск, Енисей — Игарка, Ангара — Пашки и Богучаны, Лена — Кюсюр, Вилкой — Хатырык-Хомо.

В период современного глобального потепления на реках южного макросклона Русской равнины (Волга — г. Волгоград, Кама — г. Пермь, Дон — станица Раздорская) и северного (Северная Двина — с. Усть-Пинега, Печора — с. Усть-Цильма) и крупнейших арктических рек Сибири (Обь — г. Салехард, Енисей — г. Игарка, Лена — с. Кюсюр) наиболее заметно по сравнению с базовым периодом увеличился зимний сток (рис. 1). Его рост на этих реках составил 18–59%. Также и на Ангаре в створах с. Пашки (вблизи ее истока) и с. Богучаны (недалеко от ее

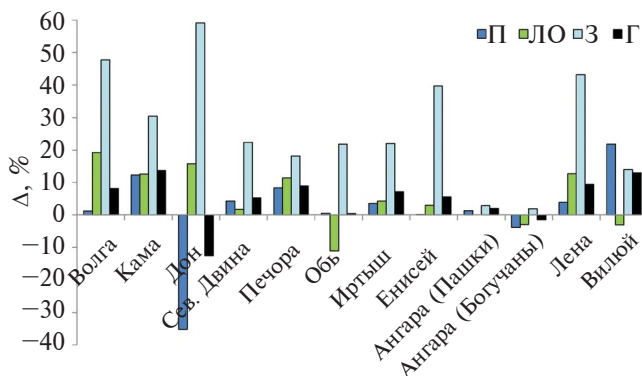


Рис. 1. Относительные изменения (Δ , %) стока половодья (П), летне-осеннего (ЛО), зимнего (З) и годового (Г) стока в период современного глобального потепления (начиная с 1981 г.) в сравнении со стоком базового периода (1930–40-е — 1980 гг.), рассчитанные по многолетним данным о стоке, из которых исключены антропогенные изменения. Информация о створах приведена в табл. 1.

устья) увеличение зимнего стока было наибольшим в сравнении со стоком других гидрологических сезонов и годового стока, но его повышение было малозаметным и составляло соответственно 3 и 2%. На Вилюе в створе пос. Хатырык-Хомо, хотя повышение зимнего стока было весьма значительным (15%), оно было меньше, чем рост стока снегового половодья (почти 24%). Меньшим, но также ощутимым, было увеличение стока снегового половодья на Каме (более 12%) и на Печоре (более 8%).

Также заметным было увеличение летне-осеннего стока на Волге (19%), Дону (около 15%), Печоре и Лене (более 10%). Только на четырех реках наблюдалось уменьшение стока за год и различные сезоны года. Наибольшее снижение стока половодья (более 35%) и годового стока (более 12%) отмечается на Дону, а летне-осеннего стока на Оби (11%). Весьма незначительно снижение стока половодья и летне-осеннего стока выявлено на Ангаре у с. Богучаны и летне-осеннего стока на Вилюе.

Характер различий в стоке между периодом современного глобального потепления и базовым периодом во многом обусловлен особенностями долговременных фаз повышенного/пониженного годового стока и стока основных гидрологических сезонов (их продолжительностью, временем смены контрастных фаз, масштабом различий их среднего стока). При этом наибольшая разница в стоке контрастных фаз отмечается для зимнего сезона (также, в большей мере, это характерно для летне-осеннего сезона, прежде всего на реках южного макросклона Русской равнины). Самые значительные различия в зимнем стоке сравниваемых периодов связаны с тем, что, как правило, с 1930-х годов наблюдались две длительные контрастные фазы. В базовый период формировалась фаза пониженного стока, а в период современного глобального потепления фаза повышенного стока. При этом смена этих фаз произошла на рубеже 1970–1980-х годов, то есть в начале периода современного глобального потепления. Исключение, например, составляет Ангара, на которой формировались относительно короткие контрастные фазы и в сравниваемые периоды (базовый и период современного потепления) наблюдались по две таких фазы в каждом из них, что и приводило к незначительной разнице в среднем стоке между ними.

Оценки изменения годового стока, полученные на основе средних ансамблевых модельных климатических данных и уравнения водного баланса. Они основаны на сравнении результатов расчетов годового стока Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены и Вилюя для периода современного глобального потепления (1981–2010 гг.) и для базового периода (1931–1980 гг.),

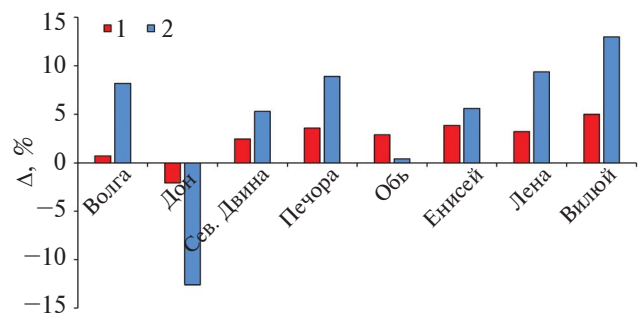


Рис. 2. Относительные изменения годового стока (Δ , %) в период современного глобального потепления в сравнении со стоком базового периода, рассчитанные по уравнению водного баланса и данным об атмосферных осадках и температуре воздуха, осредненным по ансамблю глобальных климатических моделей программы CMIP5 (1), и по многолетним данным о стоке с исключенными антропогенными изменениями (2).

полученных по уравнению среднего многолетнего годового водного баланса с использованием модельных климатических данных о средних ансамблевых годовых суммах атмосферных осадков и испарении, осредненных по территории речных бассейнов. Эти оценки по знаку изменений среднего годового стока совпадают с аналогичными оценками, полученными на основе многолетних рядов данных о восстановленном (условно-естественном) годовом стоке (рис. 2). Однако разница в стоке двух сравниваемых периодов, рассчитанная на основе модельных данных для большинства рек меньше разницы в годовом стоке, определенной для тех же рек по наблюдаемым данным за исключением Оби. При этом относительные изменения стока, полученные двумя методами достаточно тесно связаны между собой ($R^2 = 0.68$).

Сценарные изменения стока. *Годовой и сезонный сток по данным расчетов на модели месячного водного баланса Института географии РАН.* Сравнение характера изменений годового и сезонного стока Вилюя, Волги и Дона в условиях современного и сценарного глобального потепления, рассчитанных, соответственно, по данным наблюдений (см. рис. 1) и по результатам численных экспериментов на ММВБ ИГ РАН и сценарным данным об атмосферных осадках и температуре воздуха, осредненным по ансамблю глобальных климатических моделей программы CMIP5, показывает как сходства, так и различия в оценках сценарных изменений годового и сезонного стока на этих реках (рис. 3).

Для Волги как в условиях наблюдаемого потепления, так и в условиях наиболее и наименее интенсивного глобального потепления в сценарный период (2010–2039 гг.) зимний и годовой сток, а также сток половодья увеличивается.

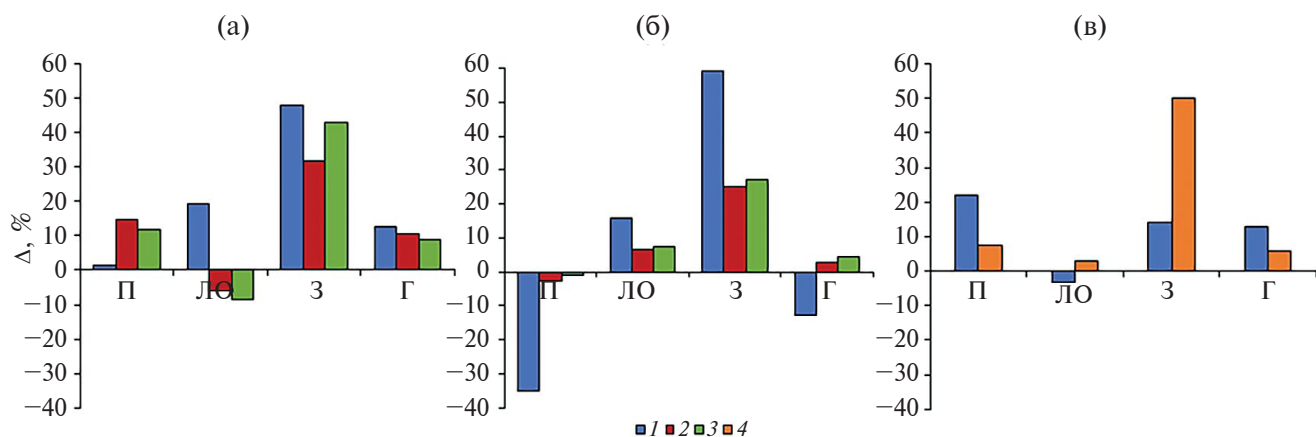


Рис. 3. Относительные изменения (Δ , %) годового стока (Г), стока половодья (П), летне-осеннего (ЛО) и зимнего (З) стока Волги (а), Дона (б) и Вилуя (в): в период современного глобального потепления в сравнении со стоком базового периода рассчитанные по многолетним данным о стоке с исключенными антропогенными изменениями (1), в период сценарного потепления в 2010–2039 гг. – по модели месячного водного баланса и сценарным данным об атмосферных осадках и температуре воздуха, осредненным по данным ансамбля глобальных климатических моделей программы CMIP5 для сценариев RCP2.6 и RCP8.5 соответственно в сравнении со стоком базового периода 1931–1980 гг. (2, 3), в период сценарного потепления 2035–2065 гг. – в сравнении со стоком базового периода 1971–2000 гг. (4). Более детальная информация – в тексте.

Тогда как летне-осенний сток в период современного потепления повышается, а в сценарных условиях он может снизиться. При этом при современном наблюдаемом потеплении повышение зимнего и годового стока остается более заметным, чем в сценарных условиях, а сценарное повышение стока половодья может намного превышать изменение его объема, которое наблюдалось в период современного потепления.

На Дону соотношение современных и сценарных изменений аналогично характеру изменений на Волге только для зимнего стока. Тогда как сток половодья на Дону (в отличие от Волги), как при современном, так и сценарном потеплении снижается (в сценарных условиях в гораздо меньшей степени). А вот летне-осенний сток, также как и зимний повышается. При этом

годовой сток в сценарных условиях может увеличиться, тогда как при современном потеплении он снижался.

На Вилуе как при современном, так и сценарном потеплении направленность изменений стока половодья, зимнего и годового стока такая же, как на Волге (см. рис. 3). При этом, однако, сценарные изменения годового стока меньше, а стока половодья больше современного (они зеркальны относительно характера его изменений на Волге). Сценарный же летне-осенний сток на Вилуе может снижаться, тогда как и на Волге и Дону он, вероятно, будет выше современного.

Годовой сток по результатам воднобалансовых расчетов и сценарным данным глобальных климатических моделей. При наименее (RCP2.6)

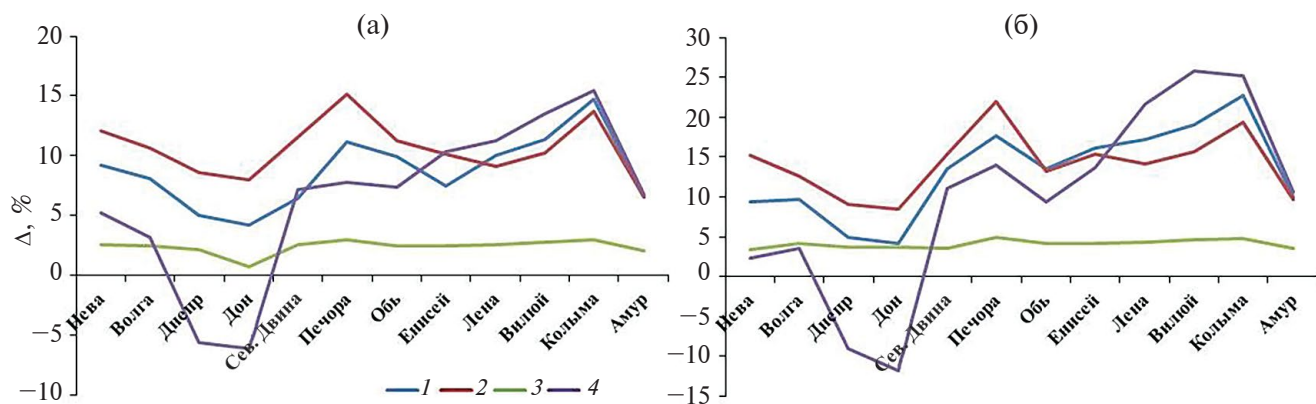


Рис. 4. Сценарные изменения (Δ , %) годовых сумм атмосферных осадков (1), годового испарения (2), годовой температуры воздуха, Δ , °С (3), годового стока в период сценарного потепления 2040–2069 гг. в сравнении со стоком базового периода (4) для сценариев RCP2.6 (а) и RCP8.5 (б).

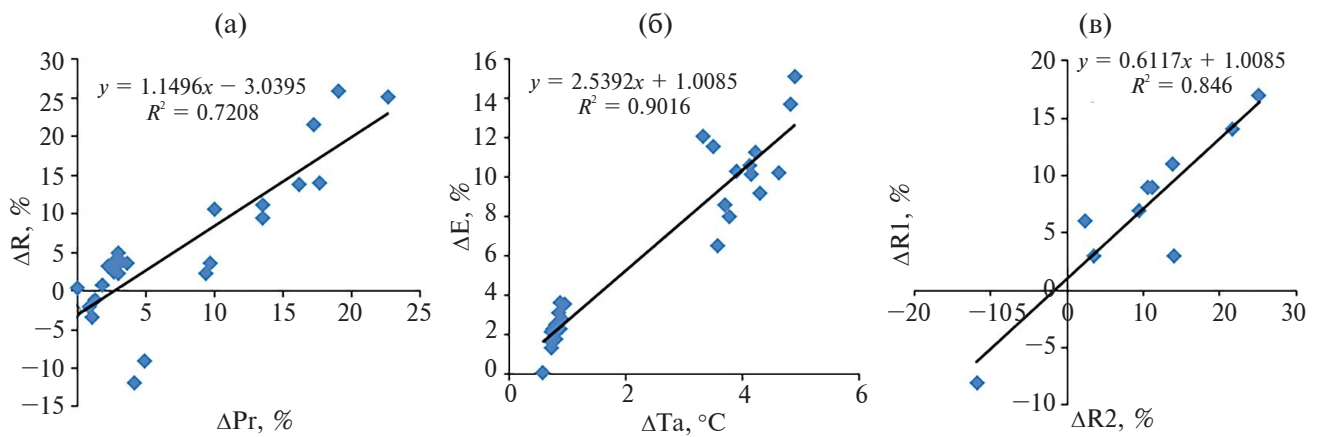


Рис. 5. Регрессионные зависимости между относительными (%) сценарными изменениями, полученными для рассмотренных крупных речных бассейнов по данным ансамбля глобальных климатических моделей по климатическому сценарию RCP8.5 программы CMIP5: (а) годового стока и годовых атмосферных осадков для периода 2040–2069 гг.; (б) годового испарения и годовой температуры воздуха для периода 2040–2069 гг.; (в) годового стока, рассчитанного авторами по уравнению годового водного баланса для периода 2040–2069 гг. (ΔR_2) и полученными в (Георгиевский, Голованов, 2019) для периода 2041–2060 гг., по расчетам на ансамбле глобальных климатических моделей (ΔR_1).

и наиболее (RCP8.5) интенсивном потеплении в 2040–2069 гг. годовая температура воздуха в рассматриваемых крупных речных бассейнах повысится соответственно на 0.8–3.0 и 3.3–4.9°C, годовая сумма атмосферных осадков на 4–15 и 4–22%, а суммарное испарение на 6–15 и 8–22% (рис. 4). Годовой сток в этих условиях для большинства рассмотренных рек может увеличиться соответственно на 3–15 и 3–26%. Только сток Дона и Днепра, вероятно, снизится соответственно на 6–5.5% (сценарий RCP2.6) и 11.8–9% (сценарий RCP8.5).

Сценарные отклонения (%) годового стока рассмотренных рек относительно стока базового периода довольно тесно скоррелированы с соответствующими отклонениями годовых сумм атмосферных осадков (рис. 5а), а сценарные отклонения суммарного испарения — с отклонениями годовой температуры воздуха (рис. 5б).

Приведенные оценки относительных изменений среднего многолетнего годового стока рр. Невы, Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены, Колымы, Амура для сценария RCP8.5 для периода 2040–2069 гг. хорошо согласуются с результатами, полученными ранее (Георгиевский, Голованов, 2019) на основе расчета стока рассмотренных рек, проведенных в гидрологических блоках глобальных климатических моделей для сценария RCP8.5 для периода 2041–2060 гг. (рис. 5в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен сравнительный анализ изменений естественного и восстановленного стока (с исключенными из него заметными антропогенными изменениями) крупных рек Русской равнины

(Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Невы), Сибири (Оби, Иртыша, Енисея, Ангары, Лены, Вилюя) и Дальнего Востока (Амура) в условиях современного глобального потепления и в период сценарных антропогенных изменений климата в XXI в., на основании которого были получены следующие основные результаты.

1. В период современного глобального потепления (начиная с 1981 г.) по сравнению с предшествующим базовым периодом (1931–1980 гг.) на Волге, Каме, Северной Двине, Печоре, Оби, Иртыше, Енисее, Ангаре, Лене и Вилюе наблюдалось повышение годового стока и стока основных гидрологических сезонов, особенно ошутимое в зимний, а также в летне-осенний гидрологические сезоны. Тогда как на Дону наряду с самым значительным из всех рассмотренных рек относительным увеличением зимнего и заметным ростом летне-осеннего стока выявлено наибольшее снижение стока половодья, а также и годового стока. Снижение летне-осеннего стока выявлено на Оби (наиболее заметное) и Вилюе, а на Ангаре у с. Богучаны незначительное уменьшение стока половодья, летне-осеннего и годового стока. Размах (масштаб аномалий) относительных изменений стока в период современного глобального потепления во многом обусловлен особенностями долговременных фаз повышенного/пониженного годового стока и стока основных сезонов (их продолжительностью, временем смены и масштабом различий среднего стока контрастных фаз).

2. Выявлено совпадение направленности изменений годового стока Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены и Вилюя в период современного глобального потепления, рассчитанных по данным наблюдений

и по уравнению водного баланса с использованием данных изменений атмосферных осадков и испарения, полученных осреднением результатов расчетов на ансамбле глобальных климатических моделей программы СМIP5. При этом изменения стока в период современного глобального потепления, рассчитанные по данным наблюдений, оказались на большинстве рассмотренных рек больше модельных за исключением Оби.

3. На Волге, Дону и Вилюе знак изменений годового и сезонного стока в период современного глобального потепления (определенных на основе данных наблюдений и их сценарных изменений, рассчитанных на модели месячного водного баланса Института географии РАН с использованием модельных средних ансамблевых сценариев изменений атмосферных осадков и температуры воздуха программы СМIP5) совпал на трех реках только относительно стока зимнего сезона, когда в том и другом случае были выявлены повышенные его значения. На Волге и Вилюе годовой сток также возрастает как в условиях современного, так и сценарного потепления. В других случаях для каждой из рек характерны соотношения между современными и сценарными изменениями, свойственные каждой из рек.

4. Годовой сток Волги, Невы, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены, Вилюя, Колымы и Амура, рассчитанный по уравнению водного баланса с использованием данных об атмосферных осадках и испарении, полученных осреднением результатов расчетов на ансамбле глобальных климатических моделей программы СМIP5 для 2040–2069 гг. при наименее (RCP2.6) и наиболее (RCP8.5) интенсивном потеплении, может быть выше базового соответственно на 3–15 и 3–26%. Только сток Дона и Днепра, вероятно, снизится соответственно на 6–5.5% (сценарий RCP2.6) и 11.8–9% (сценарий RCP8.5).

5. Относительные сценарные изменения годового стока крупных рек в сравнении со стоком базового периода довольно тесно связаны с соответствующими изменениями годовых сумм атмосферных осадков, а сценарные изменения суммарного испарения с изменениями годовой температуры воздуха.

6. Оценки относительных изменений среднего многолетнего годового стока Невы, Волги, Дона, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены, Колымы, Амура для сценария RCP8.5 для периода 2040–2069 гг. хорошо согласуются с результатами, полученными ранее (Георгиевский, Голованов, 2019) на основе расчета стока рассмотренных рек в гидрологических блоках глобальных климатических моделей для сценария RCP8.5 для периода 2041–2060 гг.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта РФФ 24-27-00143 “Сток рек России в эпохи глобального потепления”.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the RSF 24-27-00143 project “Russian river flow in the era of global warming.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болгов М.В., Филиппова И.А., Осипова Н.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д.* Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. Вып. 145. М.: ИД “Кодекс”, 2018. С. 206–218.
- Будыко М.И.* Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 352 с.
- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.
- Георгиади А.Г., Кашутина Е.А.* Долговременные изменения стока крупнейших сибирских рек // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 5. С. 70–81.
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-70-81>
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П.* Масштабы гидрологических изменений в бассейне реки Волги при антропогенном потеплении климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. С. 72–79.
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П.* Особенности долговременных фаз повышенной и пониженной водности Дона и Лены в XIX–XXI веках // Метеорология и гидрология. 2023а. № 12. С. 104–114.
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-12-104-114>
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П.* Сток Волги в эпохи глобального потепления // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023б. Т. 87. № 6. С. 804–824.
<https://doi.org/10.31857/s2587556623060079>
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милюкова И.П.* О вкладе климатических и антропогенных факторов в изменения стока крупных рек Русской равнины и Сибири // ДАН. 2019. Т. 488. № 5. С. 539–544.
<https://doi.org/10.31857/s0869-56524885539-544>
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А.* Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: Макс Пресс, 2014. 214 с.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кислов А.В., Анисимов О.А., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Бородин О.О.* Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1. Бассейн реки Лены. М.: Макс Пресс, 2011. 179 с.
- Георгиевский М.В., Голованов О.Ф.* Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек

- Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта СМIP5 // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64. Вып. 2. С. 206–218. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.203>
- Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.Л., Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Оценка влияния возможных климатических изменений на гидрологический режим и водные ресурсы рек бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 89–99.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
- Даниленко А.О., Георгиади А.Г. Влияние современного потепления на водный и ионный сток Северной Двины // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 41–47. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-064-069>
- Калинин Г.П., Милуков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс // Труды ЦИП. 1958. Вып. 66. 72 с.
- Катцов В.М., Говоркова В.А. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (СМIP5) // Труды ГГО. 2013. № 569. С. 76–98.
- Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколиксина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов С.М., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс Пресс, 2008. 290 с.
- Коронкевич Н.И., Георгиади А.Г., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милукова И.П. О соотношении климатических и антропогенных факторов в изменении стока Волги // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 6. С. 825–834. <https://doi.org/10.31857/s2587556623060092>
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во РАН, 2019. 300 с.
- Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.К. Оценки возможных изменений регионального гидрологического режима в XXI веке, основанные на глобальных климатических моделях // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2003. № 39. С. 130–144.
- Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб.: ООО “РИАЛ”, 2021. 190 с.
- Шпакова Р.Н., Wang P. Изменение характера многолетних колебаний стока рек Южной Якутии и прилегающих районов российского Дальнего Востока в условиях глобального потепления // Российская Арктика. 2023. Т. 5 (1). С. 33–44. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-1-33-44>
- Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems / D. Yang, D.L. Kane (Eds.). Cham: Springer, 2021. 914 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9>
- Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V. Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data // Water Res. 2022. Vol. 49. P. 333–350. <https://doi.org/10.1134/s0097807822030046>
- Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. Runoff of Russian Rivers under Current and Projected Climate Change: a Review 2. Climate Change Impact on the Water Regime of Russian Rivers in the XXI Century // Water Res. 2022. Vol. 49. P. 351–365. <https://doi.org/10.1134/s0097807822030058>
- Georgiadi A.G. Change of the hydrological cycle under the influence of global warming // IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences). Hydrology for the Water Management of Large River Basins. 1991. P. 119–128.
- Georgiadi A.G., Groisman P.Ya. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of two largest arctic rivers of European Russia, Northern Dvina and Pechora // Environ. Res. Let. 2022. Vol. 17. № 8. P. 1–14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac82c1>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y. Extreme Low Flow during Long-Lasting Phases of River Runoff in the Central Part of the East European Plain // Water. 2023. Vol. 15. № 12. Art. 2146. <https://doi.org/10.3390/w15122146>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term Changes of Water Flow, Water Temperature and Heat Flux of the Largest Siberian Rivers // Polarforschung. 2018. Vol. 87 (2). P. 167–176. <https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.167>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Response of River Runoff in the Cryolithic Zone of Eastern Siberia (Lena River Basin) to Future Climate Warming // Environmental Change in Siberia. Advances in Global Change Research / H. Balzter (Ed.). Dordrecht: Springer, 2010. Vol. 40. P. 157–169. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8641-9_10
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin // Water Res. 2021. Vol. 47. № 6. P. 913–923. <https://doi.org/10.1134/s0097807820060068>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O., Gusarov A.V. Water Flow Changes in the Don River (European Russia) During 1891–2019 // Geography, Environment, Sustainability. 2023. Vol. 16. № 2. P. 6–17. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-083>
- Harding R., Best M., Blyth E., Hagemann S., Kabat P., Tallaksen L.M., Warnaars T., Wiberg D., Weedon G.P., van Lanen H.A. I., Ludwig F., Haddeland I. WATCH: Current knowledge of the Terrestrial global water cy-

- cle // J. Hydrometeorol. 2011. Vol. 12. P. 1149–1156. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-024.1>
- Kalugin A. Climate change effects on river flow in Eastern Europe: Arctic rivers vs. Southern rivers // Climate. 2023. Vol. 11. Art. 103. <https://doi.org/10.3390/cli11050103>
- Meehl G.A., Bony S. Introduction to CMIP5 // CLIVAR exchanges — Special Issue: WCRP Coupled Model Intercomparison Project — Phase 5 — CMIP5. 2011. № 56. Vol. 16. P. 4–5.
- Milyukova I., Georgiadi A., Borodin O. Long-term changes in water flow of the Volga basin rivers // E3S Web Conf. 2020. Vol. 163. Art. 05008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305008>
- Sinyukovich V.N., Georgiadi A.G., Groisman P.Y., Borodin O.O., Aslamov I.A. The Variation in the Water Level of Lake Baikal and Its Relationship with the Inflow and Outflow // Water. 2024. Vol. 16. № 4. Art. 560. <https://doi.org/10.3390/w16040560>

Water Flow of the Largest Russian Rivers in Modern and Scenario Global Warming

A. G. Georgiadi^{a,*}, I. P. Milyukova^a, O. O. Borodin^{a,b}, and E. A. Barabanova^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: georgiadi@igras.ru

The results of a comparative study of the changes in the flow of the large rivers of the Russian Plain (Volga, Don, Northern Dvina, Pechora, Neva rivers), Siberia (Ob, Irtysh, Yenisei, Angara, Lena, Vilyui rivers) and the Far East (Amur River) under conditions of modern global warming and during the period of scenario anthropogenic climate changes in the 21st century are presented. It is based on a comparison of the annual and seasonal river runoff of the reference period and the period of modern global warming; calculations based on the monthly water balance model developed at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences; estimates of changes in annual river flow obtained by the method of the average long-term annual water balance and atmospheric precipitation and evaporation data calculated within the framework of the CMIP5 program on an ensemble of global climate models for periods of modern and scenario global warming. During the period of modern global warming, compared with the previous base period, an increase in annual runoff and runoff of the main hydrological seasons was observed on the Volga, Kama, Don, Northern Dvina, Pechora, Ob, Irtysh, Yenisei, Angara, Lena and Vilyui rivers, especially noticeable in winter, as well as in summer-autumn hydrological seasons. Whereas, on the Don, along with the most significant of all the rivers considered, the relative increase in winter runoff, as well as a noticeable increase in summer-autumn runoff, the greatest decrease in snow-melt flood runoff, as well as annual runoff, was revealed. The coincidence of the sign of changes in the annual runoff of the Volga, Don, Northern Dvina, Pechora, Ob, Yenisei, Lena and Vilyui rivers during the period of modern global warming, calculated from observations and the equation of water balance using atmospheric precipitation and evaporation data obtained by averaging the results of calculations on the ensemble of global climate models of the CMIP5 program, has been established. Relative scenario changes in the annual runoff of the Volga, Neva, Northern Dvina, Pechora, Ob, Yenisei, Lena, Vilyui, Kolyma and Amur rivers in comparison with the runoff of the base period correlate quite closely with the corresponding changes in annual atmospheric precipitation amounts, and scenario changes in total evaporation with changes in annual air temperature.

Keywords: modern and scenario global warming, large rivers, climatic changes in annual and seasonal river water flow, monthly water balance model, mean annual water balance equation, global climate models of the general circulation of the atmosphere and ocean

REFERENCES

- Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*. Yang D., Kane D.L., Eds. Cham: Springer, 2021. 914 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50930-9>
- Bolgov M.V., Filippova I.A., Osipova N.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D. Modern features of the hydrological regime of the rivers of the Volga basin. In *Voprosy geografii. Sb. 145* [Problems of Geography. Vol. 145]. Moscow: Kodeks Publ., 2018, pp. 206–218. (In Russ.).
- Budyko M.I. *Klimat v proshlom i budushchem* [Climate in the Past and Future]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1980. 352 p.
- Danilenko A.O., Georgiadi A.G. The influence of modern climate warming on the water flow and major ion flux of the Northern Dvina. *Teoretich. Priklad. Ekol.*, 2022, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-064-069>
- Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchen-

- ko A.I. Streamflow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: A review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data. *Water Resour.*, 2022, vol. 49, pp. 333–350. <https://doi.org/10.1134/s0097807822030046>
- Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. Runoff of Russian Rivers under Current and Projected Climate Change: a Review 2. Climate Change Impact on the Water Regime of Russian Rivers in the XXI Century. *Water Resour.*, 2022, vol. 49, pp. 351–365. <https://doi.org/10.1134/s0097807822030058>
- Georgiadi A.G. Change of the hydrological cycle under the influence of global warming. In *IAHS Publication. Hydrology for the Water Management of Large River Basins*, 1991, pp. 119–128.
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y. Extreme low flow during long-lasting phases of river runoff in the central part of the East European Plain. *Water*, 2023, vol. 15, no. 12, art. 2146. <https://doi.org/10.3390/w15122146>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Ya. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of two largest arctic rivers of European Russia, Northern Dvina and Pechora. *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17, no. 8, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac82c1>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A. Long-term changes in the runoff of the largest Siberian rivers. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2016, no. 5, pp. 70–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-70-81>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of the largest Siberian rivers. *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, pp. 167–176. <https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.167>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Contribution of climatic and anthropogenic factors to changes in the flow of large rivers of the Russian Plain and Siberia. *Dokl. Earth Sci.*, 2019, vol. 488, pp. 1211–1216. <https://doi.org/10.1134/s1028334X19100106>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Sovremennye i stsennarnye izmeneniya rechnogo stoka v basseinakh krupneishikh rek Rossii. Chast' 2. Basseiny rek Volgi i Dona* [Modern and Scenario Changes in River Flow in the Basins of the Largest Rivers in Russia. Part 2. Basins of the Volga and Don Rivers]. Moscow: Max Press Publ., 2014. 214 p.
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kislov A.V., Anisimov O.A., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Borodin O.O. *Stsennarnaya otsenka veroyatnykh izmenenii rechnogo stoka v basseinakh krupneishikh rek Rossii. Chast' 1. Bassein reki Leny* [Scenario Assessment of Probable Changes in River Runoff in the Basins of the Largest Rivers of Russia. Part 1. The Lena River Basin]. Moscow: Max Press Publ., 2011. 179 p.
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. The scale of hydrological changes in the Volga River basin under anthropogenic warming. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2002, no. 2, pp. 72–79. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Peculiarities of long-term phases of the increased and decreased Don and Lena runoff in the 19th–21st Centuries. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, pp. 1066–1075. <https://doi.org/10.3103/S1068373923120075>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and scenario changes in river runoff in the Don basin. *Water Resour.*, 2021, vol. 47, no. 6, pp. 913–923. <https://doi.org/10.1134/s0097807820060068>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Response of river runoff in the cryolithic zone of Eastern Siberia (Lena River basin) to future climate warming. In *Environmental Change in Siberia. Advances in Global Change Research*. Balzter H., Ed. Dordrecht: Springer, 2010, vol. 40, pp. 157–169. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8641-9_10
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Volga runoff in the era of global warming. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2023, vol. 87, no. 6, pp. 804–824. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/s2587556623060079>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O., Gusarov A.V. Water flow changes in the Don River (European Russia) during 1891–2019. *Geogr., Environ., Sustain.*, 2023, vol. 16, no. 2, pp. 6–17. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-083>
- Georgievskii M.V., Golovanov O.F. Forecasting changes in river water resources of Russian Federation based on CMIP5 runoff data. *Vestn. S.-Petersb. Univ. Nauki Zemle*, 2019, no. 2, pp. 206–218. (In Russ.). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.203>
- Georgievsky V.Yu., Yezhov A.V., Shalygin A.L., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I. Assessment of the impact of possible climatic changes on the hydrological regime and water resources of rivers of the former USSR. *Meteorol. Hydrol.*, 1996, no. 11, pp. 89–99.
- Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i vlagobmena poverkhnosti sushy s atmosferoi* [Modeling of Heat and Moisture Exchange Between the Land Surface and the Atmosphere]. Moscow: Nauka Publ., 2010. 327 p.
- Harding R., Best M., Blyth E., Hagemann S., Kabat P., Tallaksen L.M., Warnaars T., Wiberg D., Weedon G.P., van Lanen H.A. I., Ludwig F., Haddeland I. WATCH: Current knowledge of the Terrestrial global water cycle. *J. Hydrometeorol.*, 2011, vol. 12, pp. 1149–1156. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-024.1>
- Kalinin G.P., Milyukov P.I. Approximate calculation of unsteady movement of water masses. *Tr. TsIP*, 1958, no. 66. 72 p. (In Russ.).

- Kalugin A. Climate change effects on river flow in Eastern Europe: Arctic rivers vs. Southern rivers. *Climate*, 2023, vol. 11, art. 103.
<https://doi.org/10.3390/cli11050103>
- Kattsov V.M., Govorkova V.A. Expected surface air temperature, precipitation and annual runoff changes over the territory of Russia: projections with an ensemble of global climate models (CMIP5). *Tr. GGO*, 2013, no. 569, pp. 75–97. (In Russ.).
- Kislov A.V., Evstigneev V.M., Malkhazova S.M., Sokolikhina N.N., Surkova G.V., Toropov S.M., Chernyshev A.V., Chumachenko A.N. *Prognoz klimaticheskoi resursoobespechennosti Vostochno-Evropeiskoi ravniny v usloviyakh potepleniya XXI veka* [Forecast of the East European Plain Climatic Resource Availability in the Conditions of Warming in the 21st Century]. Moscow: Max Press Publ., 2008. 290 p.
- Koronkevich N.I., Georgiadi A.G., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. On the ratio of climatic and anthropogenic factors in the change of the Volga River runoff. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2023, vol. 87, no. 6, pp. 825–834. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/s2587556623060092>
- Meehl G.A., Bony S. Introduction to CMIP5. *CLIVAR exchanges — Special Issue: WCRP Coupled Model Intercomparison Project — Phase 5 — CMIP5*, 2011, no. 56, vol. 16, pp. 4–5.
- Milyukova I., Georgiadi A., Borodin O. Long-term changes in water flow of the Volga basin rivers. *E3S Web Conf.*, 2020, vol. 163, art. 05008.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305008>
- Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.K. Estimates of possible regional hydrologic regime changes in the 21st century based on global climate models. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fizika Atmosf. Okeana*, 2003, no. 39, pp. 130–144. (In Russ.).
- Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachakh gidrologii rechnykh basseinov* [Runoff Formation Models in Challengers of River Basin Hydrology]. Moscow: Izd-vo Ross. Akad. Nauk, 2019. 300 p.
- Nauchno-prikladnoi spravochnik: Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost' vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiiskoi Federatsii* [Applied Scientific Reference Book: Long-term Fluctuations and Variability of Water Resources and Main Characteristics of River Runoff in the Russian Federation]. St. Petersburg: RIAL Publ., 2021. 190 p.
- Shpakova R.N., Wang P. Change in perennial runoff fluctuations of the rivers in South Yakutia in the context of global warming. *Ross. Arktika*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 33–44. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-1-33-44>
- Sinyukovich V.N., Georgiadi A.G., Groisman P.Y., Borodin O.O., Aslamov I.A. The variation in the water level of lake Baikal and its relationship with the inflow and outflow. *Water*, 2024, vol. 16, no. 4, art. 560.
<https://doi.org/10.3390/w16040560>
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use]. Shiklomanov I.A., Ed. St. Petersburg: Gos. Gidrolog. Inst., 2008. 600 p.

УДК 504.455; 519.688; 528.88

МЕТОДИКА ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕР ЗОНЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

© 2024 г. С. А. Кондратьев¹, С. Д. Голосов¹, И. С. Зверев¹, А. М. Расулова^{1,*},
В. Ю. Крылова¹, А. В. Ревунова¹

¹Институт озероведения Российской академии наук — обособленное структурное подразделение ФГБУН
“Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук”,
Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: arasulova@limno.ru

Поступила в редакцию 03.04.2024 г.

После доработки 17.05.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Цель исследования — адаптация методики дистанционной оценки гидротермодинамических характеристик неизученных озер к условиям зоны многолетней мерзлоты Европейской территории России. Основа методики — синтез результатов тематического дешифрирования спутниковых снимков, геостатистической оценки морфометрических характеристик озер и математического моделирования термодинамических процессов в них. В качестве объектов исследования рассмотрены водоемы зоны многолетней мерзлоты трех озерных регионов европейской части России — Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита, прибрежных равнин Баренцева моря и западного склона Урала, в каждом из которых озерные котловины имеют схожее происхождение. Для определения морфометрических характеристик озер использовались базы данных HydroLakes и WORDLAKE, основанные на материалах дистанционного зондирования, литературных источниках и оценках объемов озер по геостатистическим моделям, базирующимся на топографии поверхности. Основной инструмент достижения поставленной цели — универсальная параметризованная одномерная математическая модель гидротермодинамики озера FLake, дополненная блоком теплообмена на границе вода — дно. Модель включена в прогностическую систему COSMO, используемую для составления прогнозов погоды на всей территории страны как средство оценки влияния пресноводных озер на локальный климат. Для задания климатических входных данных в модели использовались данные реанализа семейства ERA5. Выполнены имитационные термогидродинамические расчеты для точек, репрезентативных для рассмотренных озерных регионов в пределах зоны многолетней мерзлоты. Показано, что адаптированная к условиям многолетней мерзлоты методика позволяет оценивать теплообмен в системе атмосфера — лед — водная масса — донные отложения, условия перемешивания и вертикальное распределение температуры в воде и донных отложениях, а также ледовый режим озер.

Ключевые слова: озерный регион, многолетняя мерзлота, математическая модель, теплоперенос в воде и донных отложениях, ледовый покров, реанализ

DOI: 10.31857/S2587556624060025, EDN: ALARYU

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большинство озер площадью до 100 км² зоны многолетней мерзлоты России являются неизученными и малоизученными из-за многочисленности и труднодоступности (Румянцев и др., 2021). Сказанное негативно влияет на планирование хозяйственной деятельности в северных регионах, а также на обоснованность прогнозов возможных изменений термических характеристик озер и их донных отложений в условиях климатических изменений. Отсутствие инструментов и методик коли-

чественной оценки морфометрических параметров неисследованных озер северных регионов и многолетней мерзлоты, в частности, затрудняет точную оценку их термического режима, который напрямую влияет на текущее состояние их экосистем.

В Институте озероведения РАН разработана методика приближенной оценки гидротермодинамических (ГТД) характеристик неизученных озер российской части тундры по данным спутниковой съемки, с использованием геостатистических методов анализа морфометрических параметров озер и результатов математического

моделирования ГТД водных объектов (Zverev et al., 2023). При этом не требуются контактные измерения, что крайне важно для труднодоступных и малоизученных северных территорий нашей страны. Целью настоящего исследования является адаптация методики к условиям зоны многолетней мерзлоты озерных регионов Европейской территории РФ с учетом сезонного промерзания донных отложений озер.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами настоящего исследования являются континентальные озера, находящиеся в зоне многолетнемерзлых пород различной мощности европейской части России. В соответствии с классификацией, предложенной в (Измайлова, 2018), эту зону практически полностью покрывают три озерных региона — Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита, Прибрежные равнины Баренцева моря, Уральская горная страна (западный склон).

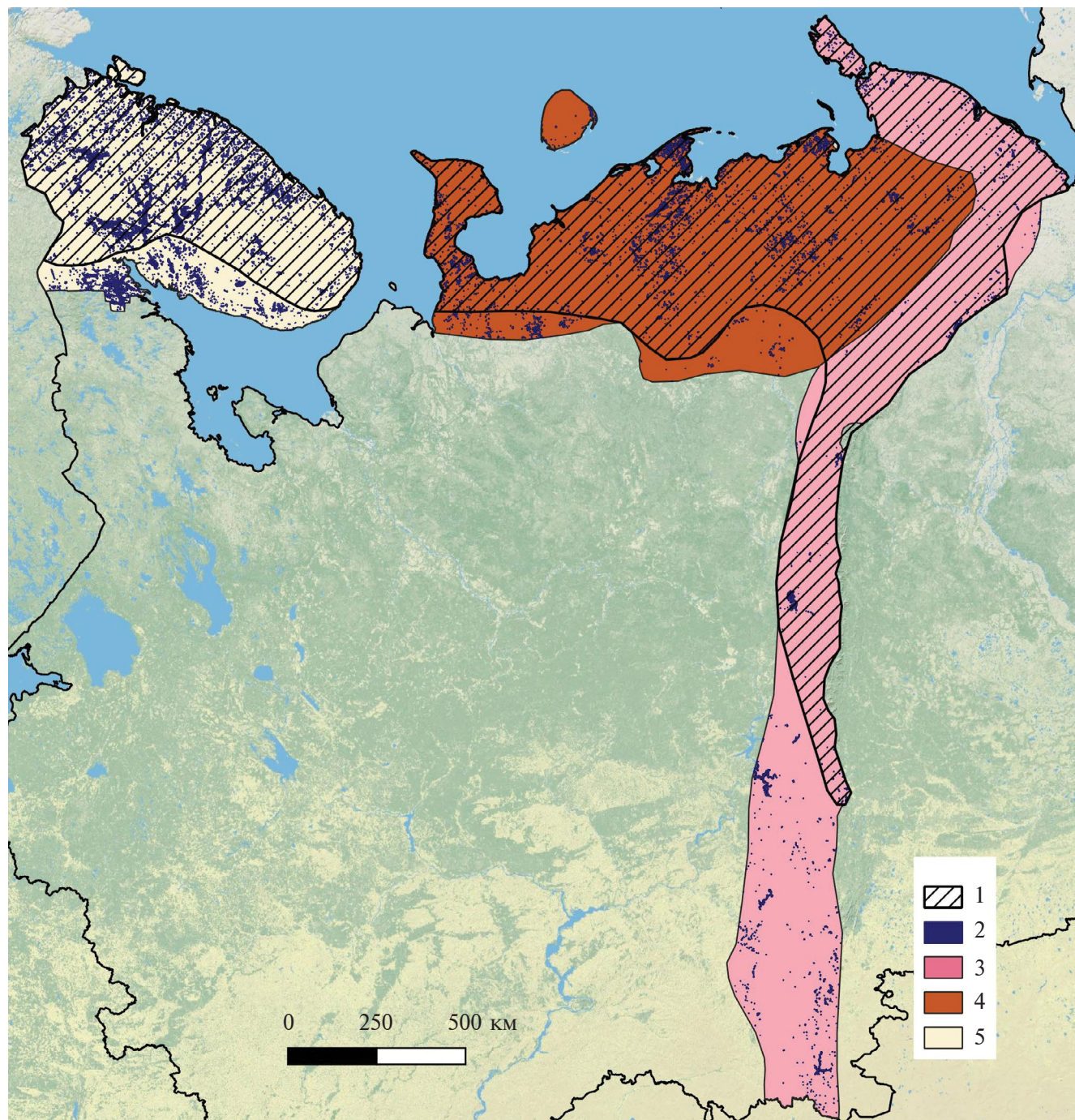


Рис. 1. Схема распространения многолетнемерзлых пород на Европейской территории России: 1 — многолетнемерзлые породы различной мощности, 2 — озера. Озерные регионы: 3 — Уральская горная страна (западный склон), 4 — Прибрежные равнины Баренцева моря, 5 — Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита. *Источник:* (Измайлова, 2018; Национальный ..., 2007).

прибрежные равнины Баренцева моря, Западный склон Уральской горной страны (рис. 1).

Границы распространения многолетнемерзлых пород построены на основе материалов Национального атласа России (Национальный ..., 2007). Следует помнить, что границы и типы мерзлоты существенно зависят от климатических воздействий и постоянно уточняются (Obu et al., 2019).

Одно из основных различий между регионом Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита и двумя другими озерными регионами проявляется в развитии мерзлоты. Отличия озерных регионов во многом связаны с геоморфологическими особенностями и историей их развития. Для Кольского полуострова последним стала осташковская (поздневалдайская) стадия последнего оледенения [низменные участки территории освободились от льда ~11 тыс. л. н. (Korsakova et al., 2020)], для севера Ненецкого автономного округа — ранневалдайская стадия [не позднее 60 тыс. л. н. (Svendsen et al., 2004)]. Вследствие этого на Кольском полуострове до сих пор наблюдаются явления гляциоизостазии, обнаружены следы активных сейсмостектонических событий конца позднего плейстоцена — начала голоцена (Николаева, Евзеров, 2017), что сыграло свою роль в образовании обширных и глубоких озерных котловин.

Суровость геокриологических условий возрастает в восточном направлении, соответственно понижаются и характерные среднегодовые температуры пород. На Кольском полуострове распространение мерзлоты редкоостровное, в основном она приурочена к торфяникам. Существование островов мерзлых пород в Хибинских и Ловозерском горных массивах возможно выше отметок 700–900 м над ур. м., среднегодовые температуры мерзлых пород близки к нулю. Большая часть территории Канино-Тиманского региона расположена в зоне островного распространения мерзлоты, а севернее Каниного Камня — прерывистого. В пределах Большеземельского региона выделяют области сплошного, прерывистого и островного распространения многолетнемерзлых пород, среднегодовые температуры могут опускаться до -5°C . Под озерными котловинами могут существовать талики (Геокриология, 1988).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основные этапы дистанционной оценки характеристик неизученных озер сводятся к следующему алгоритму.

- С использованием средств дистанционного зондирования Земли дешифрируется интересующий объект, находятся его географические координаты и площадь водной поверхности озера.

- На основе геостатистических взаимосвязей между морфометрическими характеристиками для однородной группы водных объектов оценивается глубина озера.

- По географическим координатам водного объекта из баз данных метеорологического реанализа извлекается метеоинформация требуемого для последующих расчетов разрешения.

- Глубина озера и метеоинформация являются входными данными для расчетов теплообмена в системе атмосфера — лед — водная масса — донные отложения, условий перемешивания и вертикального распределения температуры в воде и донных отложениях, а также ледового режима озер по ГТД модели FLake.

Методы дистанционного зондирования позволяют по спутниковым снимкам на территории исследуемых озерных регионов дешифрировать около 400 тыс. озер площадью больше 0.1 км^2 (Измайлова, 2018) из них 9007 имеются в базе данных HydroLakes (Messenger et al., 2016). Поскольку при построении глубин озер в базе данных HydroLakes не учитывались такие зональные факторы, как климат, и азональные, такие как происхождение озерной котловины, в рамках региональных геостатистических зависимостей могут быть отклонения от реальных морфометрических параметров водоемов. Классификация водоемов по озерным регионам с последующей идентификацией аномальных значений и сравнение с реперными позволили компенсировать отсутствие в HydroLakes учета региональных особенностей формы озерных котловин. В качестве реперных водоемов выбраны около 200 морфометрически изученных озер с известным генезисом котловин из базы данных WORLDLAKE (Kochkov and Ryanzhin, 2016). Отклонение между реперными озерами базы WORLDLAKE и ими же в базе данных HydroLakes составило около 2% по глубине.

Морфометрические параметры озерных котловин, как и климатические условия, оказывают сильное влияние на перемешивание водных масс. Для анализа формы озерной котловины использовались следующие морфометрические параметры: площадь поверхности озера, длина береговой линии, коэффициент изрезанности береговой линии, объем озера, средняя глубина, показатель удельного водосбора, показатель открытости и коэффициент глубинности. Предварительный статистический анализ морфометрических параметров водоемов приведен в табл. 1. Наиболее распространенными озерами (примерно 80%) во всех регионах являются водоемы площадью менее 1 км^2 ($0.26\text{--}0.31 \text{ км}^2$) с характерными для них глубинами 4–6 м. При этом наиболее глубокие озера наблюдаются в регионе западного склона Уральской горной страны, а наименее — в регионе прибрежных равнин Баренцева моря.

Таблица 1. Статистические оценки морфометрических характеристик водоемов различных озерных регионов

Характеристика	Мин.	Макс.	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Дисперсия	Асимметрия	Экссесс
Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита ($N = 3558$)								
S	0.10	$1.06 \cdot 10^3$	2.21	0.31	25.12	630.96	30.61	$1.10 \cdot 10^3$
l	1.33	$1.22 \cdot 10^3$	5.85	2.56	30.85	951.92	27.76	920.98
A	1.07	10.58	1.41	1.30	0.45	0.20	8.40	121.26
V	0.17	$1.15 \cdot 10^4$	28.88	1.59	396.24	$1.57 \cdot 10^5$	24.50	645.44
H_{avg}	1.60	87.90	5.83	5.10	3.51	12.29	6.24	97.15
C	0.10	$1.78 \cdot 10^4$	179.77	5.10	$1.08 \cdot 10^3$	$1.18 \cdot 10^6$	11.09	139.63
ΔC	0.16	$7.11 \cdot 10^4$	312.79	11.86	$2.28 \cdot 10^3$	$5.09 \cdot 10^6$	16.79	380.29
S/H_{avg}	0.01	104.28	0.25	0.06	2.10	4.43	37.48	$1.72 \cdot 10^3$
α	1.00	29.27	7.64	7.18	3.11	9.65	1.20	3.14
Прибрежные равнины Баренцева моря ($N = 2828$)								
S	0.10	185.58	0.93	0.28	4.98	24.76	26.64	874.62
l	1.29	124.67	3.56	2.36	5.20	27.01	12.23	226.15
A	1.08	3.75	1.31	1.24	0.21	0.05	3.50	20.46
V	0.07	$2.81 \cdot 10^3$	5.86	1.21	60.51	3661.82	38.24	$1.68 \cdot 10^3$
H_{avg}	0.50	54.50	4.66	4.10	2.92	8.52	3.99	40.48
C	0.10	$3.10 \cdot 10^5$	416.98	2.10	$1.00 \cdot 10^4$	$1.00 \cdot 10^8$	30.43	929.05
ΔC	0.05	$3.05 \cdot 10^6$	$1.6 \cdot 10^3$	5.71	$5.84 \cdot 10^4$	$3.41 \cdot 10^9$	50.54	$2.62 \cdot 10^3$
S/H_{avg}	0.01	54.52	0.29	0.06	1.71	2.94	21.94	599.45
α	0.27	21.92	6.65	6.22	3.44	11.84	0.73	0.63
Западный склон Уральской горной страны ($N = 1052$)								
S	0.10	88.60	0.28	1.01	4.23	17.89	14.31	247.51
l	1.29	257.79	2.60	4.40	9.53	90.91	19.35	484.73
A	1.06	7.73	1.35	1.48	0.45	0.20	4.43	40.88
V	0.10	1628.77	1.10	8.47	60.67	3680.46	20.26	500.28
H_{avg}	0.90	29.10	3.90	4.75	3.09	9.57	2.33	9.13
C	0.10	$6.51 \cdot 10^4$	6.80	554.10	$4.11 \cdot 10^3$	$1.69 \cdot 10^7$	11.10	134.37
ΔC	0.04	$3.12 \cdot 10^5$	13.19	$1.90 \cdot 10^3$	$1.71 \cdot 10^4$	$2.92 \cdot 10^8$	12.82	183.38
S/H_{avg}	0.01	10.13	0.08	0.20	0.56	0.31	11.11	167.16
α	0.79	23.45	5.75	6.57	3.68	13.55	1.15	1.40

Примечание: S — площадь зеркала (км^2), l — длина береговой линии, A — изрезанность береговой линии, V — объем озера (км^3), H_{avg} — средняя глубина (м), C — площадь водосбора (км^2), ΔC — удельный водосбор $\Delta C = C/S$, S/H_{avg} — показатель открытости, α — показатель “глубинности” озера, $\alpha = \frac{H_{avg}}{s^{1/s}}$, N — количество водоемов в выборке.

ГТД условия в водоеме можно оценить из морфометрических параметров. Наиболее наглядно их описывает показатель открытости (см. табл. 1). Показатель открытости озерной котловины характеризует степень устойчивости водных масс к метеорологическим факторам и позволяет судить о динамическом перемешивании водной массы и возможности возникновения термической стратификации. Чем меньше показатель открытости, тем меньше влияет

атмосфера на водную массу озера. Для всех озерных регионов от 65 до 77% водоемов относятся к слабо открытым (показатель открытости менее 0.1), при этом их наибольшее количество среди озер западного склона Уральской горной страны. На водоемы с показателем открытости больше 5.0 (хорошо открытые) приходится менее 1% водоемов в каждом из регионов.

Для получения средних глубин водоемов, которые являются входными параметрами мо-

дели, строились зависимости $H(S)$. Однако при построении зависимостей $H(S)$ для исходных выборок коэффициент достоверности аппроксимации был примерно 11–17%, что является неудовлетворительным для их дальнейшего использования в модели. Низкий коэффициент достоверности аппроксимации связан с неоднородностью выборки, наличием в ней единичных водоемов, существенно отличающихся по своим морфометрическим параметрам от общей массы.

Геостатистические методы обработки выборок были применены для более точной оценки глубин и их взаимосвязи с площадью водоема. Такие методы исследований получили широкое распространение в геологии (Бабушкина и др., 2012; Assibey-Bonsu, 2016), экологии (Паркин и др., 2005) и лимнологии (Chen et al., 2020; Sarah et al., 2011; Szatmári et al., 2022). В настоящее время существует ряд моделей для оценки глубин и объемов озер косвенными методами с использованием геостатистических методов как глобального (Khazaei et al., 2022; Lehner and Döll, 2004; Messenger et al., 2016), так и регионального масштаба (Winslow et al., 2015). Однако глобальные модели на региональном уровне работают с существенными погрешностями. Выбор региональных геоданных в данной работе велся на основе ландшафтного районирования озерных регионов, позволяющего учитывать такие факторы как рельеф, климатические условия, гидрографию, почвенный покров, растительность и т.д. в районах распространения многолетней мерзлоты европейской части России. В исследуемом регионе были выделены генетически единые геосистемы (Румянцев и др., 2015), включающие схожие по происхождению и, соответственно, по морфометрическим параметрам водоемы. Эта методология хорошо зарекомендовала себя при классификации лимнологически неизученных водных объектов (Измайлова, 2018).

Статистический анализ морфометрических параметров водоемов по трем озерным регионам, покрывающим многолетнемерзлые территории Европейской территории России, показал, что распределения каждого из них не являются гауссовскими, имеют правостороннюю асимметрию и положительный эксцесс (см. табл. 1). Распределения такого вида плохо поддаются анализу на идентификацию выбросов с помощью классических статистических критериев (Измайлова и др., 2023). В связи с этим поиск аномальных значений производился с помощью модели двухэтапной кластеризации TwoStep Cluster (Bacher et al., 2004; Shih et al., 2010). Метод двухэтапной кластеризации поиска основан на иерархической кластеризации и состоит из двух этапов: 1) первичное разделение всех данных на максимально возможное число кластеров и

2) минимизация количества кластеров. После чего каждая запись выборки оценивается на принадлежность к тому или иному кластеру модели по ее удаленности от центров кластеров. Среди всей выборки озер по базам HydroLakes было идентифицировано 256 аномальных объектов, которые не учитывались в дальнейшем анализе. Удаление из выборок аномальных значений позволило увеличить коэффициент достоверности аппроксимации примерно до 25–30%, что для некоторых регионов уже можно оценивать, как “умеренную”, но для некоторых регионов зависимости $H(S)$ не достигали достаточной точности для их дальнейшего применения в модели.

Поскольку большинство озер в каждом из регионов имеют площадь до 1 км² выборки были разделены в соответствие с классификацией П.В. Иванова озер по площадям (Иванов, 1948). Данное деление позволило добиться удовлетворительного для применения в модели зависимостей $H(S)$ коэффициента достоверности аппроксимации.

Данные метеорологического реанализа использовались для задания атмосферного воздействия (“форсинга”) на озера. Реанализ объединяет данные детерминированного моделирования с натурными наблюдениями по всему миру в полный и согласованный набор. Принцип такого объединения данных основан на методе ассимиляции, используемый в центрах численного прогнозирования погоды, где каждые несколько часов предыдущий прогноз оптимальным образом комбинируется с новыми доступными наблюдениями для получения новой наилучшей оценки состояния атмосферы. При этом реанализ не связан с необходимостью оперативно выпускать метеорологические прогнозы, а, следовательно, есть больше времени для сбора наблюдений и учета улучшенных версий исходных наблюдений, что благоприятно сказывается на качестве продукта. В настоящей работе в качестве входной информации для гидротермодинамического моделирования служили данные реанализа семейства ERA5¹, который представляет собой ряды восстановленных значений метеорологических параметров для всего земного шара, которые обновляются ежедневно с задержкой около 5 дней. ERA5 — это пятое поколение реанализа для глобального климата и погоды за последние 8 десятилетий. Данные доступны с 1940 г. по настоящее время. ERA5 предоставляет почасовые оценки для большого числа параметров атмосферы, океанических волн и поверхности земли. Временной шаг между сроками “наблюдений” составляет 6 ч, пространственное разрешение реанализа — 0.25° по широте и долготе. Выборка необходимых

¹ Информация о наборе данных ERA5. <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5> (дата обращения 26.04.2024).

для расчетов данных производится по координатам расчетной точки. Для облегчения работы многих климатических приложений рассчитываются также и среднемесячные значения гидрометеорологических параметров.

Рассматриваемые в настоящей работе озера, расположенные в зоне залегания многолетнемерзлых пород, обладают одной важной особенностью — в них практически всегда присутствуют горизонтальная однородность поля температуры и преобладание процессов вертикального переноса тепла над адвективными. При моделировании термического режима водоемов этого класса зачастую достаточно использовать простые одномерные модели, основанные на интегрировании уравнения вертикальной диффузии тепла и различных способах представления вертикального распределения температуры. Такие модели, как правило, основаны на ясных физических предположениях, не требуют задания коэффициентов вертикального турбулентного обмена, просты в реализации и удобны для проведения численных экспериментов. К классу таких моделей как раз относится ГТД модель озера FLake.

Гидротермодинамическая модель озера FLake² является составной частью предложенной методики и разработана совместными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) (Golosov and Kirillin, 2010; Kirillin et al., 2011; Mironov et al., 2010). Модель представляет собой универсальную параметризованную одномерную математическую модель ГТД процессов в озере, в которой реализованы результаты исследований, полученные в ходе многолетних натурных и лабораторных исследований, выполненных на Лимнологической станции Института озероведения РАН, а также последние мировые достижения в области физической лимнологии. В настоящее время FLake служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в природных и искусственных водоемах, используется как учебное пособие при подготовке специалистов экологов и гидрометеорологов. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий широко внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран и Международного Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (Mironov, 2008). Кроме того, прогностическая система COSMO³, используемая и в на-

шей стране для составления прогнозов погоды на всей территории РФ, также включает FLake в качестве средства оценки влияния пресноводных озер на локальный климат по всему миру. Из этого следует, что модель априори может использоваться на неизученных малых и средних водоемах озерных регионов, рассматриваемых в настоящей работе.

На рис. 2 схематично представлено вертикальное распределение температуры в системе снег — лед — водная масса — донные отложения, временная динамика которого рассчитывается в модели. Озеро в модели имеет трехслойную структуру. В период открытой воды (“Лето”) сверху находится верхний перемешанный слой (ВПС) толщиной h . ВПС из-за постоянно присутствующего ветрового/конвективного перемешивания имеет одинаковую по глубине температуру T_s . Ниже ВПС располагается зона термоклина толщиной $D-h$. В термоклине температура воды уменьшается до значения T_D — температуры воды на границе раздела вода — дно. При этом водная масса озера имеет устойчивую плотностную стратификацию, что препятствует проникновению перемешивания, а вместе с ним и тепла в придонную область.

Водная масса озера граничит с деятельным слоем донных отложений, толщина которого $L-D$ определяется наличием в нем сезонных колебаний температуры. Обычно за нижнюю границу деятельного слоя донных отложений принимается глубина, на которой внутригодовые колебания температуры не превышают 10% от колебаний T_D — температуры на границе вода — дно. Поскольку на этой глубине сезонные колебания температуры считаются ничтожно малыми, то температура на нижней границе деятельного слоя T_L принимается постоянной. Толщина самого слоя в озерах умеренных широт варьирует в диапазоне 3–5 м.

С момента образования льда (“Зима”) в модели рассчитываются временная динамика толщины льда li и снежного покрова ls на нем, а также вертикальный профиль температуры как в снегу, так и во льду. В течение зимнего периода температура на границе лед — вода равна температуре замерзания воды — 0°C. Водная масса озера в зимний период в отличие от летнего имеет обратную температурную стратификацию, т.е. температура воды с глубиной увеличивается. Ввиду того, что охлаждение озера происходит вследствие его взаимодействия с атмосферой, т.е. сверху, донные отложения оказываются в зимний период теплее вышележащей водной массы. Это вызывает так называемый “эффект подледного прогрева озера”, когда из-за перераспределения тепла между теплыми донными отложениями и холодной водной мас-

² ГТД модель Flake. <https://www.lakemodel.net> (дата обращения 15.03.2024).

³ Прогностическая система COSMO, Росгидромет. <https://www.meteorf.gov.ru/product/cosmo/> (дата обращения 15.03.2024).

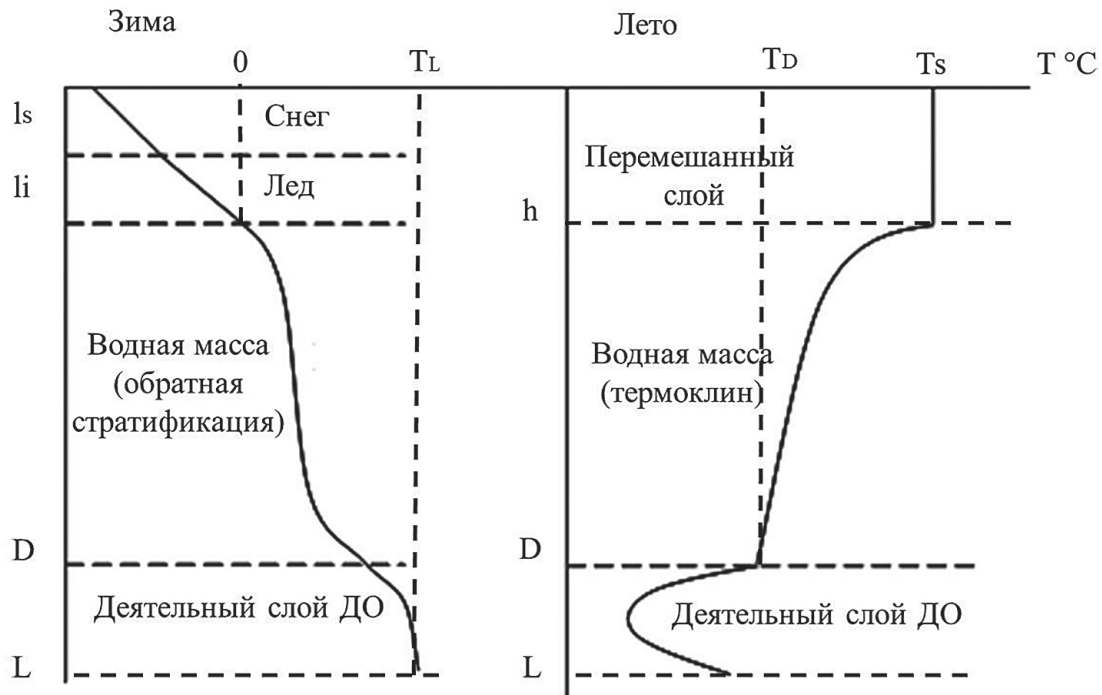


Рис. 2. Схема вертикального профиля температуры T в системе снег — лед — водная масса — донные отложения, реализованная в модели FLake.

сой в последней температура растет в течение всего зимнего периода.

Модель основана на решении одномерного нестационарного уравнения теплопроводности как в водной массе, так и в донных отложениях. При этом вертикальные профили описываются автомодельными представлениями в обеих средах, что позволяет избежать расчета/ задания коэффициентов турбулентного/молекулярного обмена, а саму систему уравнений свести к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Последнее делает модель высокоэффективной с точки зрения затрат вычислительного времени.

Основной особенностью применения модели к озерам, расположенным в зонах залегания многолетнемерзлых пород — “вечной мерзлоты” — является то, что деятельным слоем донных отложений становится так называемый слой сезонного оттаивания (ССО), который не является постоянной величиной и испытывает выраженные сезонные колебания. В период летнего прогрева он увеличивается за счет поступления тепла из атмосферы через водную массу, тогда как в зимний период ССО деградирует за счет отдачи тепла в воду. Таким образом величина L (см. рис. 2) становится дополнительной переменной модели. В ходе выполнения настоящей работы модель FLake была дополнена уравнением для расчета толщины деятельного слоя донных отложений — в данном случае толщины ССО (Zdorovenov et al., 2020).

Несмотря на обширные возможности модели и ее универсальность, водные объекты, к кото-

рым применяется модель, должны удовлетворять следующим условиям:

1) протяженность не должна быть настолько велика, чтобы породить значительные климатические различия между отдельными участками акватории, и не настолько мала, чтобы вторичная ветровая циркуляция играла очень существенную роль;

2) дно должно быть более или менее ровным и горизонтальным, чтобы его можно было аппроксимировать горизонтальной плоскостью;

3) адвективные процессы не должны вносить существенного вклада в турбулентное перемешивание.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения зависимостей средней глубины озера от его площади получены аппроксимационные кривые на основе анализа обработанных данных. Как уже упоминалось выше, наибольшей достоверности аппроксимации удалось добиться при делении озер на три группы по принадлежности к различному диапазону площадей зеркала — 0.1–1.0, 1–10 и 10–100 км² (табл. 2). Теснота связи значений площади озера и его глубины в представленных аппроксимациях оценивается как “умеренная” ($R^2 = 0.3–0.5$) и “заметная” ($R^2 = 0.5–0.7$) (Крылов, Муравьева, 2020).

С целью оценки возможностей модели FLake по выявлению особенностей и закономерностей теплопереноса в озерах зоны многолетней мерзлоты выполнялись имитационные расчеты

Таблица 2. Эмпирические зависимости глубины озера H от его площади S , полученные в результате статистической обработки баз данных HydroLAKES и WORLDLAKE для рассматриваемых озерных регионов и озер различной площади

Площадь, км ²	Количество озер в выборке	Зависимость	Достоверность аппроксимации
Прибрежные равнины Баренцева моря			
0.1–1	2398	$H = 10.712 \cdot S$	0.6539
1–10	377	$H = 1.5844 \cdot S$	0.4312
10–100	25	$H = 0.2406 \cdot S$	0.3892
Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита			
0.1–1	2761	$H = 11.193 \cdot S$	0.6939
1–10	551	$H = 2.3135 \cdot S$	0.5726
10–100	43	$H = 0.2731 \cdot S$	0.4029
Уральская горная страна (западный склон)			
0.1–1	876	$H = 15.239 \cdot S$	0.597
1–10	196	$H = 3.9155 \cdot S$	0.4147
10–100	10	$H = 0.303 \cdot S$	0.3161

для трех гипотетических областей, расположенных на одной широте и в окрестности следующих точек: 1 – 34.58° в.д., 67.81° с.ш. (Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита), 2 – 54.55° в.д., 67.81° с.ш. (прибрежные равнины Баренцева моря), 3 – 59.29° в.д., 67.81° с.ш. (западный склон Уральской горной страны). Координаты расчетных точек выбирались на основе построения центров (барицентров полигонов) регионов, с коррекцией на влияние широты (см. рис. 1). Глубины типичных водоемов для каждого из озерных регионов оценивались на основе геостатистических аппроксимационных зависимостей, приведенных в табл. 2. Для охвата всего спектра возможных глубин в расчетах принимались значения минимальной (0.1 км²) и максимальной площадей (100 км²) зеркала гипотетического озера в рассматриваемом озерном регионе. Таким образом расчеты выполнялись для следующих значений глубин: 1.1 м и 27.0 м (Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита), 1.1 м и 24.0 м (прибрежные равнины Баренцева моря), 1.5 м и 30.3 м (западный склон Уральской горной страны). С использованием данных реанализа ERA5 за период с 1980 по 2022 г. рассчитаны многолетние тренды поверхностной и придонной температуры для озер с перечисленными выше глубинами.

На рис. 3 наиболее наглядно прослеживаются тенденции изменения термических характеристик озер в зависимости от глубины (площади) в условиях меняющегося климата каждого из озерных регионов. Общим для всех трех регионов является то, что в них поверхностная и придонная температуры озер с минимальной глубиной в последние сорок лет имеют выра-

женную тенденцию к увеличению. Их скорости увеличения, тем не менее, разнятся от региона к региону — максимальные приходятся на озера Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита, минимальные наблюдаются на западном склоне Уральской горной страны. По-другому выглядят тренды для озер с максимальной в рассматриваемых озерных регионах глубиной. В них положительная динамика температур наблюдается только для поверхности, в то время как придонная температура имеет практически нулевые тренды в озерах Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита и западного склона Уральской горной страны, а в озерах Прибрежных равнин Баренцева моря этот тренд отрицателен. Объяснением такой ситуации может служить с одной стороны усиливающаяся с прогревом верхних слоев вертикальная плотностная стратификация водных масс, препятствующая поступлению тепла в придонные слои, с другой — охлаждающее на этом фоне влияние многолетнемерзлых пород.

Аналогичные тренды были рассчитаны для толщины льда в озерах рассматриваемых регионов (рис. 4) для озер с минимальными и максимальными глубинами. Ситуация с толщиной льда в озерах выбранных регионов полностью соответствует современным представлениям о потеплении в Арктике. Толщина льда уменьшается в водоемах всех трех регионов, причем скорость уменьшения везде практически одинакова. Образование, нарастание и таяние льда в озерах главным образом является результатом взаимодействия водной массы с атмосферой.

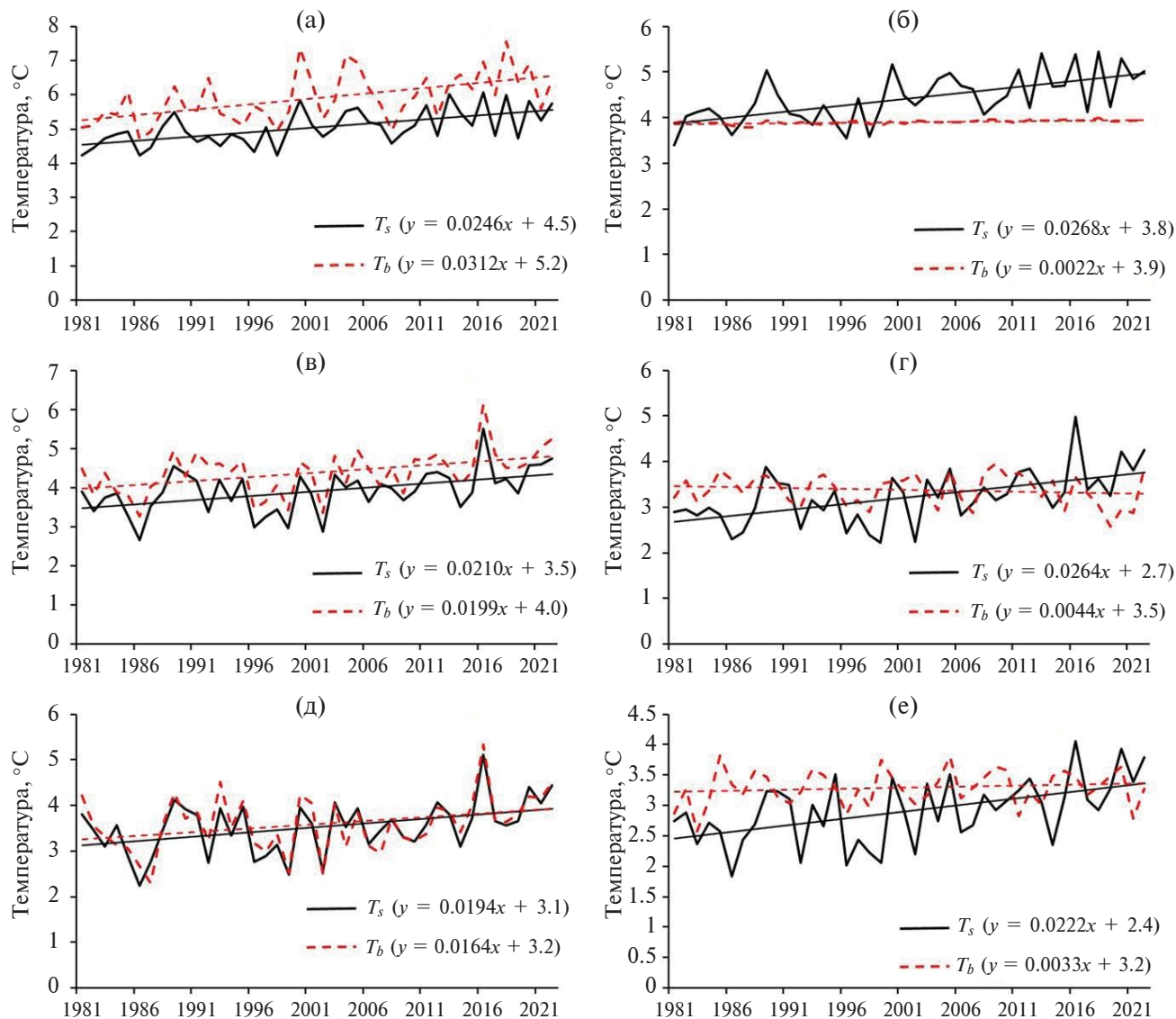


Рис. 3. Многолетние тренды поверхностной (T_s) и придонной (T_b) температуры воды для минимальных (а), (в), (д) и максимальных (б), (г), (е) глубин озер Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита (а), (б), прибрежных равнин Баренцева моря (в), (г) и западного склона Уральской горной страны (д), (е).

Для рассматриваемых озерных регионов выполнены оценки особенностей внутригодовой динамики осредненной по глубине температуры воды и среднемесячных значений потока тепла через границу раздела вода — дно для условий среднеклиматического года (рис. 5).

Данные рис. 5 демонстрируют зональность внутригодового хода средней температуры в озерах регионов. Наиболее теплыми являются озера Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита, за ними следуют водоемы прибрежных равнин Баренцева моря и западного склона Уральской горной страны. Результат достаточно предсказуем, поскольку в озерах Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита проявляется влияние относительно теплого (как минимум незамерзающего) Баренцева моря. Стоит отметить, что максимумы температуры воды синхронны во всех регионах.

Это объясняется широтным эффектом — все модельные озера находятся на одной широте. Результаты расчета теплообмена через границу вода — дно демонстрируют влияние многолетнемерзлых пород на термический режим озер. В озерах всех регионов значительную часть года поток тепла имеет положительные значения, т.е. он направлен из воды в дно. Осенью на короткий период ситуация меняется. В наибольшей степени смена направления потока тепла значима в озерах прибрежных равнин Баренцева моря, где он направлен из донных отложений в воду. Даже в период ледостава, когда в озерах, расположенных вне зоны залегания многолетнемерзлых пород, наблюдается так называемый “эффект подледного прогрева водной массы”, значения потока тепла положительны. Последнее может приводить к образованию льда на поверхности донных отложений в зимний период.

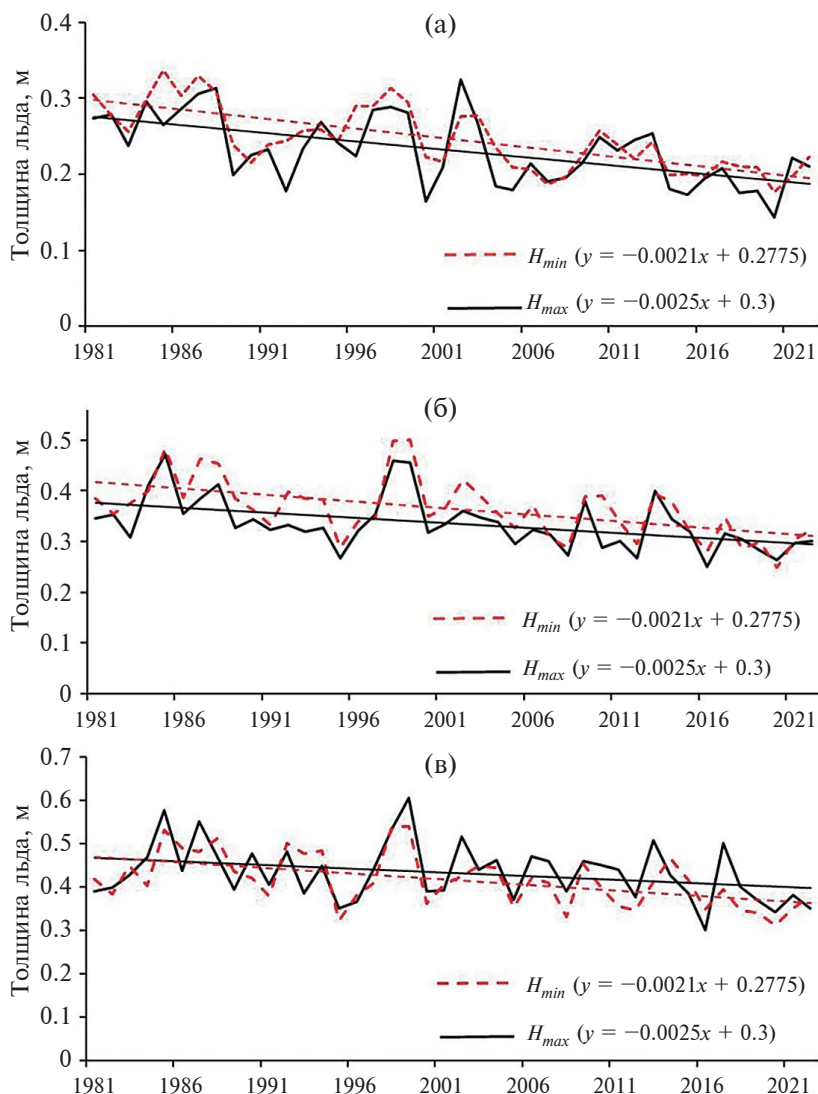


Рис. 4. Рассчитанные тренды толщины льда для минимальных (H_{min}) и максимальных (H_{max}) глубин в озерах Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита (а), прибрежных равнин Баренцева моря (б) и западного склона Уральской горной страны (в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнена адаптация метода дистанционной оценки характеристик неизученных озер к условиям зоны многолетней мерзлоты Европейской территории России. Геостатистическая оценка морфометрических характеристик озер проведена для трех основных озерных регионов (Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита, прибрежные равнины Баренцева моря, западный склон Уральской горной страны) со схожими условиями формирования озерных котловин и ландшафтами. На основе обработанных данных баз HydroLakes и WORLDLAKE для указанных озерных регионов построены аппроксимационные зависимости средней глубины озера от его площади. Параметризованная одномерная математическая модель ГТД процессов FLake дополнена блоком, описывающим теплообмен

на границе вода — дно с учетом наличия многолетнемерзлых пород в донных отложениях.

С использованием данных реанализа ERA5 получены 40-летние тренды в изменчивости поверхностной и придонной температуры озер всех трех регионов, а также толщины льда в них. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что в озерах всего диапазона глубин во всех рассматриваемых зонах присутствуют положительные тренды поверхностной температуры воды. В более глубоких озерах (глубиной от 24.0 до 30.3 м) придонная температура имеет либо нулевые, либо отрицательные тренды. Причиной такой ситуации может служить усиливающаяся с прогревом верхних слоев вертикальная плотностная стратификация водных масс, а также охлаждающее влияние многолетнемерзлых пород. Необходимо отметить, что полученные положительные тренды температуры в рассматриваемых регионах подтверждаются

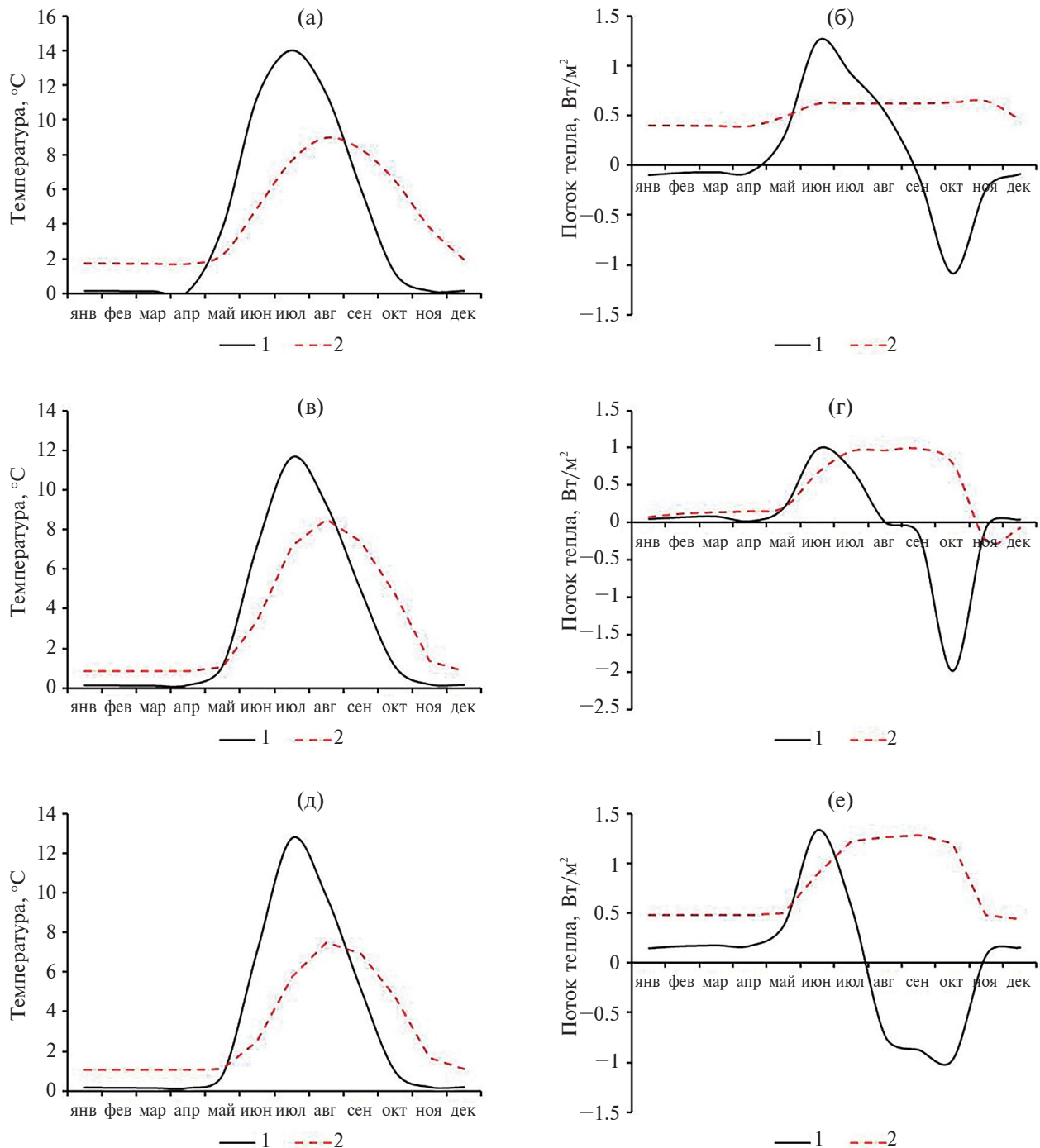


Рис. 5. Рассчитанная внутригодовая динамика средней по глубине температуры воды (а), (в), (д) и потока тепла через границу раздела вода — дно (б), (г), (е) для минимальных (1) и максимальных (2) расчетных глубин в водоемах различных озерных регионов: Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита (а), (б); Прибрежные равнины Баренцева моря (в), (г); западный склон Уральской горной страны (д), (е).

данными Росгидромета о более высокой скорости потепления в Арктике по сравнению с остальными территориями РФ (Доклад ..., 2021).

Аналогичные тренды для толщины льда также соответствует современным представлениям о потеплении в Арктике. Толщина льда уменьшается в водоемах всех трех регионов, причем скорость уменьшения везде практически одинакова. Образование, нарастание и таяние льда в озерах главным образом является результатом взаимо-

действия водной массы с атмосферой, поэтому полученные результаты скорее отражают тенденции атмосферных климатических изменений.

Расчетными методами получены оценки теплообмена через границу раздела вода — дно для арктических озер при наличии в них многолетнемерзлых пород. Показано, что донные отложения практически в течение всего года поглощают тепло из водной массы, что может приводить к образованию льда на их поверхности

в зимний период. Здесь явным образом прослеживается зависимость от средней глубины озер и их местонахождения. На основании выполненных имитационных расчетов можно заключить что с использованием предложенной усовершенствованной методики приближенной оценки ТГД характеристик неизученных озер получены результаты, отражающие основные закономерности формирования термического режима озер зоны многолетней мерзлоты в рассмотренных озерных регионах Европейской территории России.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 24-27-00067 “Методика дистанционной оценки характеристик неизученных озер зоны многолетней мерзлоты с использованием спутниковой информации и математического моделирования”.

FUNDING

The work was supported by the Russian Science Foundation project no. 24-27-00067 “Methodology for remote assessment of the characteristics of unstudied lakes in permafrost zones using satellite information and mathematical modeling”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабушкина Е.В., Русаков В.С., Русаков С.В., Шавнина Ю.Н. Типизация территории методами геостатистического анализа по физико-географическим факторам // Вестн. Пермского ун-та. Математика. Механика. Информатика. 2012. № 1 (9). С. 33–37.
- Вечная мерзлота Кольского полуострова / под ред. И.Я. Баранова. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 180 с.
- Геокриология СССР. Европейская территория СССР / ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1988. 358 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: РОСГИДРОМЕТ, 2021. 104 с.
- Иванов П.В. Классификация озер мира по величине и по их средней глубине // Бюл. ЛГУ. 1948. № 20. С. 29–36.
- Измайлова А.В. Озера России. Закономерности распределения, ресурсный потенциал. СПб.: Папирус, 2018. 288 с.
- Измайлова А.В., Корнеева Н.Ю., Расулова А.М. Выявление уникальных озер с использованием геоинформационных систем на примере Ненецкого автономного округа // Изв. Иркутск. гос. ун-та. Сер.: Науки о Земле. 2023. Т. 43. С. 30–45. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.30>
- Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России в пределах зоны современной мерзлоты // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2009. № 3. С. 33–42.

- Крылов В.Е., Муравьева Н.В. Общая теория статистики: учеб. пособие. Владимир: Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2020. 243 с.
- Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология / гл. ред. А.В. Бородко, гл. ред. тома В.М. Котляков. М.: ПКО “Картография”, 2007. 496 с.
- Николаева С.Б., Евзеров В.Я. К геодинамике Кольского региона в позднем плейстоцене и голоцене: Обзор и результаты исследований // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. 2018. № 1. С. 5–14.
- Паркин Р.А., Каневский М.Ф., Савельева Е.А., Демьянов В.В. Пространственно-временная геостатистика на примере данных радиоэкологического мониторинга // Инженерная экология. 2005. № 1. С. 18–32.
- Румянцев В.А., Дробкова В.Г., Измайлова А.В. Озера европейской части России. СПб.: Лема, 2015. 390 с.
- Assibey-Bonsu W. The basic tenets of evaluating the Mineral Resource assets of mining companies, as observed through Professor Danie Krige’s pioneering work over half a century // J.S. Afr. Inst. Min. Metal. 2016. Vol. 116. № 7. P. 635–643. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n7a5>
- Bacher J., Wenzig K., Vogler M. SPSS TwoStep Cluster — a first evaluation. Nürnberg: Arbeits- und Diskussionspapiere. Universität Erlangen-Nürnberg, Sozialwissenschaftliches Institut, Lehrstuhl für Soziologie, 2004. 32 p.
- Chen Y., Wu L., Zhang G., Xu Y.J., Tan Z., Qiao S. Assessment of Surface Hydrological Connectivity in an Ungauged Multi-Lake System with a Combined Approach Using Geostatistics and Spaceborne SAR Observations // Water. 2020. Vol. 12. № 10. P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/w12102780>
- Golosov S., Kirillin G.A. Parameterized model of heat storage by lake sediments // Environmental Modelling & Software. 2010. Vol. 25. № 6. P. 793–801. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.01.002>
- Khazaei B., Read L.K., Casali M., Sampson K.M., Yates D.N. GLOBathy, the global lakes bathymetry dataset // Sci. Data. 2022. Vol. 9. № 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01132-9>
- Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmann G. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // Environ. Modelling & Software. 2011. Vol. 26. № 5. P. 683–684. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.12.004>
- Kochkov N.V., Ryanzhin S.V. A method of assessing lake morphometric characteristics with the use of satellite data // Water Res. 2016. Vol. 43. № 1. P. 15–20. <https://doi.org/10.1134/s0097807816010103>
- Korsakova O., Tolstobrov D., Nikolaeva S., Kolka V., Tolstobrova A. Lake Imandra depression in the Late Glacial and early Holocene (Kola Peninsula, north-western Russia) // Baltica. 2020. Vol. 33. № 2. P. 177–190. <https://doi.org/10.5200/baltica.2020.2.5>
- Lehner B., Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // J. Hydrol. 2004. Vol. 296. № 1–4. P. 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.028>

- Messenger M., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O.* Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach // *Nat. Commun.* 2016. Vol. 7. № 1. Art 13603.
https://doi.org/10.1038/ncomms13603
- Mironov D.V.* Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model. COSMO Technical Report No. 11. Offenbach am Main: German Weather Service, 2008. 44 p.
- Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A.* Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO // *Boreal Environ. Res.* 2010. Vol. 15. P. 218–230.
- Obu J., Westermann S., Bartsch A., et al.* Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // *Earth-Science Reviews.* 2019. Vol. 193. P. 299–316.
https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023
- Rumyantsev V.A., Izmailova A.V., Makarov A.S.* Status of the lake fund of the Arctic zone of the Russian Federation // *Herald of the Russian Academy of Sciences.* 2021. Vol. 91. № 1. P. 26–36.
https://doi.org/10.1134/s101933162101007X
- Sarah S., Jeelani G., Ahmed S.* Assessing variability of water quality in a groundwater-fed perennial lake of Kashmir Himalayas using linear geostatistics // *J. Earth Syst. Sci.* 2011. Vol. 120. P. 399–411.
https://doi.org/10.1007/s12040-011-0081-6
- Shih M.-Yi, Jheng J.-W., Lai L.-F.* A Two-Step Method for Clustering Mixed Categorical and Numeric Data // *J. of Applied Sci. and Engineering.* 2010. Vol. 13. № 1. P. 11–19.
https://doi.org/10.6180/jase.2010.13.1.02
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I., et al.* Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // *Quat. Sci. Rev.* 2004. Vol. 23. P. 1229–1271.
https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.008
- Szatmári G., Kocsis M., Makó A., Pásztor L., Bakacsi Z.* Joint Spatial Modeling of Nutrients and Their Ratio in the Sediments of Lake Balaton (Hungary): A Multivariate Geostatistical Approach // *Water.* 2022. Vol. 14. № 3. Art. 361.
https://doi.org/10.3390/w14030361
- Winslow L.A., Read J.S., Hanson P.C., Stanley E.H.* Does lake size matter? Combining morphology and process modeling to examine the contribution of lake classes to population-scale processes // *Inland Waters.* 2015. Vol. 5. № 1. P. 7–14.
https://doi.org/10.5268/IW-5.1.740
- Zverev I.S., Golosov S.D., Kondratiev S.A., Rasulova A.M.* Procedure for Remote Assessment of the Characteristics of Unexplored Lakes in the Continental Part of the Russian Tundra // *Doklady Earth Sci.* 2023. Vol. 511. № 2. P. 726–731.
https://doi.org/10.1134/s1028334X23600779

Methodology for Remote Assessment of Thermal Characteristics of Lakes in Permafrost Zone of European Russia

S. A. Kondratyev^a, S. D. Golosov^a, I. S. Zverev^a, A. M. Rasulova^{a,*},
V. Yu. Krylova^a, and A. V. Revunova^a

^a*Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

**e-mail: arasulova@limno.ru*

The purpose of the study is to adapt the methodology of remote assessment of hydrothermodynamic characteristics of unstudied lakes to the conditions of the European Russia's permafrost zone. The basis of the methodology is the synthesis of the results of thematic interpretation of satellite images, geostatistical assessment of their morphometric characteristics of lakes and mathematical modeling of thermodynamic processes in them. The objects of study are the permafrost zone reservoirs of three lake regions of the European Russia: the Kola segment of the Baltic Shield, the coastal plains of the Kara Sea and the western slope of the Ural Mountains, in each of which the lake basins have a similar origin. To determine the morphometric characteristics of unstudied lakes, the HydroLakes and WORDLAKE databases were used, based on remote sensing materials, literature sources and estimates of lake volumes using geostatistical models based on surface topography. The main tool for achieving this goal is a universal parameterized one-dimensional mathematical model of the hydrothermodynamics of the lake FLake, supplemented by a heat exchange block at the water-bottom boundary. The model is included in the COSMO forecasts' system, which is used to compile weather forecasts throughout the Russian Federation as a means of assessing the influence of freshwater lakes on the local climate. To specify climate input data into the model, reanalysis materials from the ERA5 family were used. Thermohydrodynamic calculations were performed for points representative of the considered lake regions within permafrost zones. It is shown that the technique adapted to the conditions of permafrost allows one to evaluate heat exchange in the system atmosphere — ice — water mass — bottom sediments, as well as the vertical distribution of temperature in water and bottom sediments.

Keywords: lake region, permafrost, mathematical model, heat transfer in water and bottom sediments, ice cover, reanalysis

REFERENCES

- Assibey-Bonsu W. The basic tenets of evaluating the Mineral Resource assets of mining companies, as observed through Professor Danie Krige's pioneering work over half a century. *J.S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 2016, vol. 116, no. 7, pp. 635–643. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n7a5>
- Babushkina E.V., Rusakov V.S., Rusakov S.V., Shavni-na Yu.N. Area typing by geostatistical analysis based on physical and geographical factors. *Vestn. Perm. Univ.*, 2012, no. 1, pp. 33–37. (In Russ.).
- Bacher J., Wenzig K., Vogler M. *SPSS TwoStep Cluster — a First Evaluation*. Nürnberg: Arbeits- und Diskussionspapiere. Universität Erlangen-Nürnberg, Sozialwissenschaftliches Institut, Lehrstuhl für Soziologie, 2004.
- Chen Y., Wu L., Zhang G., Xu Y.J., Tan Z., Qiao S. Assessment of surface hydrological connectivity in an ungauged multi-lake system with a combined approach using geostatistics and spaceborne SAR observations. *Water*, 2020, vol. 12, no. 10, art. 2780. <https://doi.org/10.3390/w12102780>
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god* [Report on the Peculiarities of the Climate in the Territory of the Russian Federation for 2020]. Moscow: Rosgidromet, 2021. 104 p.
- Geokriologiya SSSR. Evropeiskaya territoriya SSSR* [Geocryology of the USSR. European Territory of the USSR]. Ershova E.D., Ed. Moscow: Nedra Publ., 1988. 358 p.
- Golosov S., Kirillin G.A. Parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environ. Model. Softw.*, 2010, vol. 25, no. 6, pp. 793–801. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.01.002>
- Khazaei B., Read L.K., Casali M., Sampson K.M., Yates D.N. GLOBathy, the global lakes bathymetry dataset. *Sci. Data*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01132-9>
- Ivanov P.V. Classification of the world's lakes by size and by their average depth. *Byull. Leningr. Gos. Univ.*, 1948, no. 20, pp. 29–36. (In Russ.).
- Izmailova A.V. *Ozera Rossii. Zakonomernosti raspredeleniya, resursnyi potentsial* [Lakes of Russia. Patterns of Distribution, Resource Potential]. St. Petersburg: Papirus Publ., 2018. 288 p.
- Izmailova A.V., Korneenkova N.Yu., Rasulova A.M. Identification of unique lakes using geographic information systems using the example of the Nenets autonomous okrug. *Izv. Irkut. Gos. Univ.*, 2023, vol. 43, pp. 30–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.30>
- Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmann G. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environ. Model. Softw.*, 2011, vol. 26, no. 5, pp. 683–684. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.12.004>
- Krylov V.E., Muravyova N.V. *Obshchaya teoriya statistiki: ucheb. posobie* [General Theory of Statistics: Textbook]. Vladimir: Izd-vo Vladimir. Gos. Univ., 2020. 243 p.
- Kochkov N.V., Ryanzhin S.V. A method of assessing lake morphometric characteristics with the use of satellite data. *Water Resour.*, 2016, vol. 43, no. 1, pp. 15–20. <https://doi.org/10.1134/s0097807816010103>
- Korsakova O., Tolstobrov D., Nikolaeva S., Kolka V., Tolstobrova A. Lake Imandra depression in the Late Glacial and early Holocene (Kola Peninsula, north-western Russia). *Baltica*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 177–190. <https://doi.org/10.5200/baltica.2020.2.5>
- Kravtsova V.I. Distribution of thermokarst lakes of Russia within the permafrost zone. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 5: Geogr.*, 2009, no. 3, pp. 33–42. (In Russ.).
- Lehner B., Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *J. Hydrol.*, 2004, vol. 296, no. 1–4, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.028>
- Messenger M., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nat. Commun.*, 2016, vol. 7, no. 1, art. 13603. <https://doi.org/10.1038/ncomms13603>
- Mironov D.V. *Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model. COSMO Technical Report No. 11*. Offenbach am Main: German Weather Service, 2008.
- Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environ. Res.*, 2010, vol. 15, pp. 218–230.
- Natsional'nyi atlas Rossii. Tom 2. Priroda. Ekologiya* [National Atlas of Russia. Vol. 2. Nature. Ecology]. Borodko A.V., Kotlyakov V.M., Eds. Moscow: PKO Kartografiya, 2007. 496 p.
- Nikolaeva S.B., Evzerov V.Ya. On geodynamics of the Kola region in the later Pleistocene and Holocene: the review and result of the studies. *Vestn. Voronezh. Gos. Univ., Ser. Geol.*, 2018, no. 1, pp. 5–14. (In Russ.).
- Obu J., Westermann S., Bartsch A., et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Sci. Rev.*, 2019, vol. 193, pp. 299–316. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>
- Parkin R.A., Kanevskii M.F., Savel'eva E.A., Dem'yanov V.V. Spatiotemporal geostatistics using radioecological monitoring data as an example. *Inzh. Ekol.*, 2005, no. 1, pp. 18–32. (In Russ.).
- Rumyantsev V.A., Drabkova V.G., Izmailova A.V. *Ozera Evropeiskoi chasti Rossii* [Lakes of the European Part of Russia]. St. Petersburg: Lema Publ., 2015. 390 p.
- Rumyantsev V.A., Izmailova A.V., Makarov A.S. Status of the lake fund of the Arctic zone of the Russian Federation. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2021, vol. 91, no. 1, pp. 26–36. <https://doi.org/10.1134/s101933162101007X>

- Sarah S., Jeelani G., Ahmed S. Assessing variability of water quality in a groundwater-fed perennial lake of Kashmir Himalayas using linear geostatistics. *J. Earth Syst. Sci.*, 2011, vol. 120, pp. 399–411.
<https://doi.org/10.1007/s12040-011-0081-6>
- Shih M.-Yi, Jheng J.-W., Lai L.-F. A Two-Step method for clustering mixed categorical and numeric data. *J. Appl. Eng. Sci.*, 2010, vol. 13, no. 1, pp. 11–19.
<https://doi.org/10.6180/jase.2010.13.1.02>
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I., et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quat. Sci. Rev.*, 2004, vol. 23, pp. 1229–1271.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.008>
- Szatmári G., Kocsis M., Makó A., Pásztor L., Bakacsi Z. Joint spatial modeling of nutrients and their ratio in the sediments of Lake Balaton (Hungary): A multivariate geostatistical approach. *Water*, 2022, vol. 14, no. 3, art. 361.
<https://doi.org/10.3390/w14030361>
- Vechnaya merzlota Kol'skogo poluostova* [Permafrost of the Kola Peninsula]. Moscow: Nauka Publ., 1953. 180 p.
- Winslow L.A., Read J.S., Hanson P.C., Stanley E.H. Does lake size matter? Combining morphology and process modeling to examine the contribution of lake classes to population-scale processes. *Inland Waters*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 7–14.
<https://doi.org/10.5268/IW-5.1.740>
- Zverev I.S., Golosov S.D., Kondrat'ev S. A., Rasulova A.M. Procedure for remote assessment of the characteristics of unexplored lakes in the continental part of the Russian tundra. *Dokl. Earth Sci.*, 2023, vol. 511, no. 2, pp. 726–731.
<https://doi.org/10.1134/s1028334X23600779>

УДК 556.114:556.314

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УВЛАЖНЕННОСТИ ЛАНДШАФТОВ ВАЛДАЙСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

© 2024 г. Д. Ю. Баранов¹*, Т. И. Моисеенко¹¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*e-mail: dmitrybaranovjob@gmail.com

Поступила в редакцию 25.01.2024 г.

После доработки 30.08.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Обобщены результаты 5-летних наблюдений в теплый сезон года — с середины апреля до начала ноября за химическим составом природных вод в системе атмосферные осадки — подкороновые воды — почвенные воды при смене режима атмосферных осадков на водосборе оз. Гусиное Валдайской возвышенности. Согласно гидротермическому коэффициенту увлажнения (ГТК) Селянинова было выделено 3 периода влагообеспеченности: засушливый, достаточного увлажнения и избыточного увлажнения. В статье рассмотрено распределение интенсивности выпадения атмосферных осадков в периоды между отборами проб. Установлено, что смена периодов увлажнения не влияет на гидрохимический тип атмосферных осадков и подкороновых вод (гидрокарбонатный I-го типа, по Алекину), однако преобладающий в водах катион изменяется с кальция на калий. Засушливый период характеризуется максимальными значениями минерализации в системе атмосферные осадки — подкороновые воды — почвенные воды, что обусловлено смытием большого количества пыли, накопившейся в приземном воздухе и осевшей на кронах деревьев. В период избыточного увлажнения наблюдаются самые низкие значения минерализации атмосферных осадков и подкороновых вод (6.2 и 8.3 мг/л соответственно). При смене засушливого периода избыточно увлажненным значение рН атмосферных осадков снижается, а окислительно-восстановительный потенциал увеличивается. На изменение значений рН почвенных вод оказывает содержание органических кислот (коэффициент корреляции = 0.8). Выявлено, что в засушливый период и период избыточного увлажнения поступление кальция в почвенные воды, главным образом, определяет биотический фактор, как и поступление калия в подсистеме подкороновые воды — почвенные воды.

Ключевые слова: водный режим, засушливый период, период избыточного увлажнения, гидротермический коэффициент увлажнения, атмосферные осадки, подкороновые воды, почвенные воды, Валдайская возвышенность

DOI: 10.31857/S2587556624060031, EDN: AKNNLI

ВВЕДЕНИЕ

Растущая с каждым днем антропогенная деятельность может привести к увеличению выбросов парниковых газов, повышению температуры воздуха, а также к изменению глобальных циркуляционных процессов, преобразованию режима выпадений атмосферных осадков с возможным увеличением засушливых периодов в некоторых районах (Varallyay, 2010). Подобные преобразования атмосферных выпадений отражаются на развитии геосистем, влияют на процессы почвообразования и изменяют свойства и функции почв.

В контексте изменения климата водный режим является одним из ключевых факторов, влияющих на изменение устойчивости почвен-

ных агрегатов и химического состава почвенных вод (Kelishadi et al., 2018). Для пополнения запасов почвенной влаги важна не только сумма осадков, но и их распределение во времени. В условиях длительных засушливых периодов почвенный профиль иссушается и снижается эвапотранспирация (Gombos et al., 2019).

Изменение режима выпадения атмосферных осадков, вызванное изменениями климата, может иметь последствия для экосистем (изменение состава и массы микробного сообщества, соотношение бактерий и грибов и др.) вследствие того, что поступление атмосферной влаги контролирует биологические процессы в почвенном профиле и на его поверхности, влияя на биогеохимические циклы элементов (Nielsen and Ball, 2014). Так, (Johnson et al., 2012) указы-

вают, что удлинение засушливых периодов может вызвать нарушения в биогеохимическом круговороте углерода.

Водная фаза почв является наиболее чувствительной и быстрореагирующей средой на температурные изменения экосистем. Температура, главным образом, влияет на скорости внутрипочвенных химических реакций и на интенсивность протекания процессов сорбции и десорбции растворенных веществ, *поэтому информация о температурном режиме оказывается актуальной при исследовании почвенных вод.* В исследованиях (Chen et al., 2017) отмечалось, что температура почв и почвенной влаги изменяет скорость разложения и минерализации органических веществ.

В настоящее время большая часть исследований направлена на изучение гидрофизических вопросов инфильтрации атмосферной влаги в почвенные горизонты в зависимости от режима выпадения атмосферных осадков, однако исследований, направленных на выявление особенностей изменения химического состава мигрирующей влаги недостаточно, особенно на фоновых территориях (Tripolskaja and Kazlauskaite-Jadzevi, 2022).

Целью работы является выявление биогеохимических особенностей в системе атмосферные осадки—подкороновые воды—почвенные воды на Валдайской возвышенности при изменении водного режима теплого периода года.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальный участок располагался в 20 км северо-западнее г. Валдай, на водосборе оз. Гусиное (рис. 1) и был оборудован лизиметрическими установками для сбора почвенных вод и осадкосборниками. В пределах экспериментального участка распространены дерново-подзолы со следующим строением верхней части профиля: подстилка (O) мощностью до 5 см, бурая, стратифицирована, с присутствием растительных остатков разной степени разложения; серогумусовый горизонт (AY) мощностью от 3 до 8 см, буровато-серый, супесчаный, комковатый, пронизан корнями; подзолистый горизонт (E) мощностью от 5 до 9 см белесовато-светло-серый, супесчаный, с неровной границей, комковатый. Следы оглеения отсутствуют, ввиду хорошей дренированности изучаемого участка (Классификация ..., 2004). Почвы сформированы на четвертичных отложениях, которые представлены разнозернистыми желтовато-бурыми флювиогляциальными песками, галечниками и гравием. Четвертичные отложения перекрывают нижнекарбоневые образования. Водно-ледниковый аккумулятивный рельеф исследуемого участка представлен камовыми образованиями (Геоморфология ..., 1969).

Растительность представлена 110-летним сосняком черничным свежим, древостой характеризуется составом 5С3Е1Б1Ос, подлесок редкий состоит из *Rhamnus frangula* и *Sorbus aucuparia*. В травяно-кустарничковом ярусе, с общим проективным покрытием 60–70%, преобладает *Vaccinium myrtillus*.

Лизиметры створчатого типа были установлены на нижней границе оподзоленного слоя почвы на глубине от 17 до 20 см. Пробы лизиметрических вод являлись гравитационными водами из-под ненарушенного почвенного слоя. Принимающая емкость лизиметрической установки объемом 2 л была оснащена инертным фильтром. Фильтрат почвенных вод откачивался вакуумным насосом через выводящую трубку. Емкости для сбора проб атмосферных осадков представляли собой термохимически инертные бутылки (Vitlab, Германия) объемом 5 л с прикрепленной к горловине воронкой диаметром 25 см. Осадкосборники были установлены на высоте 2 м от поверхности земли на открытых участках с минимальным количеством растительности и в лесной зоне — под кронами сосен.

Исследования проводили с 2015 по 2019 г. в период положительных температур воздуха и жидких выпадений атмосферных осадков, начиная с середины апреля и заканчивая нача-



Рис. 1. Расположение экспериментальной площадки: 1 — оз. Гусиное; 2 — г. Валдай.

лом ноября. Всего было отобрано 106 образцов природных вод; количество проб атмосферных осадков — 35; подкрановых вод — 28; почвенных вод — 43. Пробы атмосферных осадков и лизиметрических вод систематически отбирали весной, летом и осенью в среднем один раз в 1.5 месяца.

Увлажненность ландшафтов атмосферными осадками оценивали по гидротермическому коэффициенту увлажнения (ГТК) Селянинова (Селянинов, 1928):

$$\text{ГТЛ} = \frac{10R}{\sum T},$$

где R — сумма осадков в миллиметрах за период с температурами выше $+10^{\circ}\text{C}$, $\sum T$ — сумма средних суточных температур ($^{\circ}\text{C}$) за тот же период.

При проведении исследования было выделено три диапазона увлажнения, что соответствовало: а) засушливому периоду ($\text{ГТК} < 1$); периоду достаточного увлажнения ($1 < \text{ГТК} < 1.3$); периоду избыточного увлажнения ($\text{ГТК} > 1.3$).

Пробоотбор природных вод осуществляли согласно методике (Eaton et al., 1992). Осадко-сборники и лизиметрические установки были оснащены инертными сеточками ($d = 10^{-5}$ м) и инертным фильтром (стеклярус), для предотвращения попадания крупной взвеси в приемную бутылку.

Измерение рН, Eh, электропроводности, $T^{\circ}\text{C}$ (приборы MettlerTolledo) проводили в полевых условиях на месте отбора проб. Пробы для всех аналитических работ фильтровали через фильтры “Merck (Millipore)” с размером пор 0.45 мкм. Перманганатную окисляемость определяли титриметрическим методом, данный показатель характеризует количество органических кислот в исследуемых объектах (Берникова и др., 2013). Катионно-анионный состав (Ca^{2+} , Na^{+} , K^{+} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} ; Cl^{-}) измерялся с помощью ионного хроматографа Dionex ICS-6000EG (ГЕОХИ РАН), а также спектрофотометрическими методами сразу после отбора проб в лаборатории Валдайского филиала Государственного гидрологического института (ГГИ). Концентрации Al, Fe, Si, Mn определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС ИСП) в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН). Для статистической обработки массива данных химического состава природных вод был применен корреляционный анализ с использованием программы Statsoft Statistica 10.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В течение периода наблюдений в 2015 г. выпало 223 мм атмосферных осадков; в 2016 г. — 426 мм; в 2017 г. — 518 мм; в 2018 г. — 282 мм;

в 2019 г. — 792 мм. Количество осадков, выпадающих на территорию исследования в период между отборами проб, варьировало от 17.2 до 337.1 мм, время между отборами проб — от 26 до 90 сут, а средняя температура воздуха составляла от 6.1 до 21.5 $^{\circ}\text{C}$, значение ГТК от 0.3 до 2.6 (табл. 1). Максимальным значениям ГТК (2.4, 2.6) соответствует наименьшее количество суток без осадков. В основном, для засушливого периода и периода достаточного увлажнения между отборами проб наблюдались неинтенсивные (менее 3 мм/сут) выпадения атмосферных осадков. Для периодов избыточного увлажнения характерно сокращение числа дней без выпадения осадков. Умеренные осадки способствуют более равномерному промыванию приземного слоя атмосферы и просачиванию воды сквозь почвенный профиль.

Исследуемые природные воды классифицировали по Алекину (1970). Тип вод и минерализация широко варьировали по преобладающим катионам и анионам (табл. 2, рис. 2). В период избыточного увлажнения средние значения минерализации увеличивались в ряду атмосферные осадки — подкрановые воды — почвенные воды. Однако по сравнению с менее обводненными периодами, при избыточном увлажнении регистрируются наиболее низкие средние значения минерализации — в диапазоне от 6.2 до 10.6 мг/л в атмосферных осадках и почвенных водах соответственно. Для засушливого периода и периода достаточного увлажнения максимальные средние значения минерализации характерны для подкрановых вод (25.6 и 15.0 мг/л соответственно). При этом средние значения минерализации в засушливый период в системе атмосферные осадки — подкрановые воды — почвенные воды значительно выше, чем в период достаточного увлажнения, и изменяются в диапазоне от 7.6 до 11.8 мг/л. Несмотря на значительное различие минерализации по периодам, полученные результаты не превышают фоновых значений (30 мг/л), характерных для региональных станций наблюдений в европейской части России (Еремина, 2019; Котова, 2012). При смене засушливого периода более влажным наблюдается резкое снижение минерализации атмосферных осадков, подкрановых и почвенных вод. Наибольший скачок снижения минерализации характерен для подкрановых вод, а наименьший — для почвенных вод. Выявленные изменения минерализации в атмосферных осадках и подкрановых водах обусловлена накоплением пыли в приземном слое атмосферы и на кронах деревьев в засушливый период. Подкрановые воды обогащаются основными ионами не только за счет смыва пыли, но и вследствие более активной жизнедеятельности биоты, а также при насыщении растений и других организмов

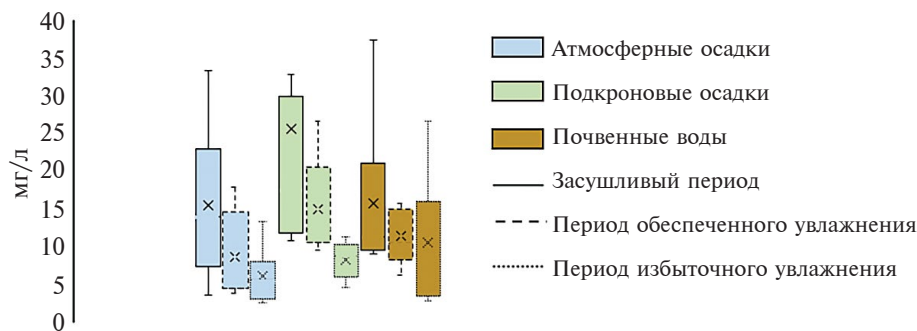
Таблица 1. Гидроклиматические характеристики периодов между отборами проб

Дата начала (сбора) серии измерений	Дата отбора проб	Количество осадков, мм	Средняя температура воздуха за период, °С	ГТК Селянинова
09.06.2015	07.07.2015	19.8	20.3	0.4
07.07.2015	03.08.2015	94.3	18.6	1.9
03.08.2015	30.08.2015	18.3	21.5	0.3
30.08.2015	28.09.2015	73.1	16.8	1.3
28.09.2015	19.10.2015	17.2	7.7	0.9
20.04.2016	06.06.2016	34.6	18.1	0.5
06.06.2016	27.07.2016	214	21.2	1.8
27.07.2016	29.09.2016	110.8	17.7	0.8
29.09.2016	22.10.2016	43.4	6.1	1.6
04.05.2017	28.06.2017	113.6	13.9	1.1
28.06.2017	27.08.2017	291.1	19.9	2.4
27.08.2017	20.10.2017	113.6	11.7	1.2
07.05.2018	25.06.2018	73.6	18.7	0.5
25.06.2018	24.09.2018	208.7	20.6	1.1
26.04.2019	09.07.2019	225.6	18.7	1.3
09.07.2019	27.08.2019	229.7	18.2	2.6
27.08.2019	09.11.2019	337.1	10.1	1.8

Таблица 2. Тип и средние значения минерализации атмосферных осадков, подкroновых и почвенных вод

Объект	ГТК Селянинова					
	Диапазон увлажнения <1		Диапазон увлажнения 1–1.3		Диапазон увлажнения >1.3	
	Тип воды	Минерализация, мг/л	Тип воды	Минерализация, мг/л	Тип воды	Минерализация, мг/л
Атмосферные осадки	C_{Ca}^I	20.5	C_{Ca}^I	8.7	C_{Ca}^I	6.2
Подкroновые воды	C_K^I	25.6	C_K^I	15.0	C_K^I	8.3
Почвенные воды	S_K^I	19.1	C_{Ca}^I	11.5	S_{Ca}^I	10.6

Источник: (Алекин, 1970).

**Рис. 2.** Минерализация атмосферных осадков, подкroновых и почвенных вод в периоды с разным гидротермическим коэффициентом увлажнения.

Примечание. Крестик — средние значения. На оси абсцисс расположены изучаемые объекты в соответствующий период увлажненности; на оси ординат отображено значение минерализации (мг/л).

продуктами метаболизма (Демаков, Исаев, 2015; Учватов, 2009; Vadassery et al., 2012). Поскольку в условиях засушливого режима накапливается значительное количество пыли на кронах деревьев, а согласно исследованиям (Turner and van Broekhuizen, 1992) вымывание элементов растёт при увеличении времени взаимодействия осадков с хвоей, можно предположить, что в условиях засушливого периода среди процессов, определяющих поступление элементов с атмосферными осадками, преобладает смыв пыли с крон.

Снижение минерализации почвенных вод в засушливый период и период достаточного увлажнения по сравнению с периодом избыточного увлажнения указывает на преобладающие процессы сорбции и активного потребления элементов микроорганизмами и корнями растений. При смене засушливого периода избыточно увлажненным наблюдается не только резкое снижение минерализации, но и смена преобладающего катиона (калия на кальций), что вероятно, обусловлено преобладанием растворимых форм кальция в обменно-поглощающем комплексе почв. Для увлажненного периода характерно более интенсивное вымывание кальция из почвы (Шильников и др., 1989; Neilsen and Stevenson, 1983). Стоит отметить, что тип вод атмосферных осадков и подкрановых вод остается неизменным (гидрокарбонатным I-го типа) при смене степени увлажненности. Различие по преобладающему катиону обусловлено более высокой биофильностью калия в лесном ландшафте (Орлов, Безуглова, 2000).

Изменение основных параметров атмосферных, подкрановых и почвенных вод рассматривалось относительно количества выпадающих дождей. На состав атмосферных осадков первостепенное влияние оказывает частота выпадений, чем длиннее будет период засухи, тем больше пыли может накопиться в приземном слое атмосферы, которая может существенно обогатить дождевые воды открытых участков (Duce and Hoffman, 1976). При контакте атмосферных осадков с пологом леса, в первую очередь происходит задержка влаги, при слабом испарении влага взаимодействует с кронами деревьев и может попасть на поверхность и вглубь почвы, тем самым трансформируясь в почвенные воды (Петров и др., 1988; Учватов, 1985). От режима выпадения осадков и температуры зависит время взаимодействия атмосферных осадков с кронами деревьев, интенсивность испарения или конденсации влаги, что в конечном счете влияет на состав почвенных вод, который, главным образом, зависит от времени взаимодействия атмосферных осадков и почвенного субстрата. Содержание основных катионов, анионов и зна-

чений pH, Eh сильно варьируют в атмосферных осадках, подкрановых и почвенных водах.

Атмосферные осадки. Засушливый период характеризуется нейтральными и слабощелочными значениями pH атмосферных осадков, что связано с достаточно малым поступлением органических кислот (коэффициент корреляции Спирмена между значением pH и содержанием органических кислот $r = 0.8$). По мере увеличения количества атмосферных осадков их pH снижается, а количество органических кислот возрастает, что, вероятно, происходит из-за более интенсивного удаления углекислого газа атмосферными осадками. Однонаправленная динамика наблюдается для содержания основных катионов и анионов: при переходе от засушливого периода к периоду достаточного увлажнения средние концентрации Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- резко снижаются. По мере возрастания количества атмосферных осадков значения Eh увеличиваются. Вероятно, рост значения редокс-потенциала происходит из-за увеличения содержания растворенного кислорода в атмосферных осадках, вследствие этого доля окисленных и малорастворимых соединений элементов возрастает.

Подкрановые воды. Так же как в атмосферных осадках, средние концентрации Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} резко снижаются при смене засушливого периода увлажненным (табл. 3). Исключение — изменение содержания гидрокарбонат-ионов, вероятно, это наблюдается из-за того, что в условиях задержки атмосферных осадков кронами деревьев и умеренного распределения влаги биотический привнос анионов преобладает над геохимическим (Vanguelova, 2009). Максимальные средние значения показателей в период достаточного увлажнения отмечаются для гидрокарбонат-ионов, а минимальные — для содержания органических кислот и значений Eh.

Почвенные воды. Минимальные средние значения pH, Eh, содержания Na, органических кислот и SO_4^{2-} наблюдаются в период достаточного увлажнения, что подтверждается исследованиями Кравченко (2016). Максимальные средние концентрации наблюдаются для HCO_3^- , Mn^{2+} , Fe^{2+} и Al^{3+} . Если максимальные содержания гидрокарбонат-ионов, вероятно, унаследованы от подкрановых вод, то максимальным концентрациям Mn^{2+} , Fe^{2+} соответствуют минимальные значения окислительно-восстановительного потенциала. Похожее поведение элементов рассматривается в (Popenda, 2014), где основное воздействие на скорость миграции катионов оказывает показатель редокс-потенциала.

Постепенное снижение среднего содержания при смене засушливого периода избыточно увлажненным характерно для Ca^{2+} , K^+ , Cl^- .

Таблица 3. Катионно-анионный состав атмосферных осадков, подкroновых и почвенных вод при изменении водного режима

Тип природных вод	Водный режим	pH	Eh, мВ	COD Mn, мгО/л	Ca, мкг/л	Na, мкг/л	K, мкг/л	Cl, мкг/л	SO ₄ ²⁻ , мкг/л	HCO ₃ ⁻ , мкг/л	Al, мкг/л	Fe, мкг/л	Mn, мкг/л
Атмосферные осадки	засушливый период	7.1/(6.3–8.6)	192/(138–240)	2.4/(2.0–5.6)	1729/(624–3326)	1720/(196–4800)	1500/(96–4644)	1740/(365–4500)	5800/(660–15500)	6900/(960–21000)	19.6/(4.7–39)	14.4/(6.8–25.5)	9.8/(4.1–21.7)
	период достаточного увлажнения	6.6/(5.6–7.4)	200/(178–233)	6.1/(2.2–12)	887/(306–1562)	161/(86–269)	384/(127–863)	692/(110–1500)	1275/(830–2000)	5100/(750–12600)	15.8/(5.8–38)	12.3/(3.5–31)	6.9/(4.8–10.2)
	период избыточного увлажнения	6.4/(5.4–7.3)	214/(144–274)	18.2/(1.8–57.6)	505/(1811–796)	208/(65–358)	221/(67–633)	285/(105–526)	651/(320–1300)	4140/(1200–9960)	8.9/(0.8–14.2)	9.3/(3.2–17.3)	4/(2.30–6.2)
Подкroновые воды	засушливый период	5.8/(5.0–6.6)	271/(198–333)	50/(20–96)	2551/(1011–6062)	2059/(113–8466)	5644/(1091–21074)	2644/(250–7650)	5533/(1550–18500)	6300/(600–12000)	138/(28–544)	46/(13–99)	200/(97–329)
	период достаточного увлажнения	5.5/(4.5–6.1)	223/(192–240)	38.6/(15.5–76)	992/(746–1263)	245/(187–354)	2204/(1767–2968)	1211/(265–2500)	1523/(1110–2300)	8154/(3120–21600)	37.8/(30.2–44.3)	20.5/(3.3–31.2)	185/(105–236)
	период избыточного увлажнения	5.5/(4.3–7.0)	280/(215–390)	45/(10.4–108)	646/(411–1030)	248/(123–441)	1221/(733–1627)	464/(310–563)	1170/(600–2000)	4060/(1200–7200)	36/(21–75)	16.8/(2.1–35.5)	98/(65–120)
Почвенные воды	засушливый период	4.9/(3.5–7.0)	276/(215–318)	67/(36–88)	1847/(1260–3660)	1090/(255–3727)	4886/(552–18700)	2774/(750–7890)	3295/(1000–7560)	3280/(100–8400)	1318/(1030–1552)	351/(227–437)	365/(259–529)
	период достаточного увлажнения	4.5/(3.4–5.8)	212/(98–260)	77/(43–108)	1429/(1018–2035)	449/(229–949)	1140/(152–2501)	1669/(340–3040)	1955/(1627–2900)	3492/(50–10800)	1670/(1054–2260)	406/(281–475)	433/(219–797)
	период избыточного увлажнения	4.7/(3.5–6.2)	284/(210–382)	126/(40–333)	1411/(664–3546)	972/(214–3663)	717/(90–2233)	962/(180–2625)	3211/(900–11400)	570/(10–6000)	1282/(256–1718)	351/(189–481)	211/(59–328)

Примечание. В числителе — средние значения, в знаменателе — диапазон от минимального значения концентрации до максимального; COD Mn — перманганатная окисляемость.

В условиях засушливого периода средние концентрации Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} увеличиваются в ряду атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды, что, вероятно, связано с возрастающим содержанием органических кислот в системе (Starr et al., 1985). Независимо от смены условий влагообеспеченности значения pH снижаются в системе атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды, а содержание органических кислот увеличивается, связь этих параметров подтверждается значимым обратным коэффициентом корреляции ($r = -0.71$), что типично для природных вод южнотаежных ландшафтов хвойной бореальной зоны (Первова, Евдокимова, 1984).

Максимальные средние концентрации хлорид-ионов в атмосферных осадках и подкроновых водах в засушливый период, вероятно, являются следствием более интенсивного испарения влаги. Содержание Cl^- независимо от водного режима увеличивается в системе атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды, что связано с высокой миграционной способностью элемента в водной среде (Лукина, Никонов, 2004). При контакте атмосферных осадков и подкроновых вод с поверхностью почвы происходит кардинальное изменение условий для формирования почвенных вод. В табл. 4 отражены результаты корреляционного анализа, который использовался для связи каждой из исследованных переменных в химическом составе атмосферных осадков, подкроновых и почвенных вод.

Согласно данным корреляционного анализа выявлялись достоверные сходства химического состава атмосферных осадков, подкроновых и почвенных вод относительно периодов увлажненности.

Засушливый период. Значимая корреляционная связь ($p \leq 0.05$) ионов натрия, хлора и сульфатов сохраняется во всей исследуемой системе атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды, что может быть связано с единым (атмосферным) источником поступления ионов (см. табл. 4). Значимой корреляции содержания ионов калия и кальция в подкроновых водах и атмосферных осадках выявлено не было, а в подсистеме подкроновые воды — почвенными воды отмечается высокая корреляция ($r > 0.88$), что может указывать на преимущественно биогенное поступление катионов.

Период достаточного увлажнения. Высокая корреляционная связь, выявленная для ионов кальция и железа в подсистеме атмосферные осадки — подкроновые воды, сменяется незначимой в подсистеме подкроновые воды — почвенные воды, что указывает на различный источник поступления элементов в почвенных водах и атмосферных осадках. Если поступление ионов кальция и железа в атмосферные осадки и подкроновые воды, вероятно, связано с глобальным и региональным переносом аэрозолей, происхождение которых обусловлено выветриванием почвенных минералов (Ganor et al., 1991; Migliavacca et al., 2005), то в почвенные воды поступление катионов обусловлено, главным образом, выщелачиванием из почвенных горизонтов. Значимая положительная корреляция выявлена среди анионов подкроновых и почвенных вод.

Период избыточного увлажнения. Между атмосферными осадками и подкроновыми водами выявлена обратная значимая корреляция для марганца и железа, что, вероятно, связано со сменой источника поступления элементов: если в атмосферные осадки привнос металлов обусловлен выветриванием почвенных минералов, то в подкроновые воды более значимым стано-

Таблица 4. Коэффициент корреляции между компонентами химического состава в атмосферных осадках, подкроновых и почвенных водах

Водный режим	Объект изучения	Ca	Na	K	Al	Fe	Mn	Cl	SO ₄	HCO ₃
Засушливый период	атмосферные осадки/подкроновые воды	0.63	0.89	-0.09	0.78	0.43	-0.21	0.71	0.92	0.65
	подкроновые воды/почвенные воды	0.88	0.91	0.91	-0.65	-0.34	0.87	0.90	0.83	-0.55
Период достаточного увлажнения	атмосферные осадки/подкроновые воды	0.68	0.59	0.76	0.33	0.87	0.12	0.62	-0.60	-0.29
	подкроновые воды/почвенные воды	0.09	0.76	0.62	-0.53	-0.18	0.15	0.90	0.89	0.92
Период избыточного увлажнения	атмосферные осадки/подкроновые воды	0.83	0.81	0.04	0.30	-0.93	-0.92	-0.48	-0.66	0.35
	подкроновые воды/почвенные воды	0.90	0.72	0.67	0.25	0.20	-0.72	0.22	0.68	0.73

вится влияние биотического фактора (Eludoyin and Ibitoye, 2018). Как и для засушливого периода высокая положительная корреляция сохраняется для ионов натрия и кальция в системе атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды, что указывает на схожесть поведения элементов при различных водных режимах.

Таким образом, можно предположить, что поступление кальция в почвенные воды в период достаточного увлажнения, в основном, обусловлено выщелачиванием из почвенных минералов за счет более длительного взаимодействия атмосферных осадков с почвами. Тогда как в другие периоды (избыточного и засушливого увлажнения) определяющую роль в поступлении кальция в почвенные воды играет биотический фактор. Также поведение калия сходно в засушливый период и период избыточного увлажнения. В подсистеме атмосферные осадки — подкроновые воды для калия не было выявлено значимой корреляции, в подсистеме подкроновые воды — почвенные воды отмечалась высокая положительная корреляция, что говорит о преимущественно биогенном генезисе катиона.

ВЫВОДЫ

В течение засушливого периода наблюдаются максимальные значения минерализации в атмосферных осадках и подкроновых водах (20.5 и 25.6 мг/л соответственно), вследствие вымывания накопленной пыли из приземного слоя атмосферы и с крон деревьев. Смена преобладающего катиона (кальция на калий) отражает смену преобладания геохимических условий на биотические. Максимальные значения минерализации в рассматриваемой системе природных вод характерны для подкроновых вод, что происходит не только за счет смыва пыли, но и вследствие более активного влияния биоты. Смена гидрокарбонатного типа почвенных вод на гидрокарбонатно-сульфатный в засушливых условиях указывает на преобладающие процессы сорбции, потребления элементов микроорганизмами и корнями растений в почвенных водах.

Кислотность природных вод не зависит от условий влагообеспеченности и, главным образом, определяется содержанием органических кислот в системе атмосферные осадки — подкроновые воды — почвенные воды ($r = 0.8$). Содержание основных ионов резко снижается при смене засушливого периода избыточно увлажненным. В условиях засушливого периода миграционные свойства железа и марганца определяет изменение окислительно-восстановительной обстановки, которое меняет валентность элемента при трансформации атмосферных осадков в почвенные воды. Период избыточной увлажненности характеризуется резкой сменой кислотно-щелочного

состояния (значения pH варьируют от 4.3 до 7.3), в которой наиболее контрастные изменения концентраций выявлены для Al.

На основе корреляционного анализа, который определяет связь каждой переменной химического состава атмосферных осадков, подкроновых и почвенных вод, установлено, что на поступление ионов кальция в почвенные воды в период избыточного увлажнения и в засушливый, ключевую роль оказывает биогенный фактор. В период достаточного увлажнения поступление ионов кальция и железа в атмосферные осадки и подкроновые воды, вероятно, связано с глобальным и региональным переносом аэрозолей, происхождение которых обусловлено выветриванием почвенных минералов, а в почвенные воды поступление катионов обусловлено, главным образом, выщелачиванием из почвенных горизонтов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-17-00061.

FUNDING

The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation grant no. 22-17-00061.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 444 с.
- Берникова Т.А., Нагорнова Н.Н., Цупикова Н.А. Возможность оценки трофического статуса водоема по величине перманганатной окисляемости (на примере озера Виштынецкого Калининградской области) // Вестн. РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2013. № 3. С. 12–21.
- Геоморфология и четвертичные отложения Северо-Запада европейской части СССР (Ленинградская, Псковская и Новгородская области) / ред. Д.Б. Малаховский, К.К. Марков. Л.: Наука, 1969. 256 с.
- Демаков Ю.П., Исаев А.В. Влияние аэральноего поступления веществ на их круговорот в лесных экосистемах // Вестн. ПГТУ. 2015. Т. 1. № 25. С. 66–86.
- Еремينا И.Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2019. № 3. С. 3–10.
- Классификация и диагностика почв России / отв. ред. Г.В. Добровольский. Смоленск: Ойкумена, 2004, 342 с.
- Кравченко И.Ю. Химический состав почвенных вод хвойных лесов средней тайги Карелии: матер. научно-практич. конф. “Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем”. Петрозаводск, 2016. 335 с.

- Котова Е.И.* Формирование химического состава осадков на севере европейской территории России // Вестн. Северного (Арктического) фед. ун-та. Сер. Естественные науки. 2012. № 4. С. 116–122.
- Орлов А.С., Безуглова О.С.* Биогеохимия. Ростов-на-Дону: “Феникс”, 2020. 320 с.
- Петров Е.Г., Бережная Л.И., Качановский И.М., Короткевич Н.А.* Экологический режим в сосновых биогеоценозах. Минск: Наука и техника, 1998. 160 с.
- Первова Н.Е., Евдокимова Т.И.* Состав почвенных растворов в подзоне южной тайги // Почвоведение. 1984. № 1. С. 7–15.
- Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // Тр. по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165–177.
- Учватов В.П.* Особенности почвенных и грунтовых вод Приокской зандрово-аллювиальной равнины // Почвоведение. 1985. № 6. С. 55–65.
- Учватов В.П.* Ландшафтно-эколого-геохимические показатели природных фоновых процессов // Мелиорация и рекультивация, экология. 2009. № 2. С. 5–15.
- Al-Khashman O.A.* Ionic composition of wet precipitation in the Petra region, Jordan // Atmos. Res. 2005. № 78. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.02.003>
- Assouline S., Mualem Y.* Effect of Rainfall-Induced Soil Seals on the Soil Water Regime: Drying Interval and Subsequent Wetting // Transport in Porous Media. 2003. № 53. P. 75–94.
<https://doi.org/10.1023/A:1023583808812>
- Buchan G.D.* Soil temperature regime. In: Soil and Environmental Analysis: Physical Methods / K.A. Smith, C.E. Mullins (Eds.). NY: Marcel Dekker, 2001. P. 539–594.
<https://doi.org/10.1201/9780203908600>
- Chen J., Xiao G., Kuzyakov Ya., Jenerette G.D., Ma Y., Liu W., Wang Z., Shen W.* Soil nitrogen transformation responses to seasonal precipitation changes are regulated by changes in functional microbial abundance in a subtropical forest // Biogeosciences. 2014. № 14. P. 2513–2525.
<https://doi.org/10.5194/bg-14-2513-2017>
- Duce R.A., Hoffman E.J.* Chemical fractionation at the air/sea interface // Annual Review of Earth and Planetary Sci. 1976. № 4. P. 187–228.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ea.04.050176.001155>
- Eludoyin A.O., Ibitoye M.O.* Relationship between precipitation and soil water chemistry in an intensively managed clayey soil environment in southwest England: a preliminary study // Int. J. of Hydrology Science and Technology. 2018. Vol. 8. № 4. P. 339–348.
<https://doi.org/10.1504/IJHST.2018.095535>
- Ganor E., Foner H.A., Brenner J., Neeman E., Lavi N.* The chemical composition of aerosols setting in Israel following dust storms // Atmos. Environ. 1991. № 25A. P. 2665–2670.
[https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90196-E](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90196-E)
- Gombos M., Kandra B., Tall A., Pavelková D.* Analysis of Non-Rainfall Periods and Their Impacts on the Soil Water Regime. In: Hydrology — The Science of Water / M.S. Javaid (Ed.). In Tech Open. 2019. P. 1–19.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.82399>
- Johnson S.L., Kuske C.R., Carney T.D., Housman D.C., Gallegos-Graves L.V., Belnap J.* Increased temperature and altered summer precipitation have differential effects on biological soil crusts in a dryland ecosystem // Global Change Biology. 2012. № 18. P. 2583–2593.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02709.x>
- Kelishadi H., Mosaddeghi M.R., Ayoubi S., Mamedov A.I.* Effect of temperature on soil structural stability as characterized by high energy moisture characteristic method // Catena. 2018. Vol. 170. № 2. P. 290–304.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.015>
- Migliavacca D., Teixeira E.C., Wiegand F., Machado A., Sanchez J.* Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaiba hydrographic basin, Brazil // Atmos. Environ. 2005. № 39. P. 1829–1844.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.005>
- Neilsen G.H., Stevenson D.S.* Leaching of soil calcium, magnesium, and potassium in irrigated orchard lysimeters // Soil Science Society of America J. 1983. Vol. 47. № 4. P. 692–696.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700040018x>
- Nielsen U.N., Ball B.A.* Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems // Global Change Biol. 2014. № 21. P. 1407–1421.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12789>
- Popenda A.* Effect of redox potential on heavy metals and As behavior in dredged sediments // Desalination and Water Treatment. 2014. Vol. 52. № 19–21. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2014.887449>
- Starr M.R., Lindroos A.-J., Nieminen T.M.* Variation in the quality of tension lysimeter soil water samples from a Finnish forest soil // Soil Sci. 1985. Vol. 140. № 6. P. 453–461.
<https://doi.org/10.1007/s10661-014-3963-7>
- Tripolskaja L., Kazlauskaitė-Jadzevi A.* Trend Analyses of Percolation of Atmospheric Precipitation Due to Climate Change: Case Study in Lithuania // Agronomy. 2022. Vol. 12. № 8. P. 1–15.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12081784>
- Turner D.P., van Broekhuizen H.J.* Nutrient leaching from conifer needles in relation to foliar apoplast cation exchange capacity // Environ Pollut. 1992. Vol. 75. № 3. P. 259–63.
[https://doi.org/10.1016/0269-7491\(92\)90124-s](https://doi.org/10.1016/0269-7491(92)90124-s)
- Vadassery J., Reichelt M., Hause B., Gershenson J., Bolland W., Mithufe A.* CML42-mediated calcium signaling coordinates responses to Spodoptera herbivory

- and abiotic stresses in *Arabidopsis* // *Plant Physiol.* 2012. № 159. P. 1159–1175.
<https://doi.org/10.1104/pp.112.198150>
- Várallyay G. The impact of climate change on soils and on their water management // *Agronomy Res.* 2010. № 8. P. 385–396.
- Vanguelova E.I., Benham S., Pitman R., Durrant Houston T. Chemical fluxes in time through forest ecosystems in the UK — Soil response to pollution recovery // *Environ. Pollution.* 2009. № 158. P. 1857–1869.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.10.0>

Features of Transformation of the Natural Waters' Composition with Changes in the Humidity of Landscapes of the Valdai Hills

D. Yu. Baranov^{a,*} and T. I. Moiseenko^a

^a*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS, Moscow, Russia*

**e-mail: dmitrybaranovjob@gmail.com*

The results of 5-year observations in the warm season of the year (from mid-April to early November) on the chemical composition of natural waters in the system atmospheric precipitation — undertree water — soil water during a change in the precipitation regime in the catchment area of Gusinoe Lake on the Valdai Hills are summarized. According to Selyaninov's hydrothermal moisture coefficient, three periods of moisture supply were identified: dry, sufficient hydration, and excess hydration. The article examines the distribution of precipitation intensity during the inter-sampling periods. Changing periods of moisture does not affect the type of precipitation and undertree water (hydrocarbonate type I, according to Alekin), however, the predominant cation changes from calcium to potassium. The dry period is characterized by maximum mineralization values in the system atmospheric precipitation — undertree water — soil water, which is due to the washing away of a large amount of dust accumulated in the ground air and settled on the crowns of trees. During the period of excess moisture, the lowest values of mineralization of atmospheric precipitation and sub-canopy waters are observed (6.2 and 8.3 mg/L, respectively). When the dry period is overly humidified, the pH value of atmospheric precipitation decreases, and the redox potential increases. The change in the pH values of soil waters is influenced by the content of organic acids (correlation coefficient = 0.8). It was revealed that during the dry period and the period of excessive moisture, the intake of calcium into soil waters mainly determines the biotic factor, as well as the intake of potassium in the subsystem undertree waters — soil waters.

Keywords: water regime, dry period, period of excess moisture, hydrothermal moisture coefficient, precipitation, undertree water, soil waters, Valdai Hills

REFERENCES

- Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of Hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 444 p.
- Al-Khashman O.A. Ionic composition of wet precipitation in the Petra region, Jordan. *Atmos. Res.*, 2005, vol. 78, no. 1–2, pp. 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.02.003>
- Assouline S., Mualem Y. Effect of rainfall-induced soil seals on the soil water regime: drying interval and subsequent wetting. *Transp. Porous Media*, 2003, vol. 4, no. 8A, pp. 75–94.
<https://doi.org/10.1023/A:1023583808812>
- Bernikova T.A., Nagornova N.N., Tsurikova N.A. The possibility of assessing the trophic status of a reservoir by the magnitude of permanganate oxidability (on the example of Lake Vishtynetsky in the Kaliningrad region). *Vestn. RUDN*, 2013, no. 3, pp. 12–21. (In Russ.).
- Buchan G.D. Soil temperature regime. In *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. Smith K.A., Mullins C.E., Eds. New York: Marcel Dekker, 2001, pp. 539–594.
<https://doi.org/10.1201/9780203908600>
- Chen J., Xiao G., Kuzyakov Ya., Jenerette G.D., Ma Y., Liu W., Wang Z., Shen W. Soil nitrogen transformation responses to seasonal precipitation changes are regulated by changes in functional microbial abundance in a subtropical forest. *Biogeosci.*, 2014, vol. 14, no. 9, pp. 2513–2525.
<https://doi.org/10.5194/bg-14-2513-2017>
- Demakov Yu.P., Isaev A.V. The effect of the aerial intake of substances on their circulation in forest ecosystems. *Vestn. PGTU*, 2015, vol. 1, no. 25, pp. 66–86. (In Russ.).
- Duce R.A., Hoffman E.J. Chemical fractionation at the air/sea interface. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1976, vol. 4, pp. 187–228.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ea.04.050176.001155>
- Eludoyin A.O., Ibitoye M.O. Relationship between precipitation and soil water chemistry in an intensively managed clayey soil environment in southwest England: a preliminary study. *Int. J. Hydrol. Sci. Technol.*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 339–348.
<https://doi.org/10.1504/IJHST.2018.095535>
- Eremina I.D. The chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and the trends of its long-

- term changes. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2019, no. 3, pp. 3–10. (In Russ.).
- Ganor E., Foner H.A., Brenner J., Neeman E., Lavi N. The chemical composition of aerosols setting in Israel following dust storms. *Atmos. Environ.*, 1991, vol. 25, no. 12, pp. 2665–2670.
[https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90196-E](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90196-E)
- Geomorfologiya i chetvertichnye otlozheniya severo-zapada evropeiskoi chasti SSSR (Leningradskaya, Pskovskaya i Novgorodskaya oblasti)* [Geomorphology and Quaternary deposits of the North-West of European Part of the USSR (Leningrad, Pskov and Novgorod regions)]. Malakhovskii D.B., Markov K.K., Eds. Leningrad: Nauka Publ., 1969. 256 p.
- Gombos M., Kandra B., Tall A., Pavelková D. Analysis of non-rainfall periods and their impacts on the soil water regime. In *Hydrology — the Science of Water*. Javaid, M.S., Eds. Ebook, 2019, pp. 1–19.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.82399>
- Johnson S.L., Kuske C.R., Carney T.D., Housman D.C., Gallegos-Graves L.V., Belnap J. Increased temperature and altered summer precipitation have differential effects on biological soil crusts in a dryland ecosystem. *Glob. Change Biol.*, 2012, vol.18, no. 8, pp. 2583–2593.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02709.x>
- Kelishadi H., Mosaddeghi M.R., Ayoubi S., Mamedov A.I. Effect of temperature on soil structural stability as characterized by high energy moisture characteristic method. *Catena*, 2018, vol. 170, no. 2, pp. 290–304.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.015>
- Khimicheskii sostav pochvennykh vod khvoynykh lesov srednei taigi Karelii: mater. nauch. konf.* [Chemical Composition of Soil Waters of Coniferous Forests of the Middle Taiga of Karelia. Materials of the Sci. Conf.]. Degteva S.V., Litvinets S.G., Ashichmina T.Ya., Domracheva L.I., et al., Eds. Petrozavodsk: Raduga-PRESS Publ., 2016. 447 p.
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and Diagnostics of Soils in Russia]. Dobrovolskii G.V., Eds. Smolensk: Oikumena Publ., 2004. 342 p.
- Kotova E.I. Formation of the chemical composition of precipitation in the north of the European territory of Russia. *Vestn. Sever. Arktich. Fed. Univ., Ser. Estest. Nauki*, 2012, no. 4, pp. 116–122. (In Russ.).
- Migliavacca D., Teixeira E.C., Wiegand F., Machado A., Sanchez J. Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaíba hydrographic basin, Brazil. *Atmos. Environ.*, 2005, vol. 39, no. 10, pp. 1829–1844.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.005>
- Nielsen G.H., Stevenson D.S. Leaching of soil calcium, magnesium and potassium in irrigated orchard lysimeters. *Soil Sci.Soc. Am. J.*, 1983, vol. 47, no. 4, pp. 692–696.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700040018x>
- Nielsen U.N., Ball B.A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems. *Glob. Change Biol.*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 1407–1421.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12789>
- Orlov A.S., Bezuglova O.S. *Biogeokhimiya* [Biogeochemistry]. Rostov-on-Don: Feniks Publ., 2020. 320 p.
- Petrov E.G., Berezhnaya L.I., Kachanovskii I.M., Korotkevich N.A. *Ekologicheskii rezhim v sosnovykh biogeotsenozakh* [Ecological Regime in Pine Biogeocenoses]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1998. 160 p.
- Pervova N.E., Evdokimova T.I. Composition of soil solutions in the subzone of the southern taiga. *Pochvoved.*, 1984, no. 1, pp. 7–15. (In Russ.).
- Popenda A. Effect of redox potential on heavy metals and As behavior in dredged sediments. *Desalin. Water Treat.*, 2014, vol. 52, no. 19–21, pp. 1–10.
<http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2014.887449>
- Selyaninov G.T. On agricultural climate assessment. *Tr. Sel'skokhoz. Meteorol.*, 1928, no. 20, pp. 165–177. (In Russ.).
- Starr M.R., Lindroos A-J., Nieminen T.M. Variation in the quality of tension lysimeter soil water samples from a finnish forest soil. *Soil Sci.*, 1985, vol. 140, no. 6, pp. 453–461.
- Tripolskaja L., Kazlauskaite-Jadzevi A. Trend analyses of percolation of atmospheric precipitation due to climate change: case study in Lithuania. *Agron. J.*, 2022, vol. 12, no. 8, pp. 1–15.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12081784>
- Turner D.P., van Broekhuizen H.J. Nutrient leaching from conifer needles in relation to foliar apoplast cation exchange capacity. *Environ. Pollut.*, 1992, vol. 75, no. 3, pp. 259–63.
[https://doi.org/10.1016/0269-7491\(92\)90124-s](https://doi.org/10.1016/0269-7491(92)90124-s)
- Vadassery J., Reichelt M., Hause B., Gershenzon J., Bolland W., Mithufe A. CML42-mediated calcium signaling coordinates responses to Spodoptera herbivory and abiotic stresses in Arabidopsis. *Plant. Physiol.*, 2012, vol. 159, no. 3, pp. 1159–1175.
<http://dx.doi.org/10.1104/pp.112.198150>
- Várallyay G. The impact of climate change on soils and on their water management. *Agron. Res.*, 2010, vol. 8, no. 7, pp. 385–396.
- Vanguelova E.I., Benham S., Pitman R., Moffat A.J., Broadmeadow M., et al. Chemical fluxes in time through forest ecosystems in the UK — soil response to pollution recovery. *Environ. Pollut.*, 2009, vol. 158, no. 5, pp. 1857–1869.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.10.044>
- Uchvatov V.P. Features of soil and groundwater of the Priokskaya zandra-alluvial plain. *Pochvoved.*, 1985, no. 6, pp. 55–65. (In Russ.).
- Uchvatov V.P. Landscape-ecological-geochemical indicators of natural background processes. *Melior. Rekulтив. Ekol.*, 2009, no. 2, pp. 5–15. (In Russ.).

УДК 556.5;556.012;556.043

ПРИЧИНЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ БЫСТРЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ВЗВЕСЕЙ В МАЛОЙ ГОРОДСКОЙ РЕКЕ СЕТУНЬ

© 2024 г. С. Р. Чалов¹, О. Д. Лошков¹, Е. А. Крастынь^{1, *}¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: krastyn-e@mail.ru

Поступила в редакцию 04.09.2024 г.

После доработки 13.09.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Современные измерительные технологии открывают новые горизонты в изучении природных явлений, в том числе связанных с гидрологическими процессами, и в частности — транспортом наносов. В статье обсуждаются результаты натурных экспериментов с лазерным дифрактометром LISST-200X, единственным в мировой практике средством регистрации крупности взвеси и мутности воды в потоке. Исследования были выполнены в начале 2024 г. в нижнем течении р. Сетуни, являющейся крупнейшим притоком р. Москвы в пределах г. Москвы, и представляли собой высокочастотные (с дискретностью 10 сек) продолжительные записи (всего 49 ч) характеристик транспорта взвесей в потоке. Совмещение с отборами проб на измерение оптической и весовой мутности позволило определить ограничения использования средств измерений подобного типа. Воспроизводимость гранулометрического состава взвешенных наносов по данным высокочастотного мониторинга оказалась хуже, чем их концентрации. Данные LISST-200X в среднем почти в 2 раза превышают величину крупности взвеси по сравнению с лабораторным определением крупности, что частично объясняется включением в измеряемый диапазон крупных частиц (более 500 мкм), однако стабильно воспроизводят относительные изменения гранулометрического состава. В ходе экспериментов на р. Сетуни выявлены непродолжительные (до 95 мин) увеличения мутности и крупности взвеси (плюмы), вероятнее всего имеющие антропогенный генезис, и характеризующиеся гистерезисными связями между мутностью воды и составом взвесей. Во всех случаях на волне подъема мутности крупность взвешенных наносов ниже, чем на спаде. Этот результат характеризует ранее неисследованный феномен транспорта наносов ниже участков их точечного поступления в русловые потоки — гидравлическую сортировку по длине реки, когда более легкие частицы перемещаются быстрее более крупных и тяжелых частиц (в том числе органических). Полученные оценки представляются важными как для мониторинга антропогенного воздействия, так и для развития теории речных наносов.

Ключевые слова: LISST, лазерная дифракция, взвешенные наносы, гранулометрический состав, высокочастотный мониторинг

DOI: 10.31857/S2587556624060043, **EDN:** AKLQLY

ВВЕДЕНИЕ

Эрозионные процессы, сбросы ливневых вод на селитебных землях, вод от промышленных и горнорудных предприятий и сельскохозяйственных систем формируют потоки наносов, перемещаемых по длине рек. За счет суперпозиции разных источников, отличий в их величине и продолжительности воздействия наносы имеют разный минералогический, гранулометрический и химический состав, трансформация которого в реках зависит от гидродинамических особенностей потока, физико-химических и биологических продукционно-деструкционных процессов. Если исследования мутности воды и стока наносов — развитая тема в гидроло-

гии и флювиальной геоморфологии (Guy, 1970; Reid and Dunne, 2016; Syvitski and Milliman, 2007), то оценки их состава до настоящего времени опирались в основном на дискретные и относительно редкие пробы, анализируемые на основе трудоемких лабораторных фракциометрических методов. В результате при изучении механического (гранулометрического) состава взвешенных наносов охарактеризованы были его географические закономерности и особенности внутригодовой изменчивости (Лопатин, 1952; Xu, 2000), однако быстрые колебания крупности взвесей, в том числе возникающие при распространении загрязняющих веществ ниже кратковременных точечных сбросов и за счет турбулентных колебаний мутности воды (Чалов, Цыпленков, 2020),

не исследовались в силу отсутствия возможностей измерения подобных явлений. В то же время они являются важнейшими для решения гидрологических прикладных и мониторинговых задач.

Появление лазерных гранулометров (Blott, Pae, 2001; Gray, Gartner, 2009) существенно расширило возможности изучения механического состава наносов. С их помощью были созданы обширные массивы данных, на основе которых изучены закономерности распространений фракций разного размера в реках разных природных условиях (Чалов, Ефимов, 2021), особенности вертикального распределения взвесей разной крупности (Bouchez et al., 2011; Gao et al., 2015; Szupiany et al., 2019). Важнейшим направлением исследований стало обоснование роли крупности взвесей как интегрального фактора формирования их химического состава (Chalov et al., 2020; Lupker et al., 2011).

Создание серии приборов LISST (сокращение от Laser in-situ Scattering and Transmissometry), в которых принцип лазерной дифракции осуществлен “*in-situ*” и которые проводят измерения непосредственно в потоке, открыло широкие возможности изучения временных колебаний состава взвешенных наносов. Пионерные исследования в этом направлении были выполнены авторами в начале 2024 г. на р. Сетуни, где были проведены эксперименты с прибором LISST-200X, экспонируемом на продолжительные интервалы времени в русловом потоке. Учитывая, что р. Сетунь — малая река Московской агломерации, имеет сильно урбанизированный бассейн, 30% площади водосбора которого приходится на застроенные территории, и характеризуется большим объемом неконтролируемых сбросов, проведение подобных измерений позволило исследовать особенности изменений состава взвеси в речном потоке в условиях высокой антропогенной нагрузки, что и стало целью данной статьи. Учитывая пионерный характер применения прибора, в работе решались задачи оценки его погрешностей (1), а также определения масштабов сезонных и суточных колебаний крупности взвесей в малой городской реке (2) и анализа причин их быстрых (продолжительностью в несколько часов) изменений, наблюдавшихся в реке во время проведения экспериментов (3).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Принцип работы прибора LISST-200X заключается в следующем: посылается лазерный луч, мощность которого измеряется специальным датчиком; затем луч поддается коллимации, то есть создается параллельно идущий поток излучения (Zhao et al., 2018). Далее лазерный

луч проходит через пропускающее стекло, попадает в водную среду, где рассеивается на частицах под разными углами. Рассеянный луч попадает на приемное стекло, где установлен светофильтр для подавления дневного света, причем углы после рассеяния частицами не изменяются. После этого рассеянные лучи направляются в фокальную плоскость приемного объектива, где установлена фокусирующая линза, которая перенаправляет лучи на кольцевой детектор, представляющий собой набор кремниевых 60-градусных дуг. Каждая дуга охватывает небольшой диапазон углов рассеяния, а кольцевидная форма используется для достижения стабильности инверсии в содержание взвеси. Количество этих дуг равно количеству диапазонов размеров, на которые можно разделить все зафиксированные частицы. В лазерных дифрактометрах при решении уравнений для пересчета рассеяния луча в концентрацию частицы принято считать твердыми непористыми сферическими. Рассеяние света любой сферической частицей с произвольным размером рассматривается в рамках теории Ми, являющейся полностью аналитическим решением уравнений Максвелла для рассеяния электромагнитного излучения сферическими частицами. Происходит преобразование набора измерений рассеяния света под многими углами в гранулометрический состав. Крупность частиц, доступная прибору для измерений — от 1 до 500 мкм, концентрация взвешенных веществ — до 2000–2500 тыс. мкл/л. Она может колебаться в зависимости от условий среды, также, с превышением концентрации взвешенных веществ ~1200 мкл/л, при этом снижается точность измерений, а прибор занижает истинные значения (Zhao et al., 2018).

Натурные эксперименты с прибором LISST-200X заключались в непрерывном измерении крупности взвесей (в работе анализировался только средний диаметр, D (мкм)) и объемной мутности (S_v , мкл/л) воды в течение 7 дней с 9 февраля по 2 апреля 2024 г. одновременно с измерением уровня и расхода воды в нижнем течении р. Сетуни (1.86 км выше ее впадения в р. Москву) на действующем здесь с 2019 г. посту (Чалов и др., 2023). Дискретность измерений LISST составляла 10 сек, уровней и расходов воды — 30 мин. Суммарное время работ прибора составило более 49 ч, за которые было получено 15521 измерение D и S_v , после первичного анализа было оставлено 15143 измерения (табл. 1). Основными причинами отбраковки части данных стали нахождение прибора вне воды во время измерений, а также прохождение сквозь оптическую ось субстанций, приводящих к многократному увеличению фиксируемых значений крупности до величины 500 мкм.

Таблица 1. Почасово округленные данные о среднем диаметре и объемной концентрации взвешенных веществ в р. Сетуни

D _{ср} , мкм	09.02.2024	27.02.2024	02.03.2024	12.03.2024	19.03.2024	29.03.2024	02.04.2024
7:00–8:00	—	—	—	—	—	40.88	—
	—	—	—	—	—	209.4562	—
8:00–9:00	—	—	—	—	—	38.89	31.55
	—	—	—	—	—	206.3112	427.8211
9:00–10:00	—	—	—	—	—	36.06	32.88
	—	—	—	—	—	221.7563	436.7317
10:00–11:00	—	—	47.62	—	—	34.84	32.60
	—	—	131.0972	—	—	243.3488	449.2575
11:00–12:00	—	49.16	49.10	—	—	34.64	33.02
	—	147.0665	119.3854	—	—	237.1066	400.6105
12:00–13:00	—	48.06	47.78	58.81	—	35.06	32.87
	—	150.8757	129.6398	83.4632	—	218.2222	380.9191
13:00–14:00	—	58.24	49.73	57.03	58.84	36.18	32.31
	—	257.1180	230.5458	88.7294	166.3263	184.9096	364.6521
14:00–15:00	39.80	45.14	—	56.94	58.62	34.93	31.73
	139.8153	148.5016	—	91.7831	166.6757	200.4106	369.0646
15:00–16:00	35.97	46.45	—	49.63	55.01	34.46	31.85
	138.4305	123.1103	—	116.5024	176.6596	223.4391	410.9098
16:00–17:00	—	—	—	52.77	62.77	38.10	32.97
	—	—	—	105.5073	183.5148	205.6042	472.9506
17:00–18:00	—	—	—	—	68.09	35.14	37.32
	—	—	—	—	182.4511	217.9591	693.7640
18:00–19:00	—	—	—	—	81.10	35.65	34.48
	—	—	—	—	359.7097	206.3572	786.2264
19:00–20:00	—	—	—	—	68.53	33.57	30.59
	—	—	—	—	364.1063	220.4985	824.4460
20:00–21:00	—	—	—	—	64.49	34.61	27.14
	—	—	—	—	901.2954	213.9815	480.9809
Расход воды, м ³ /с	1.74	1.84	2.03	1.82	2.88	6.08	8.26

Примечание: верхняя строка — средняя крупность взвеси, мкм; нижняя строка — объемная концентрация, мкл/л.

Для оценки достоверности работы LISST-200X одновременно с записью проводились отборы проб воды в точке установки прибора, которые в дальнейшем были профильтрованы через мембранные фильтры Millipore с диаметром пор 0.45 мкм, определена весовая мутность SSC (мг/л) и на лабораторном лазерном гранулометре Fritsch Analysette 22 — распределение гранулометрического состава. Дискретность отбора проб составила 2 ч, всего за время экспериментов было отобрано 18 проб.

Дополнительно каждые 10 мин проводился отбор проб для определения оптической мутности портативным турбидиметром HACH 2100P. Полученные значения оптической мутности (Т) использовались для восстановления ряда весовой мутности (SSC) в период наблюдений по региональному уравнению связи: $SSC = 0.8T + 1.4$ (Sokolov et al., 2020).

Метеорологическая обстановка во время экспериментов была примерно одинакова — сплошная или значительная облачность, без осадков.

Исключением стало 29 марта — было малооблачно, наблюдались кратковременные осадки. Расходы воды изменялись от 1.74 м³/с 9 февраля до 8.26 м³/с 2 апреля, когда на р. Сетуни наблюдался пик половодья.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление результатов измерения объемной S_V (по данным LISST) и весовой SSC мутности показало тесное соотношение во все дни измерений. Связь между весовой мутностью SSC и объемной мутностью S_V описывается коэффициентом корреляции $R = 0.84$. Точки на графике “распадаются” на 3 отдельные зависимости по датам измерений (рис. 1а). Зависимости, составленные с учетом даты измерений, характеризуются более высокой корреляцией. Для 27 февраля $SSC = 0.06 S_V + 33.5$ ($R = 0.87$); для 29 марта $SSC = 0.13 S_V + 34.7$ ($R = 0.74$); для 2 апреля $SSC = 0.07 S_V + 100.3$ ($R = 0.87$). При этом выдающиеся значения с объемной концентрацией S_V от 700 до 1000 мкл/л не воспроизводятся по данным измерений оптической мутности, что позволило сделать вывод об их ошибочности. Скорее всего, возникновение таких выбросов связано с влиянием крупных частиц.

Воспроизводимость гранулометрического состава взвешенных наносов по данным высокочастотного мониторинга оказалась хуже, чем концентрации. Данные LISST-200X в среднем почти в 2 раза завышают величину крупности взвеси по сравнению с лабораторным определением крупности лазерным гранулометром (рис. 1б),

что частично объясняется включением в измеряемый диапазон крупных частиц взвеси (более 500 мкм). Характер связи между двумя величинами неоднородный. В общем случае связь между средним диаметром, определенным на лазерном гранулометре по фильтрам $d_{50\text{фильтр}}$ и с помощью LISST-200X, определяется уравнением $d_{50\text{фильтр}} = 0.05D + 16.9$ ($R = 0.61$). Разбиение зависимости по отдельным дням не улучшает корреляцию между величинами.

Методической причиной подобных отклонений является принцип работы прибора, в котором величина объемной концентрации вещества связана с весовой концентрацией через величину плотности, и при полностью однородной взвеси (с одинаковой плотностью) зависимость весовой концентрации от объемной представляет собой прямую; однако плотность частиц разного генезиса неодинакова. Кроме этого, некоторая часть ошибки средней объемной концентрации (вычисляемой по данным о размере частиц) вносится за счет неидеальной (несферической) формы частиц (Felix et al., 2018). При этом относительные изменения состава взвеси во всех экспериментах было воспроизведено устойчиво. Следующий за этими результатами вывод о возможности использования данных LISST только для относительных оценок крупности взвеси согласуется с данными специальных лабораторных экспериментов (Lepage et al., 2019), в которых, в частности, обосновывалась необходимость корректировки данных LISST, отклоняющих результат в среднем на 79%.

Средняя крупность взвесей при измерениях составила по данным LISST-200X от 27 до 65 мкм; основную часть взвешенных наносов

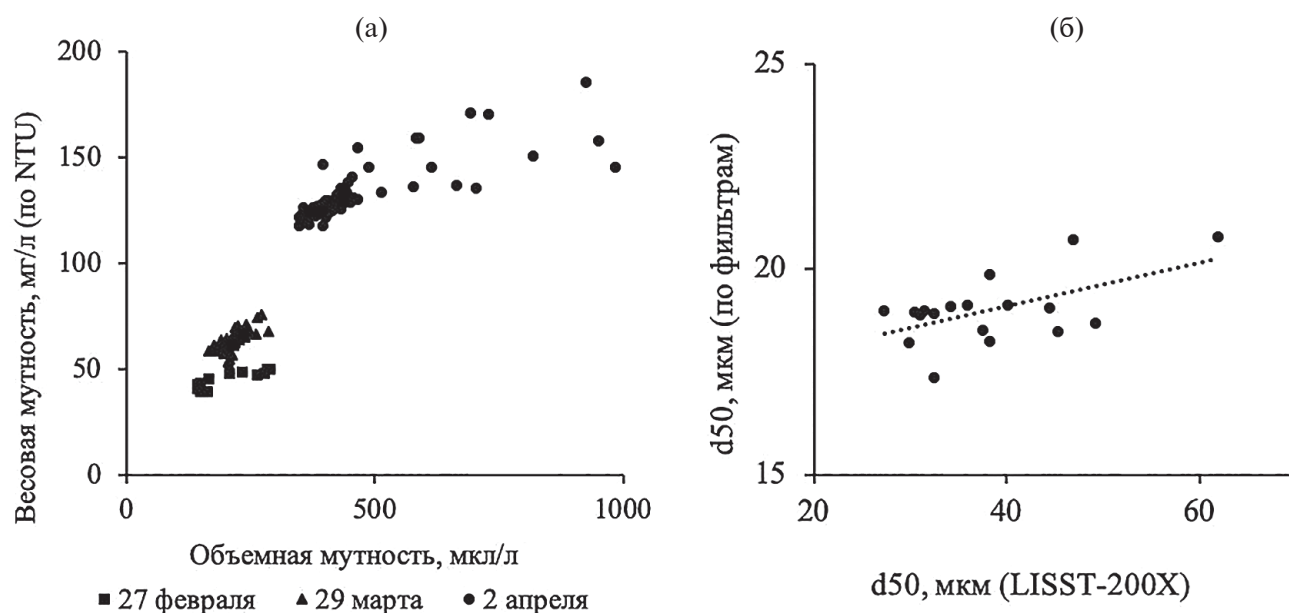


Рис. 1. Результаты сравнения измерений LISST-200X с измерениями весовой мутности (восстановленной по оптической мутности) (а) и среднего диаметра, полученного в пробах лазерным гранулометром Fritsch Analysette 22 (б).

(до 50%) составляли частицы от 10 до 50 мкм. Объемная мутность менялась в интервале от 69 до 1546 мкл/л. По мере приближения пика весеннего половодья, который в 2024 г. на р. Сетуни наблюдался 2 апреля, средний диаметр частиц и объемная концентрация увеличивались, достигнув максимальных значений в день пика. Также во время половодья в гранулометрическом составе взвешенных веществ наблюдалось существенное (до 45 раз) увеличение доли мелких частиц (1–1.48 мкм) по сравнению со значениями зимней межени.

В ходе экспериментов были выявлены 14 значимых увеличений в концентрации взвешенных частиц продолжительностью от 13 до 95 мин, сопровождавшихся изменениями крупности взвесей. Кратковременные повышения концентрации взвешенных веществ отразились и в увеличениях значений оптической мутности и фиксировались визуально. Учитывая их характер, такие прохождения мутных вод было предложено назвать плюмами. Их характеристики представлены в табл. 2.

Изменения мутности и крупности взвесей были сопоставлены с ходом дождевых осадков (метеостанция МГУ) и колебаниями водности р. Сетуни. Связь объемной концентрации с режимом осадков, уровнем и расходом воды, не выявлена. Учитывая отсутствие связи синоптических и гидрологических факторов с формированием указанных увеличений мутности, был сделан вывод об антропогенном происхождении указанных плюмов. Существование непродол-

жительных сбросов высокозагрязненных, в том числе взвесями, вод, от различных точечных источников, подтверждается многократными наблюдениям на р. Сетуни. На антропогенное происхождение указывает также кратковременность плюмов — пик достигается, в среднем, за 28 мин, а сами повышения длятся в среднем, 60 мин.

Сопоставление изменений мутности и крупности взвесей показало отрицательный гистерезисный вид связей $D = f(S_v)$. Во всех случаях на фоне увеличения мутности крупность взвесей D была меньше, чем на спаде мутности воды (в конце прохождения плюма). Например, 19 марта 2024 г. (рис. 2) увеличение величины S_v началось в районе 18 ч 20 мин, и достигло пика в 18 ч 50 мин, увеличившись почти в 2 раза. В это же время величина D возрастала также почти в 2 раза, однако если на подъеме мутности воды она изменялась в интервале от 60 до 90 мкм, то на спаде — от 70 до 100 мкм. В целом пик мутности соответствовал пику крупности частиц.

Гистерезис наблюдается для всех зафиксированных плюмов (рис. 3): на подъеме мутности воды отмечается меньший средний диаметр частиц, чем во время снижения при тех же концентрациях (со средней разницей от 2 до 20 мкм, в зависимости от продолжительности плюма). На рис. 3 гистерезис для значимых плюмов схематично показан черными стрелками. Такой вид связи позволил сделать вывод о распределении частиц разной крупности, поступающих от точечных источников загрязнения, по длине

Таблица 2. Характеристики зафиксированных плюмов мутности в р. Сетуни

Дата	Временной интервал			Средний диаметр		Объемная концентрация	
	Начало	Пик	Конец	Пик, мкм	Превышение над средним за день, раз	Пик, мкл/л	Превышение над средним за день, раз
27.02.2024	13:00	13:26	14:09	64.57	1.40	300.73	2.10
02.03.2024	10:00	10:15	10:35	54.01	1.17	153.91	1.28
	12:49	13:04	13:11	53.29	1.15	243.54	2.02
12.03.2024	15:11	15:37	16:26	60.27	1.21	143.78	1.58
	16:26	16:37	16:39	59.00	1.19	150.27	1.66
19.03.2024	18:03	18:51	19:38	100.32	1.74	519.96	2.91
	19:38	20:14	20:30	69.57	1.21	1075.37	6.03
29.03.2024	14:06	14:57	15:13	42.05	1.26	286.44	1.44
	15:13	15:23	16:22	39.23	1.17	244.94	1.23
	17:38	17:59	18:47	39.52	1.18	256.56	1.29
	18:47	19:32	20:10	43.50	1.30	241.11	1.21
02.04.2024	16:34	17:16	17:53	42.36	1.35	1124.16	2.75
	17:53	18:20	18:47	38.36	1.22	1242.78	3.04
	18:47	19:19	19:58	33.01	1.05	1375.55	3.37

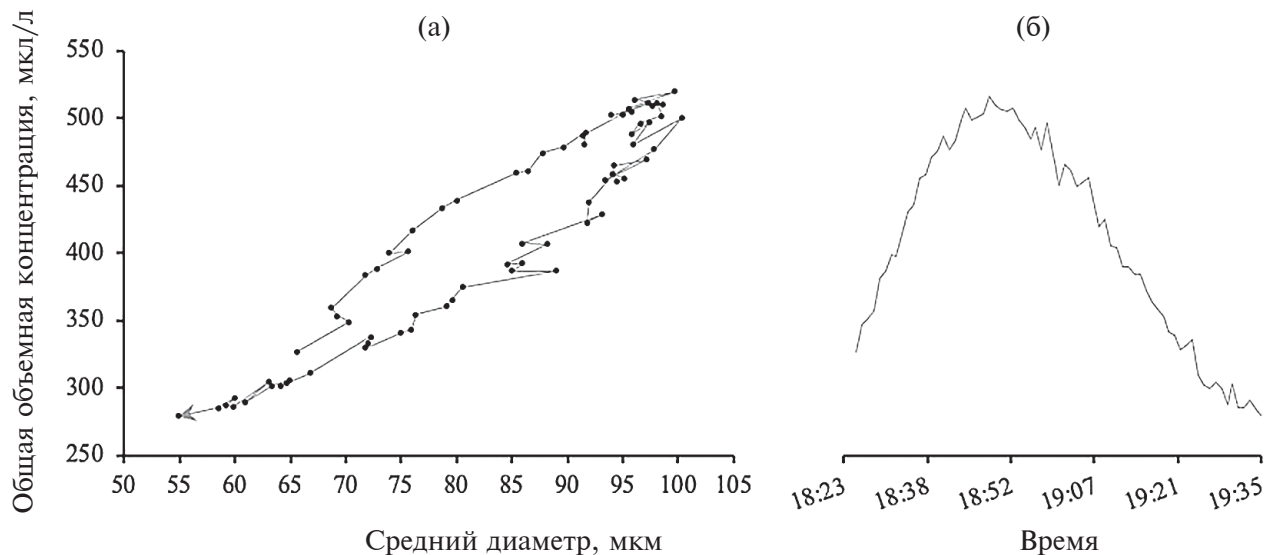


Рис. 2. Связь объемной концентрации взвеси и среднего диаметра частиц (а) и ход общей объемной концентрации (б) во время повышения 19 марта 2024 г. Данные усреднены по минутно.

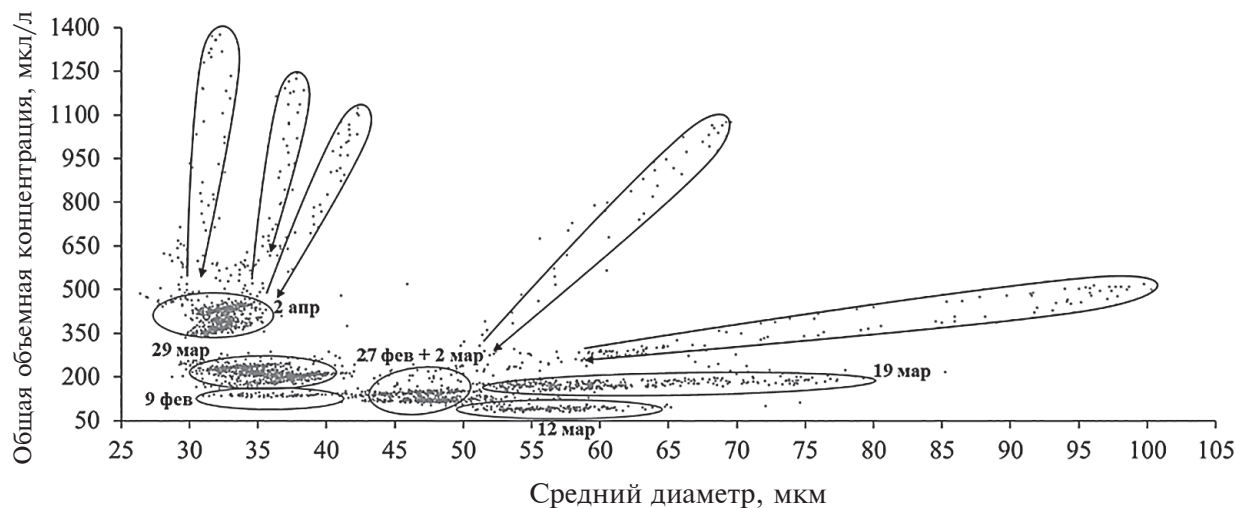


Рис. 3. Связь среднего диаметра и объемной концентрации взвешенных наночастиц в р. Сетуни, построенная на основе серий экспериментов с лазерным дифрактометром LISST в феврале–апреле 2024 г.

руслового потока. Наблюдается гидравлическая сортировка взвесей: в потоке в зоне распространения поступивших взвесей быстрее распространяются более мелкие взвеси, в то время как более крупные транспортируются в русловом потоке в тыловой части зоны повышения мутности. Это может объясняться как их большим весом, так и наоборот, наличием в потоке органических флокул, перемещаемых пульсациями и, соответственно, медленнее.

Нелинейные связи между мутностью и крупностью взвесей в пределах коротких паводков наблюдались ранее в исследованиях в швейцарских Альпах (Felix et al., 2018). В период прохождения сбросов вод с гидроузла, максимальный рост крупности взвеси соответствовал максимальной мутности воды, также как и в наших исследова-

ниях. Однако более крупные частицы транспортировались на волне подъема мутности, в то время как в р. Сетуни — на спаде. Отличия можно объяснить тем, что в условиях сбросов воды с водохранилища максимальная мощность потока и максимальное взвешивание донных частиц наблюдается в начале сбросной волны. Кроме того, в отличие от плюмов от точечных сбросов на р. Сетуни, цитируемые эксперименты проводились в непосредственной близости от источника поступления вод, что исключает возможность продольной сортировки крупности взвеси. Распределения крупности взвесей в потоке наблюдаются в плоскостных потоках (Sidorchuk, 2009), в гиперконцентрированных потоках (Чалов, Цыпленков, 2020), где более крупные частицы переносятся на гребне макровихрей.

ВЫВОДЫ

По результатам работы получены следующие основные выводы.

1. Методы лазерной дифракции в проточных приборах LISST-200X открывают новые возможности изучения перемещения наносов в реках. Сравнение результатов его измерений с обычными методами показало высокую и очень высокую корреляцию между объемной и весовой мутностью: для отдельных дней измерений коэффициент корреляции составляет от 0.74 до 0.87. Хуже воспроизводятся значения гранулометрического состава за счет возникновения систематических отклонений, связанных с несферичностью частиц, однако все тренды и относительные изменения фиксируются достоверно.

2. Эксперименты, проведенные на р. Сетуни (Москва) в течение 7 дней в феврале–апреле 2024 г., характеризуют рост крупности взвеси при переходе от зимней межени к половодью. Основную часть взвешенных наносов (до 50%) составляли частицы 10–50 мкм.

3. На фоне этих внутрисезонных и сезонных изменений состава взвешенных наносов в р. Сетуни выявлены короткие (продолжительностью до 95 мин) увеличения мутности воды и крупности взвеси, наблюдавшиеся в разные дни. Независимость от синоптических и гидрологических (уровни и расходы воды) факторов позволила обосновать их антропогенное происхождение и классифицировать как плюмы ниже дискретных точечных сбросов загрязненных вод.

4. Выявлено, что во всех плюмах на подъеме мутности воды наблюдается меньший средний диаметр частиц, чем во время спада мутности — наблюдается так называемый эффект гистерезиса связи мутности и среднего диаметра частиц. Это явление объяснено гидравлической сортировкой взвесей: в потоке в зоне распространения поступивших взвесей быстрее распространяются более мелкие взвеси, в то время как более крупные транспортируются в русловом потоке в тыловой части зоны повышения мутности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Полевые исследования выполнены за счет гранта РФФИ № 19-77-30004, обработка данных сетевых наблюдений — в рамках Проекта Министерства Образования и Науки Российской Федерации № 075-15-2025-008.

FUNDING

The field research was carried out at the expense of the RSF grant no. 19-77-30004, the processing of network observation data was carried out within the framework of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation project no. 075-15-2025-008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лопатин Г.В.* Наносы рек СССР (Образование и перенос). Географгиз, 1952.
- Чалов С.Р., Ефимов В.А.* Механический состав взвешенных наносов: классификации, характеристики, пространственная изменчивость // Вестн. МГУ. Серия 5. География. 2021. Вып. 5. С. 91–103.
- Чалов С., Платонов В., Морейдо В., Самохин М., Ярынич Ю., Коршунова Н., Болгов М., Касимов Н.* Реакция водного стока малой городской реки на экстремальные дождевые осадки на территории Москвы в 2020 и 2021 гг. // Метеорология и Гидрология. 2023. Вып. 2. С. 69–79.
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-2-69-79>
- Чалов С.Р., Цыпленков А.С.* Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод // Вестн. Моск. ун-та. Серия 6. География. 2020. Вып. 3. С. 34–46.
- Bouchez J., Gaillardet J., France-Lanord C., Maurice L., Dutra-Maia P.* Grain size control of river suspended sediment geochemistry: Clues from Amazon River depth profiles // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2011. Vol. 12. № 3. Q03008.
<https://doi.org/10.1029/2010GC003380>
- Chalov S., Moreido V., Sharapova E., Efimova L., Efimov V., Lychagin M., Kasimov N.* Hydrodynamic Controls of Particulate Metals Partitioning Along the Lower Selenga River — Main Tributary of The Lake Baikal // *Water*. 2020. Vol. 12. № 5. 1345 p.
<https://doi.org/10.3390/w12051345>
- Felix D., Albayrak I., Boes R.M.* In-situ investigation on real-time suspended sediment measurement techniques: Turbidimetry, acoustic attenuation, laser diffraction (LISST) and vibrating tube densimetry // *Int. J. of Sediment Res.* 2018. Vol. 33. № 1. P. 3–17.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.11.003>
- Gao J.H., Jia J., Wang Y.P., Yang Y., Li J., Bai F., Zou X., Gao S.* Variations in quantity, composition and grain size of Changjiang sediment discharging into the sea in response to human activities // *Hydrology and Earth System Sci.* 2015. Vol. 19. P. 645–655.
<https://doi.org/10.5194/hess-19-645-2015>
- Guy P.H.* Fluvial sediment concepts / U.S. Geological Survey. 1970. Book 3. Vol. 55.
- Lupker M., France-Lanord C., Lavé J., Bouchez J., Galy V., Métivier F., Gaillardet J., Lartiges B., Mugnier J.L.* A Rouse-based method to integrate the chemical composition of river sediments: Application to the Ganga basin // *J. of Geophysical Res.: Earth Surface*. 2011. Vol. 116. № F04012.
<https://doi.org/10.1029/2010JF001947>
- Reid L.M., Dunne T.* Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology // *In Tools in Fluvial Geomorphology*. 2016. P. 357–380.
<https://doi.org/10.1002/9781118648551.ch16>

- Sidorchuk A.Y.* High-frequency variability of aggregate transport under water erosion of well-structured soils // *Eurasian Soil Sci.* 2009. Vol. 42. № 5. P. 543–552. <https://doi.org/10.1134/s106422930905010X>
- Sokolov D.I., et al.* Impact of Mozhaysk dam on the Moscow river sediment transport // *Geography. Environment. Sustainability.* 2020. Vol. 13. № 4.
- Syvitski J.P. M., Milliman J.D.* Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean // *J. of Geology.* 2007. Vol. 115. P. 1–19.
- Szupiany R.N., Lopez Weibel C., Guerrero M., Latosinski F., Wood M., Dominguez Ruben L., Oberg K.* Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions // *Earth Surface Processes and Landforms.* 2019. Vol. 44. № 6. P. 1295–1308. doi: 10.1002/esp.4572
- Xu J.* Grain-size characteristics of suspended sediment in the Yellow River, China // *Catena.* 2000. Vol. 38. № 3. P. 243–263. [https://doi.org/10.1016/s0341-8162\(99\)00070-3](https://doi.org/10.1016/s0341-8162(99)00070-3)
- Zhao L., Boufadel M.C., King T., Robinson B., Conmy R., Lee K.* Impact of particle concentration and out-of-range sizes on the measurements of the LISST // *Measurement Science and Technology.* 2018. Vol. 29. № 5.

Drivers and Features of Rapid Suspended Sediment Composition Changes in the Small Urban River Setun

S. R. Chalov^a, O. D. Loshkov^a, and E. A. Krastyn^{a, *}

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

**e-mail: krastyn-e@mail.ru*

This article discusses the results of field experiments in the lower reaches of the Setun River, the largest tributary of the Moscow River within the city of Moscow, based on the LISST-200X diffractometer, which measures suspended sediment concentration (SSC) and particle size through laser diffraction. The research was conducted in early 2024, and involved high-frequency (10-second interval) long-term recordings (49 h in total) of sediment transport characteristics. The combination of these measurements with sampling for optical and gravimetric turbidity allowed for the identification of limitations in the use of such measurement tools. The reproducibility of the granulometric composition of suspended sediments based on high-frequency monitoring was found to be worse than that of their concentrations. The LISST-200X data, on average, overestimated the particle size by nearly two times compared to laboratory measurements, which can be partially explained by the inclusion of larger particles (over 500 μm) in the measured range; however, it consistently reproduced relative changes in granulometric composition. During the experiments on the Setun River, short-term (up to 95 min) increases in turbidity and particle size (plumes) were identified, likely of anthropogenic origin, characterized by hysteresis relationships between SSC and sediment composition. In all cases, during the rise in SSC, the size of suspended sediments was lower than during its decline. This result highlights a previously unexplored phenomenon of sediment transport downstream from point sources into channel flows, that shows hydraulic sorting along the river length, where lighter particles move faster than larger and heavier particles (including organic ones). The obtained estimates are significant for both monitoring anthropogenic impacts and advancing the theory of river sediments.

Keywords: LISST, laser diffraction, suspended sediments, sediment grain size, effluent

REFERENCES

- Bouchez J., Gaillardet J., France-Lanord C., Maurice L., Dutra-Maia P. Grain size control of river suspended sediment geochemistry: Clues from Amazon River depth profiles. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2011, vol. 12, no. 3. <https://doi.org/10.1029/2010GC003380>
- Chalov S.R., Efimov V.A. Suspended sediment grain size: Classification, features and spatial variability. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2021, vol. 5, pp. 91–103. (In Russ.).
- Chalov S., Moreido V., Sharapova E., Efimova L., Efimov V., Lychagin M., Kasimov N. Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga river — Main Tributary of the lake Baikal. *Water*, 2020, vol. 12, no. 5, art. 1345. <https://doi.org/10.3390/w12051345>
- Chalov S., Platonov V., Morejdo V., Samohin M., Yarynich Yu., Korshunova N., Bolgov M., Kasimov N. Small urban river runoff response to 2020 and 2021 extreme rainfalls on the territory of Moscow. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, no. 2, pp. 138–146. <https://doi.org/10.3103/s1068373923020061>
- Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. Large-scale turbulence and water turbidity. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2020, vol. 3, pp. 34–46. (In Russ.).

- Felix D., Albayrak I., Boes R.M. In-situ investigation on real-time suspended sediment measurement techniques: Turbidimetry, acoustic attenuation, laser diffraction (LISST) and vibrating tube densimetry. *Int. J. Sediment Res.*, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 3–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.11.003>
- Gao J.H., Jia J., Wang Y.P., Yang Y., Li J., Bai F., Zou X., Gao S. Variations in quantity, composition and grain size of Changjiang sediment discharging into the sea in response to human activities. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2015, vol. 19, pp. 645–655. <https://doi.org/10.5194/hess-19-645-2015>
- Guy P.H. *Fluvial sediment concepts*. USGS, book 3, vol. 55, 1970.
- Lopatin G.V. *Nanosy rek SSSR (Obrazovanie i perenos) [River Sediments in USSR (Formation and transport)]*. *Geografiz*, 1952.
- Lupker M., France-Lanord C., Lavé J., Bouchez J., Galy V., Métivier F., Gaillardet J., Lartiges B., Mugnier J.L. A rouse-based method to integrate the chemical composition of river sediments: Application to the Ganga basin. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2011, vol. 116, art. F04012. <https://doi.org/10.1029/2010JF001947>
- Reid L.M., Dunne T. Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology. In *Tools in Fluvial Geomorphology*, 2016, pp. 357–380. <https://doi.org/10.1002/9781118648551.ch16>
- Sidorchuk A.Y. High-frequency variability of aggregate transport under water erosion of well-structured soils. *Eurasian Soil Sci.*, 2009, vol. 42, no. 5, pp. 543–552. <https://doi.org/10.1134/s106422930905010X>
- Sokolov D.I., et al. Impact of Mozhaysk dam on the Moscow river sediment transport. *Geogr. Environ. Sustain.*, 2020, vol. 13, no. 4.
- Syvitski J.P. M., Milliman J.D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *J. Geol.*, 2007, vol. 115, pp. 1–19.
- Szupiany R.N., Lopez Weibel C., Guerrero M., Latosinski F., Wood M., Dominguez Ruben L., Oberg K. Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions. *Earth Surf. Process. Landf.*, 2019, vol. 44, no. 6, pp. 1295–1308. <https://doi.org/10.1002/esp.4572>
- Xu J. Grain-size characteristics of suspended sediment in the Yellow River, China. *Catena*, 2000, vol. 38, no. 3, pp. 243–263. [https://doi.org/10.1016/s0341-8162\(99\)00070-3](https://doi.org/10.1016/s0341-8162(99)00070-3)
- Zhao L., Boufadel M.C., King T., Robinson B., Conmy R., Lee K. Impact of particle concentration and out-of-range sizes on the measurements of the LISST. *Meas. Sci. Technol.*, 2018, vol. 29, no. 5.

УДК 502/504:528

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТИ СЕТИ ФЕДЕРАЛЬНЫХ ЗАПОВЕДНИКОВ И НАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРКОВ РОССИИ ПО ПОЧВЕННОМУ РАЗНООБРАЗИЮ

© 2024 г. А. А. Присяжная^{1, *}, О. В. Чернова^{2, **}, Г. В. Митенко⁴, В. В. Снакин^{1, 3}

¹Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пушкино, Россия

²Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия

*e-mail: alla_pris@rambler.ru

**e-mail: ovcher@mail.ru

Поступила в редакцию 18.05.2023 г.

После доработки 01.10.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Представлены результаты геоинформационного анализа репрезентативности сети федеральных особо охраняемых природных территорий (ООПТ) — 108 государственных заповедников и 66 национальных парков Российской Федерации — в отношении почвенного разнообразия на основе векторной версии Почвенной карты РСФСР (м-б 1 : 2500000). Проведена оценка площадной и типологической представленности почвенного разнообразия различных групп генетически сходных почв в системе ООПТ, сформированной к 2022 г., в сравнении с соответствующими показателями за 2012 г. Выявлено, что в настоящее время в России на федеральном уровне охраняется 2.6% площади почвенного покрова, на 0.7% больше, чем десять лет назад. Площадная представленность в ООПТ почв горных территорий выросла в наибольшей степени. В целом в стране почвы горных территорий и почвенный покров Арктики наиболее полно представлены в ООПТ. Для почвенного покрова степей, сухих степей и полупустынь, засоленных и солонцеватых почв отмечены самые низкие показатели полноты сети ООПТ. Репрезентативность системы федеральных ООПТ в отношении типологического разнообразия почв составляет 63%, что на 7% выше, чем в 2012 г. Самая малочисленная группа почв субтропиков полностью обеспечена охраной. Для тайги и хвойно-широколиственных лесов степень охраны разнообразия природных почв за десятилетие увеличилась на 13% и достигла 75%. Улучшилась ситуация по охране почв степей: показатель репрезентативности увеличился на 10% и составляет 48%. Представленность в заповедниках и национальных парках разнообразия засоленных и солонцеватых почв, с учетом солонцовых комплексов, остается очень низкой (20%).

Ключевые слова: полнота сети ООПТ, естественные почвы, геоинформационное картографирование, типологическое разнообразие почв

DOI: 10.31857/S2587556624060057, EDN: AKGPSR

ВВЕДЕНИЕ

Создание эффективной системы особо охраняемых природных территорий является наиболее важным инструментом сохранения биологического и природного разнообразия. В России за столетнюю историю заповедного дела была сформирована одна из лучших в мире систем особо охраняемых природных территорий (ООПТ), развитие которой рассматривается как государственная и научная проблема организации территориальной охраны природы (Тишков, 2017, 2021).

Существующие национальные сети охраняемых территорий все еще не отражают в достаточной мере ключевых особенностей биоразнообразия и имеют низкий уровень экологической целостности из-за нарастающей деградации окружающей среды. На несбалансированность сетей ООПТ, на чрезвычайную сложность оценки их эффективности, на разработку экологических и биологических критериев для определения ключевых для сохранения биоразнообразия территорий указывают многие исследования (Asaad et al., 2016; Donald et al., 2019; Lee and Abdullah, 2019; Rodrigues and Cazalis, 2020; и др.).

Для повышения эффективности и экологической репрезентативности охраняемых территорий некоторые авторы предлагают при их проектировании учитывать информацию о богатых видами и малоизученных таксонах, имеющих значительное влияние на сохранение биоразнообразия региона в целом; при этом рекомендуется для восполнения пробелов информации использование фактических данных в сочетании с геоинформационными моделями распространения видов (Delso et al., 2021).

Репрезентативность ООПТ определяется их представленностью и достаточностью в системе многообразия низших единиц биогеографического районирования — провинций и районов (Тишков, 2016). Большинство публикаций посвящено оценке репрезентативности сети ООПТ по отношению к географическому и биологическому разнообразию отдельных регионов России (Алексеев, 2015; Каширина, Голубева, 2018; Санников, Бузмаков, 2015; и др.) и других стран (Соколов, 2021 и др.; Cuesta et al., 2017; Neugarten et al., 2020). Глубокий анализ репрезентативности существующей системы федеральных и региональных ООПТ и эффективности ее функционирования для обеспечения сохранения биологического разнообразия арктических регионов России проведен в работе (Стишов, 2013). Предпринимались также попытки оценки репрезентативности системы федеральных ООПТ для всей территории России, но подобных работ значительно меньше (Иванов, Кончиц, 2009; Мельченко и др., 2004; Чернова, 2012; и др.). В коллективном обзоре (Кревер и др., 2009) всесторонне рассмотрены вопросы полноты охвата системой ООПТ России биологического, а также ряда аспектов географического разнообразия (физико-географического, экологического, ландшафтного). Работа является первой для России разработкой перспективной сети федеральных ООПТ на основе анализа большого набора источников и показателей. Необходимо отметить, что охрана разнообразия природных почв в работе не рассматривается, при том, что почвы, являясь звеном, связывающим водно биосферные и геосферные круговороты вещества и энергии, достаточно полно отражают в своем генезисе и характеристиках особенности функционирования и развития природных комплексов.

Инвентаризация видового состава животных и растений в пределах охраняемых природных территорий ведется регулярно, в то же время исторически сложилось, что разнообразие природных почв не учитывается, а сохраняется лишь как пассивный компонент природных комплексов. Систематическое описание природных почв государственных заповедников и национальных парков страны впервые обобщено в справочно-

аналитическом издании (Почвы ..., 2012). На основе представленной в этой книге информации был проведен анализ репрезентативности сети 143 федеральных ООПТ (102 заповедников и 41 национального парка) по отношению к почвенному разнообразию, затем с учетом новых территорий — 150 ООПТ (103 заповедников и 47 национальных парков) (Присяжная и др., 2016, 2021б).

В настоящей работе было проведено исследование почвенного покрова 108 государственных природных заповедников и 66 национальных парков (на 01.06.2022 г.) и оценена динамика состояния охраны почвенного разнообразия в стране за последнее десятилетие.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В системе ArcView GIS проведена оценка площадной и типологической представленности разнообразия почв России в пределах ООПТ федерального значения на основе цифровой версии Почвенной карты РСФСР (м-б 1 : 2500000) (1988) — наиболее крупного масштаба из ныне существующих почвенных карт, сделанной в единой концепции и с единой легендой для всей территории России. В 2019 г. карта была дополнена Почвенной картой Крыма (Урусевская и др., 2019) того же масштаба, выполненной в соответствии с идеологией и легендой Почвенной карты РСФСР; при этом к легенде было добавлено 4 новых выдела (2 почвы и 2 почвенных комплекса). Обе указанные карты послужили основой для расчетов. Границы ООПТ оцифрованы в соответствии с установочными документами ООПТ и информацией сайта¹ и нанесены на Почвенную карту. Состав почвенного покрова был проанализирован по группам почв в соответствии с разделами легенды карты. Разнообразие почв и занимаемые ими площади оценивали по основной (преобладающей по площади) почве каждого полигона Почвенной карты без учета сопутствующих почв. Комплексы почв учтены в соответствующей группе по преобладающей по площади почве (первая почва в названии комплекса). При рассмотрении разнообразия почвенных комплексов учитывали только их состав, не принимая во внимание генетико-геометрическую структуру комплексов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В цифровой версии Почвенной карты представлены 259 площадных картографических полигонов, идентифицированных как почвы, непочвенные образования и воды. Необходимо

¹ Особо охраняемые природные территории России. <http://oort.aari.ru/> (дата обращения 01.02.2023).

Таблица 1. Соотношение площадей почвенных и непочвенных образований на территории России и ООПТ, %

Территория	Почвенный покров	Непочвенные образования
Россия	97.6	2.4
Заповедники	94.4	5.6
Национальные парки	86.6	13.4
ООПТ*	91.0	9.0

Примечание: * заповедники и национальные парки.

отметить, что непочвенные образования (водные объекты, каменистые россыпи, рыхлые породы, пески и ледники) занимают значительные площади охраняемых территорий (табл. 1). Так, в национальном парке Русская Арктика более 90% площади представлено непочвенными образованиями, а в заповедниках Даурский, Дарвинский, Путоранский и национальном парке Сайлюгемский собственно почвенный покров занимает менее 50%. В расчетах площадной репрезентативности почв в пределах ООПТ, результаты которых представлены далее, учитывали только полигоны карты, идентифицированные как почвы.

Разнообразие почв на территории ООПТ и России. В соответствии с Почвенной картой РФ на территории страны выделено 254 почвенных единицы: 189 почв и 65 почвенных комплексов (табл. 2), 159 из них (133 почвы и 26 почвенных комплексов) представлено в системе ООПТ выс-

шего уровня. Разнообразие почв, как в целом, так и практически по всем группам, выше в государственных заповедниках, чем в национальных парках. Все охраняемые типы засоленных и солонцеватых почв и почти все почвы сухих степей и полупустынь встречаются только в заповедниках. В целом при рассмотрении разнообразия почв на уровне выделов легенды Почвенной карты на территории природных заповедников и национальных парков не обнаружено 95 почвенных вариантов (37%): 56 почв (30%) и 39 почвенных комплексов (60%).

Характерной чертой почвенного покрова некоторых регионов является его высокая комплексность: в Высокой Арктике и тундре 70% почвенного разнообразия представлено почвенными комплексами, в группе засоленных и солонцеватых почв — более 50%, гидроморфных почв — чуть менее 50%. На охраняемых территориях почвенных комплексов представлено меньше. В целом почвенный покров России на 25% состоит из комплексов, а ООПТ — на 16%.

Данные по соотношению площадей, занимаемых крупными группами почв на территории России и в пределах ООПТ (рис. 1), наглядно иллюстрируют непропорциональную представленность различных почв на охраняемых территориях. Так, доля площади почв горных территорий в ООПТ в три раза, а почвенного покрова Арктики и тундры и почв субтропиков в 2 раза превышает их долю в почвенном покрове России. Большая часть площади почвенного покрова Арктики охраняется в заповедниках.

Таблица 2. Представленность почвенного разнообразия на территории России и ООПТ

№ группы	Группа почв	Число почвенных выделов, ед.					
		ООПТ			Россия		
		п	кп	всего	п	кп	всего
1	Почвы и комплексы почв Высокой Арктики и тундры	7	11	18	9	22	31
2	Почвы и комплексы почв тайги и хвойно-широколиственных лесов	62	2	64	75	10	85
3	Почвы широколиственных лесов и лесостепей	12	—	12	19	—	19
4	Почвы и комплексы почв степей	13	2	15	27	4	31
5	Почвы и комплексы почв сухих степей и полупустынь	10	3	13	17	7	24
6	Почвы субтропиков	3	—	3	3	—	3
7	Гидроморфные почвы и комплексы почв	11	6	17	14	12	26
8	Засоленные и солонцеватые почвы и комплексы почв	2	1	3	7	8	15
9	Пойменные и маршевые почвы	6	1	7	8	2	10
10	Почвы горных территорий	7	—	7	10	—	10
Всего		133	26	159	189	65	254

Примечание: п — почвы, кп — комплексы почв.

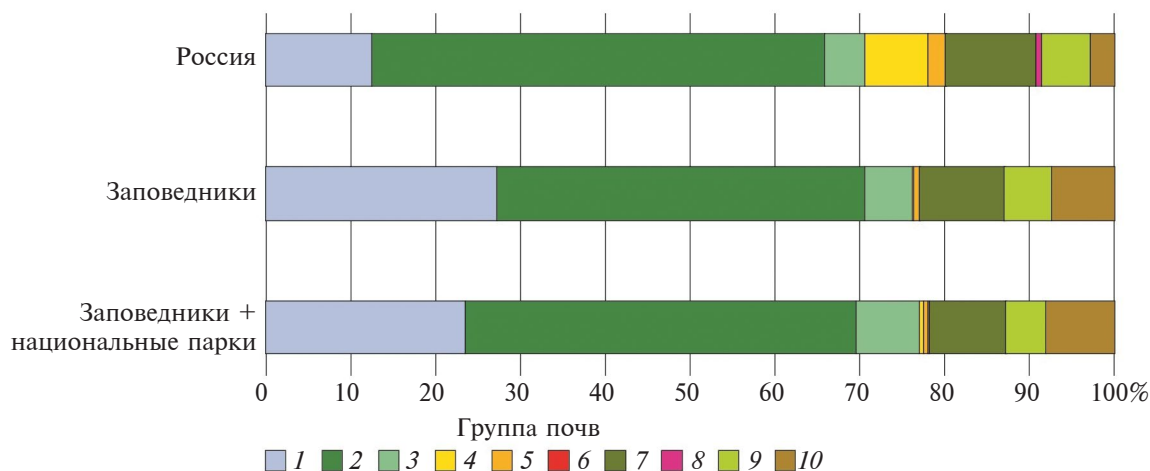


Рис. 1. Соотношение площадей групп почв на территории России и ООПТ.
Примечание: номера групп почв см. в табл. 2.

Представленность на ООПТ засоленных и солонцеватых почв в 25 раз, а почв сухих степей и полупустынь почти в 4 раза ниже распространенности почв этих групп в стране. Необходимо также отметить, что относительная площадь почв и комплексов почв степей в почвенном покрове заповедников и национальных парков более чем в 13 раз (а заповедников в 24 раза) меньше, чем в целом по стране.

Репрезентативность сети федеральных ООПТ в отношении почвенного покрова (в целом по стране и конкретных групп генетически сходных почв) оценивали по двум параметрам: площадной представленности — относительная площадь, занимаемая группами почв в ООПТ, и типологической представленности — относительное число почвенных выделов в ООПТ (табл. 3).

В России 2.6% площади почвенного покрова охраняется в государственных заповедниках и национальных парках. Территориальная охрана почв горных территорий, почв и комплексов почв тундры, почв субтропиков и почв широколиственных лесов и лесостепей — выше среднего уровня по стране. Для почв тайги и хвойно-широколиственных лесов, гидроморфных почв, а также пойменных и маршевых почв относительная площадь, занимаемая ООПТ, немного ниже среднего уровня по стране. Площадная представленность почв степей, сухих степей и полупустынь, засоленных и солонцеватых почв крайне низкая: 0.1–0.7%.

На основании методики, использованной в работе (Кревер и др., 2009), были рассчитаны условные показатели полноты территориальной

Таблица 3. Репрезентативность системы федеральных ООПТ в отношении охраны почвенного покрова

№ группы почв	Относительная площадь ООПТ, %		П**, балл	Относительное число почвенных выделов на ООПТ, %	
	заповедники	ООПТ*		заповедники	ООПТ*
1	3.3	4.8	5	52	58
2	1.2	2.2	3	62	75
3	1.7	3.9	4	53	63
4	0.1	0.2	1	42	48
5	0.5	0.7	1	54	54
6	0.7	4.6	3	67	100
7	1.4	2.2	3	65	65
8	0.1	0.1	1	20	20
9	1.5	2.1	3	70	70
10	3.9	7.4	5	70	70
В среднем по стране	1.5	2.6	3	56	63

Примечания. Номера групп почв см. в табл. 2; * заповедники и национальные парки; ** показатель полноты системы ООПТ.

Таблица 4. Шкала показателя полноты системы ООПТ, балл

Относительная площадь ООПТ, %	Относительная площадь заповедников, %		
	>2	1–2	<1
>3	5	4	3
2–3	4	3	2
<2	—	2	1

охраны различных групп почв (табл. 4) по сведениям о занимаемой ими площади на охраняемых территориях с учетом вклада заповедников. Средние по стране значения относительной площади были приняты в качестве отправных: 2–3% — для заповедников и национальных парков и 1–2% — для заповедников.

В соответствии с такой оценкой (см. табл. 3), только почвы горных территорий и почвенный покров Арктики наиболее полно представлены на охраняемых территориях. Полнота охвата охраняемыми территориями почв степей, сухих степей и полупустынь, засоленных и солонцеватых почв оценивается в 1 балл.

Несомненно, еще более полную картину представленности крупных групп генетически сходных почв в федеральной сети ООПТ позволит получить дополнительный анализ территорий федеральных заказников, площадь которых (без учета морских акваторий) составляет 15% общей площади ООПТ федерального значения.

В целом по стране репрезентативность системы федеральных ООПТ в отношении типологического почвенного разнообразия составляет 63% (см. табл. 3). Самая малочисленная группа почв субтропиков полностью обеспечена охраной. Для группы почв тайги и хвойно-широколиственных лесов отмечается высокая степень обеспеченности охраны почвенного разнообразия. Пойменные и маршевые почвы и почвы горных территорий хорошо представлены на охраняемых территориях. Показатели репрезентативности в отношении разнообразия почв степей, сухих степей и полупустынь — ниже среднего по стране. Необходимо отметить очень низкую степень охраны засоленных и солонцеватых почв — всего 20% типологического разнообразия представлено в системе федеральных ООПТ.

Засоленные и солонцеватые почвы и комплексы почв занимают в России менее 1% площади почвенного покрова страны (см. рис. 1), встречаются на территориях пяти заповедников, максимальную площадь (72% охраняемой площади группы) они занимают в Даурском заповеднике. Распространение засоленных и солонцеватых почв и комплексов почв на территории России (на фоне полигонов Почвенной карты) и расположение ООПТ, в почвенном покрове которых встречаются почвы группы, демонстрирует рис. 2. На картосхеме наглядно видно, что все ООПТ размещены на границе ареалов типичного распространения засоленных и солонцеватых почв.

**Рис. 2.** Засоленные и солонцеватые почвы и комплексы почв на Почвенной карте России.

Необходимо отметить, что оценка типологического разнообразия в процентах носит ориентировочный характер. В частности, мы оценивали почвенное разнообразие для всей территории национальных парков; при этом остается неизвестным, представлены ли все почвенное разнообразие территории в заповедных (что могло бы гарантировать их сохранение) или в менее охраняемых зонах национальных парков — рекреационных, хозяйственной деятельности и др.

Неопределенность в оценке типологической представленности почвенного разнообразия вносит также высокая комплексность почвенного покрова, характерная для некоторых групп почв (см. табл. 2). В соответствии с концепцией Почвенной карты РФ в одном контуре карты может выделяться одна основная почва, преобладающая по площади, и до трех сопутствующих. Кроме того, почвенные комплексы могут состоять из двух, трех или четырех почв. Таким образом, в пределах одного почвенного контура карты может быть представлено до 9–12 почвенных разновидностей, соответствующих выделам легенды. Поскольку распределение почв в пределах контура неизвестно, определить перечень почв, встречающихся в пределах конкретной охраняемой территории, можно лишь с определенной вероятностью, очень высокой, если почва относится к основной в контуре или входит в состав основного почвенного комплекса.

Детальный анализ всех почвенных разновидностей, встречающихся как самостоятельно, так и в составе почвенных комплексов, был проведен для группы почв Арктики и тундры. Был составлен перечень всех типов почв и оценена их представленность на ООПТ. Выявлено, что при таком уровне рассмотрения существую-

щая система федеральных заповедников и национальных парков этого региона характеризуется достаточно высокой эффективностью в отношении типологического разнообразия почв (показатель репрезентативности с большой долей вероятности может достигать 94%). На охраняемых территориях не представлен единственный почвенный выдел в пределах ареалов своего типичного распространения — глеезем арктический, входящий в состав почвенных комплексов (Присяжная и др., 2021а).

Развитие системы федеральных ООПТ. Проведен анализ площадной и типологической представленности разнообразия почв России в пределах федеральных заповедников и национальных парков в настоящее время в сравнении с теми же показателями в 2012 г. За счет образования новых территорий, реорганизации некоторых охраняемых территорий и перевода крымских ООПТ в статус федеральных число заповедников и национальных парков возросло на 31 ООПТ. Общая площадь почвенного покрова охраняемых территорий увеличилась более чем на 25%.

Динамику изменения репрезентативности системы ООПТ по отношению к почвенному разнообразию демонстрирует рис. 3. За 10 лет территориальная охрана почвенного покрова страны увеличилась в целом на 0.7%. При этом для почв горных территорий, почв субтропиков, почв широколиственных лесов и лесостепей, а также гидроморфных почв показатель площадной представленности вырос в наибольшей степени (см. рис. 3а).

В целом по стране с 2012 г. репрезентативность системы федеральных ООПТ в отношении почвенного разнообразия увеличилась на 7% (см. рис. 3б). Самая малочисленная груп-

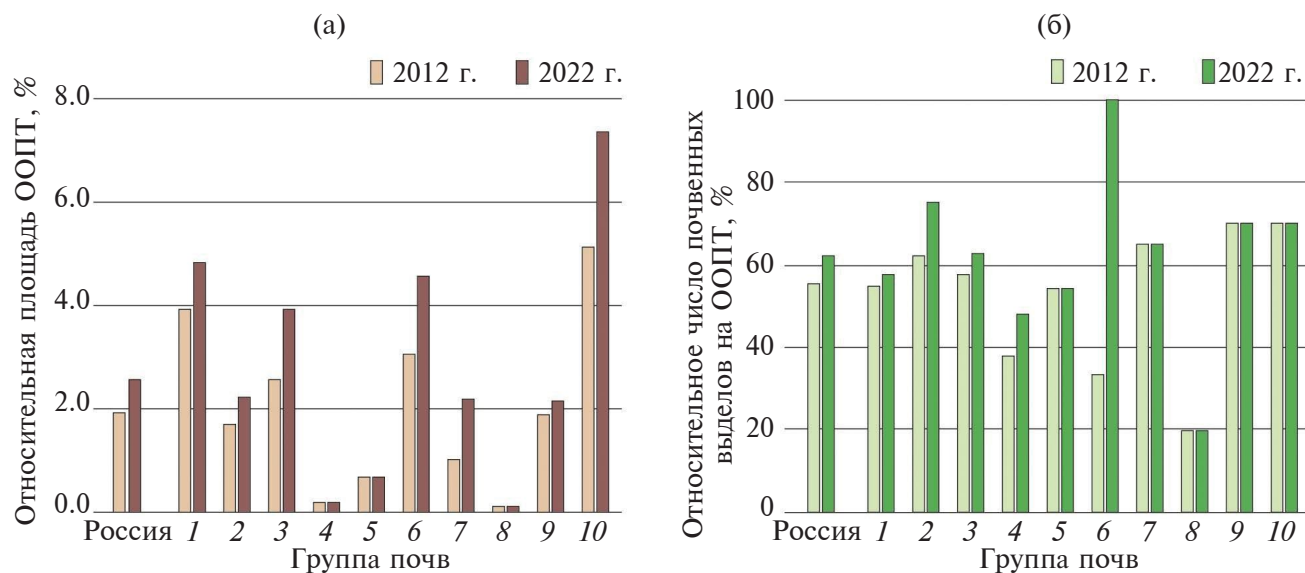


Рис. 3. Динамика площадной (а) и типологической (б) представленности почвенного разнообразия на ООПТ.

Примечание: номера групп почв см. в табл. 2.

па почв субтропиков в настоящее время полностью обеспечена охраной. Для группы почв тайги и хвойно-широколиственных лесов степень обеспеченности охраны почвенного разнообразия увеличилась на 13%. Ранее отмечалось (Снакин и др., 2019; Чернова, 2016), что дерново-подзолистые почвы со вторым гумусовым горизонтом и большая группа палевых почв, занимающие на территории России значительные площади, вовсе не были представлены на охраняемых территориях. За счет организации национального парка Ленские столбы представленность разнообразия палевых почв увеличилась на 4 типа, а Васюганского заповедника — на один тип дерново-подзолистых почв со вторым гумусовым горизонтом.

Необходимо отметить, что значительно улучшилась ситуация по охране почв степей: показатель репрезентативности увеличился на 10%, хотя все еще остается низким — на 15% меньше среднего по стране. К сожалению, репрезентативность системы федеральных ООПТ в отношении разнообразия засоленных и солонцеватых почв не изменилась и остается крайне неудовлетворительной.

На весьма низкую полноту федеральной системы ООПТ в отношении степных экосистем обращается внимание в аналитическом обзоре (Стишов, 2020), при этом указывается, что за период с 2008 по 2018 г. репрезентативность и полнота системы ООПТ федерального значения России в той или иной степени повысилась в отношении почти всех рассмотренных в работе категорий природных объектов.

В работе (Стишов, 2013, с. 36) утверждается, "... для удовлетворительной репрезентативности необходима представленность на ООПТ не менее 75% всех вариантов ландшафтов и экосистем региона, включая все наиболее широко распространенные, а полнота в отношении отдельных вариантов ландшафтов и экосистем считается удовлетворительной, если охраняется не менее 10% площади последних". Если исходить из этих положений, в целом охрана почвенного покрова в стране, несмотря на положительную динамику, пока не может быть признана удовлетворительной. Этим требованиям отвечает только охрана почв субтропиков, тайги и хвойно-широколиственных лесов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геоинформационный анализ репрезентативности сети федеральных ООПТ (государственные заповедники и национальные парки) Российской Федерации в отношении почвенного разнообразия выполнен с учетом почвенного покрова полуострова Крым.

Обнаружено непропорциональное соотношение площадей различных подразделений ге-

нетически сходных почв на территории России и в пределах ООПТ. Представленность на охраняемых территориях засоленных и солонцеватых почв в 25 раз, а почв степей в 13 раз ниже их распространенности в стране.

Проведена оценка площадной представленности почв и полноты охвата федеральными ООПТ в целом по стране и различных групп почв. В России 2.6% площади почвенного покрова охраняется на федеральном уровне. Почвы горных территорий и почвенный покров Арктики и тундры наиболее полно представлены на охраняемых территориях. Для почв степей, сухих степей и полупустынь, засоленных и солонцеватых почв степень охвата особо охраняемыми природными территориями крайне низкая.

Репрезентативность системы федеральных ООПТ в отношении почвенного разнообразия в целом по стране составляет 63%. Выявлены значительные различия в представленности на территории заповедников и национальных парков почвенного разнообразия различных групп почв. Самая малочисленная группа почв субтропиков полностью обеспечена охраной. Для группы почв тайги и хвойно-широколиственных лесов показатель репрезентативности — 75%. Отмечена очень низкая степень охраны засоленных и солонцеватых почв — всего 20% типологического разнообразия представлено в системе федеральных ООПТ.

Сравнительный анализ полученных данных с предыдущими исследованиями показал, что за последнее десятилетие с учетом площади вновь образованных ООПТ территориальная охрана почвенного покрова России увеличилась на 0.7%. Репрезентативность системы федеральных ООПТ в отношении почвенного разнообразия увеличилась в стране на 7%. Для группы почв тайги и хвойно-широколиственных лесов степень обеспеченности охраны почвенного разнообразия увеличилась на 13%. Значительно улучшилась ситуация по охране почв степей: показатель репрезентативности увеличился на 10%. Репрезентативность системы федеральных ООПТ в отношении разнообразия засоленных и солонцеватых почв не изменилась и остается неудовлетворительной.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственных заданий № 122041200035–2 ИФПБ РАН, №АААА-А18-118042490060-1 ИПЭЭ РАН, а также при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-14-00107.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the State Assignment, project no. 122041200035–2 of the Institute of Fundamental Problems of Biology of the Russian Academy of Sciences, and project

no. AAAA-A18-118042490060-1 of the Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences; and was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-14-00107.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевко Н.А.* Анализ ландшафтной репрезентативности сети ООПТ Камчатского края с применением картографического метода исследования // Вестн. ДВО РАН. 2015. № 2. С. 126–133.
- Иванов А.Н., Кончиц М.В.* Представленность ландшафтного разнообразия России в сети ООПТ // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2009. Т. 18. № 2. С. 5–10.
- Каширина Е.С., Голубева Е.И.* Ландшафтная репрезентативность особо охраняемых природных территорий Севастополя // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2018. № 1. С. 108–112.
- Кревер В.Г., Стишов М.С., Онуфреня И.А.* Особо охраняемые природные территории России: современное состояние и перспективы развития. М.: Орбис Пиктус, 2009. 456 с.
- Мельченко В.Е., Хрисанов В.Р., Митенко Г.В., Юрин В.О., Снакин В.В.* Ландшафтный анализ системы ООПТ России // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2004. № 6. С. 101–104.
- Почвенная карта РСФСР. М-б 1 : 2500000 / гл. ред. В.М. Фридланд. М.: ГУГК, 1988. 16 с. (Скорректированная цифровая версия, 2007).
- Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации / гл. ред. Г.В. Добровольский. М.: Фонд “Инфосфера” — НИА-Природа, 2012. 478 с.
<https://soil-db.ru/nauchnaya-deyatelnost/pochvy-zapovednikov-i-nacionalnyh-parkov-rf>
- Присяжная А.А., Хрисанов В.Р., Митенко Г.В., Чернова О.В., Снакин В.В.* Анализ почвенного разнообразия заповедников и национальных парков России (с учетом новых территорий) // Геодезия и картография. 2016. № 12. С. 7–15.
<https://doi.org/10.22389/0016-7126-2016-918-12-7-15>
- Присяжная А.А., Чернова О.В., Митенко Г.В., Снакин В.В.* Геоинформационный анализ охраны почвенного покрова в Арктической зоне Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2021а. Т. 11. № 4. С. 529–540.
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-4-529-540>
- Присяжная А.А., Чернова О.В., Снакин В.В.* Повышение репрезентативности системы ООПТ в отношении почв как важная часть сохранения биоразнообразия // Тр. Мордовского гос. природного заповедника имени П.Г. Смидовича. 2021б. № 28. С. 208–215.
- Санников П.Ю., Бузмаков С.А.* Развитие сети особо охраняемых природных территорий для сохранения географического разнообразия Пермского края // Вестн. Удм. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2015. Т. 25. № 4. С. 22–34.
- Снакин В.В., Чернова О.В., Присяжная А.А.* Пути снижения риска потери почвенного разнообразия // Проблемы анализа риска. 2019. Т. 16. № 3. С. 28–40.
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-3-28-40>
- Соколов А.С.* Количественная оценка ландшафтной репрезентативности охраняемых природных территорий регионов // Псков. регионологич. журн. 2021. Т. 17. № 4. С. 123–137.
<https://doi.org/10.37490/s221979310017159-7>
- Стишов М.С.* Развитие федеральной системы особо охраняемых природных территорий России в период 2009–2018 гг. и его дальнейшие перспективы. М.: WWF, 2020. 184 с.
- Стишов М.С.* Особо охраняемые природные территории Российской Арктики: современное состояние и перспективы развития. М.: Скорость цвета, 2013. 427 с.
- Тишков А.А.* “Характерное пространство” и “характерное время” как ключевые категории биогеографии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 4. С. 20–33.
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-4-20-33>
- Тишков А.А.* Концепция биосферных резерватов программы МАБ и задачи сохранения биоразнообразия: достижения и проблемы спустя 50 лет // Вопросы географии. 2021. № 152. С. 62–100.
<https://doi.org/10.24057/probl.geogr.152.3>
- Тишков А.А.* Сто лет методологии территориальной охраны природы России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 1. С. 8–19.
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-1-8-19>
- Урусевская И.С., Мартыненко И.А., Алябина И.О.* Почвенная карта Крыма. М-б 1 : 2500000. Врезка к Карте почвенно-экологического районирования Российской Федерации. М-б 1 : 8000000. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, фак-тет почвоведения, 2019.
- Чернова О.В.* Оценка репрезентативности сети особо охраняемых природных территорий России с точки зрения сохранения разнообразия естественных почв / Электронное науч. изд-е Альманах Пространство и Время. 2016. Т. 11. № 1. 10 с.
- Чернова О.В.* Сохранение естественных почв на охраняемых природных территориях Российской Федерации // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 2. С. 30–37.
- Asaad I., Lundquist C., Erdmann M., Costello M.* Ecological criteria to identify areas for biodiversity conservation // Biological Conservation. 2016. Vol. 213 (Part B). P. 309–316.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.10.007>
- Cuesta F., Peralvo M., Merino-Viteri A., et al.* Priority areas for biodiversity conservation in mainland Ecuador // Neotropical Biodiversity. 2017. Vol. 3 (1). P. 93–106.
<https://doi.org/10.1080/23766808.2017.1295705>
- Delso Á., Fajardo J., Muñoz J.* Protected area networks do not represent unseen biodiversity // Scientific Reports. 2021. Vol. 11 (12275).
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-91651-z>
- Donald P.F. Buchanan G.M., Balmford A., et al.* The prevalence, characteristics and effectiveness of Aichi

- Target 11's "other effective area-based conservation measures" (OECMs) in Key Biodiversity Areas // *Conservation Let.* 2019. Vol. 12 (e12659).
<https://doi.org/10.1111/conl.12659>
- Lee W.H., Abdullah S.A. Framework to develop a consolidated index model to evaluate the conservation effectiveness of protected areas // *Ecological Indicators.* 2019. Vol. 102. P. 131–144.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.02.034>
- Neugarten R.A., Moull K., Martinez N.A., et al. Trends in protected area representation of biodiversity and ecosystem services in five tropical countries // *Ecosystem Services.* 2020. Vol. 42. (101078).
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101078>
- Rodrigues A.S. L., Cazalis V. The multifaceted challenge of evaluating protected area effectiveness // *Nature Communications.* 2020. Vol. 11. (5147).
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18989-2>

Geoinformation Analysis of the Representativeness of the Network of Russian Federal Reserves and National Parks in Terms of Soil Diversity

A. A. Prisyazhnaya^{a, *}, O. V. Chernova^{b, **}, G. V. Mitenko^d, and V. V. Snakin^{a, c}

^a*Institute of Fundamental Problems of Biology of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia*

^b*Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^c*Lomonosov Moscow State University, The Earth Science Museum, Moscow, Russia*

^d*Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia*

*e-mail: alla_pris@rambler.ru

**e-mail: ovcher@mail.ru

The representativeness of the federal network of nature protected areas (PAs) (108 state reserves and 66 national parks of the Russian Federation) in terms of soil diversity was calculated based on the Soil Map of the Russian Federation (1 : 2.5M scale) by using geoinformation analysis. The composition of the soil cover was analyzed for groups of genetically similar soils. The areal and typological representation of soil diversity in PAs in 2022 was evaluated in comparison with the corresponding indicators in 2012. Currently, 2.6% of the soil cover area in Russia is preserved in federal nature protected areas, which is 0.7% higher than ten years ago. The areal representation of mountainous soils in PAs has increased to the greatest extent. In general, the soils of the mountainous territories and the soil cover of the Arctic are quite well represented in PAs, contrary to the soil cover of southern regions: steppes, dry steppes, semi-deserts also as saline and alkaline soils. The representativeness of the federal protected areas network in terms of the typological diversity of soils is 63%, which is 7% higher than in 2012. The diversity of the smallest soil group (subtropical soils) is fully protected. The level of protection of natural soil diversity for taiga and coniferous-deciduous forests increased by 13% over the decade and reached 75%. The situation of protection of steppe soils has improved: the representativeness index has increased by 10% and is at 48%. Representation of the saline and alkaline soils diversity, considering solonchic complexes, in state reserves and national parks remains very low (20%).

Keywords: completeness of the protected areas network, natural soils, geoinformation mapping, soils typological diversity

REFERENCES

- Alekseenko N.A. An analysis of the landscape representativeness of the Specially Protected Natural Areas network of Kamchatka region using the cartographical method of research. *Vestn. DVO RAN*, 2015, no. 2, pp. 126–133. (In Russ.).
- Asaad I., Lundquist C., Erdmann M., Costello M. Ecological criteria to identify areas for biodiversity conservation. *Biol. Conserv.*, 2016, vol. 213 (Part B), pp. 309–316.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.10.007>
- Chernova O.V. Assessment of the representativeness of the network of specially protected natural areas in Russia in terms of preserving the diversity of natural soils. *Elektr. Nauch. Izd. Al'manakh Prostranstvo Vremya*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 1–10. (In Russ.).
- Chernova O.V. Conservation of natural soils in protected natural areas of the Russian Federation. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2012, no. 2, pp. 30–37. (In Russ.).
- Cuesta F., Peralvo M., Merino-Viteri A., Bustamante M., Baquero F., Freile J., Muriel P., Torres-Carvajal O. Priority areas for biodiversity conservation in mainland Ecuador. *Neotrop. Biodivers.*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 93–106.
<https://doi.org/10.1080/23766808.2017.1295705>

- Delso Á., Fajardo J., Muñoz J. Protected area networks do not represent unseen biodiversity. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, art. 12275.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-91651-z>
- Donald P.F., Buchanan G.M., Balmford A., et al. The prevalence, characteristics and effectiveness of Aichi Target 11's "other effective area-based conservation measures" (OECMs) in Key Biodiversity Areas. *Conserv. Lett.*, 2019, vol. 12, art. e12659.
<https://doi.org/10.1111/conl.12659>
- Ivanov A.N., Konchits M.V. Representation of landscape diversity in the protected areas network in Russia. *Samar. Luka: Probl. Reg. Glob. Ekol.*, 2009, vol. 18, no. 2, pp. 5–10. (In Russ.).
- Kashirina E.S., Golubeva E.I. The landscape representativeness of nature protection areas in Sevastopol. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2018, no. 1, pp. 108–112. (In Russ.).
- Krever V.G., Stishov M.S., Onufrenya I.A. *Osobo okhranyaemye prirodnye territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Specially Protected Natural Territories of Russia: Current State and Development Prospects]. Moscow: Orbis Piktus, 2009. 456 p.
- Lee W.H., Abdullah S.A. Framework to develop a consolidated index model to evaluate the conservation effectiveness of protected areas. *Ecol. Indic.*, 2019, vol. 102, pp. 131–144.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.02.034>
- Mel'chenko V.E., Khrisanov V.R., Mitenko G.V., Yurin V.O., Snakin V.V. Landscape analysis of the protected areas system in Russia. *Ispol'zov. Okhrana Prir. Resur. Rossii*, 2004, no. 6, pp. 101–104. (In Russ.).
- Neugarten R.A., Moull K., Martinez N.A., Andriamaro L., Bernard C., Saenz L., et al. Trends in protected area representation of biodiversity and ecosystem services in five tropical countries. *Ecosyst. Serv.*, 2020, vol. 42, art. 101078.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101078>
- Pochvennaya karta RSFSR. Masshtab 1:2500000* [Soil Map of the RSFSR. Scale 1:2500000]. Fridland V.M., Ed. Moscow: GUGK, 1988. 16 p.
- Pochvy zapovednikov i natsional'nykh parkov Rossiiskoi Federatsii* [Soils of Reserves and National Parks in the Russian Federation]. Dobrovol'skii G. V., Ed. Moscow: Fond "Infosfera" — NIA-Priroda, 2012. 478 p.
- Prisyazhnaya A.A., Chernova O.V., Mitenko G.V., Snakin V.V. Geoinformation analysis of soil cover protection in the Arctic zone of the Russian Federation. *Arktika: Ekol. Ekon.*, 2021a, vol. 11, no. 4, pp. 529–540. (In Russ.).
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-4-529-540>
- Prisyazhnaya A.A., Chernova O.V., Snakin V.V. Increasing the representativeness of the protected area system in relation to soils as an important part of biodiversity conservation. *Tr. Mord.Gos. Prir. Zapoved. Imeni P.G. Smidovicha*, 2021b, no. 28, pp. 208–215. (In Russ.).
- Prisyazhnaya A.A., Khrisanov V.R., Mitenko G.V., Chernova O.V., Snakin V.V. The analysis of a soil diversity of nature reserves and national parks of Russia (new territories). *Geod. Kartogr.*, 2016, no. 12, pp. 7–15. (In Russ.).
<https://doi.org/10.22389/0016-7126-2016-918-12-7-15>
- Rodrigues A.S. L., Cazalis V. The multifaceted challenge of evaluating protected area effectiveness. *Nat. Commun.*, 2020, vol. 11, art. 5147.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18989-2>
- Sannikov P.Yu., Buzmakov S.A. Development of a protected areas network for conservation of geographic diversity in Perm region. *Vestn. Udmurt. Univ., Ser. Biol. Nauki Zemle*, 2015, vol. 25, no. 4, pp. 22–34. (In Russ.).
- Snakin V.V., Chernova O.V., Prisyazhnaya A.A. Ways to reduce the risk of loss of soil diversity. *Probl. Analiza Risk.*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 28–40. (In Russ.).
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-3-28-40>
- Sokolov A.S. Quantitative assessment of landscape representativity of regional protected natural areas. *Pskov. Regional. Zh.*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 123–137. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37490/s221979310017159-7>
- Stishov M.S. *Osobo okhranyaemye prirodnye territorii Rossiiskoi Arktiki: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Specially Protected Natural Territories of the Russian Arctic: Current State and Development Prospects]. Moscow: Skorost' tsveta Publ., 2013. 427 p.
- Stishov M.S. *Razvitie federal'noi sistemy osobo okhranyaemykh prirodnykh territorii Rossii v period 2009–2018 gg. i ego dal'neishie perspektivy* [Development of the Federal System of Specially Protected Natural Areas in Russia in the Period 2009–2018 and Its Future Prospects]. Moscow: WWF, 2020. 184 p.
- Tishkov A.A. "Characteristic space" and "characteristic time" as a key categories of biogeography. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2016, no. 4, pp. 20–33. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-4-20-33>
- Tishkov A.A. One hundred years of the methodology of territorial nature protection of Russia: On the centenary of nature conservation. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017, no. 1, pp. 8–19. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-1-8-19>
- Tishkov A.A. The concept of biosphere reserves of the MAB Programme and the tasks of biodiversity conservation: achievements and challenges 50 years later. In *Voprosy geografii. Vyp. 152* [Problems of Geography. Vol. 152]. Moscow, 2021, pp. 62–100. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24057/probl.geogr.152.3>
- Urusevskaya I.S., Martynenko I.A., Alyabina I.O. Soil map of Crimea. Scale 1 : 2500000. In *Karta pochvenno-ekologicheskogo raionirovaniya Rossiiskoi Federatsii. M 1 : 8000000* [Map of Soil-Ecological Zoning of the Russian Federation. Scale 1 : 8000000]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., Fakul't. Pochved., 2019.

УДК 556.11

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ ВОДОХРАНИЛИЩ ВЕРХНЕВОЛЖСКОГО И КАМСКОГО КАСКАДОВ

© 2024 г. С. В. Ясинский^{1,*}, Е. С. Гришанцева^{1,2}, А. М. Расулова³, М. А. Фасахов⁴,
А. А. Шайдулина⁴, Е. А. Кашутина¹

¹Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет,
Москва, Россия

³Институт озероведения РАН — СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

*e-mail: yasisergej@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.08.2024 г.

После доработки 27.08.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Статья посвящена оценке качества воды Верхневолжского и Камского каскадов водохранилищ бассейна Волги в разные по водности годы в современный период. Определены основные факторы, влияющие на формирование качества воды в водохранилищах, на которое значительное влияние оказывают поступление загрязняющих веществ с водосборов из точечных и диффузных антропогенных источников. Материалами для работы послужили данные государственного водохозяйственного мониторинга, осуществляемого лабораториями организаций, подведомственных Верхневолжскому и Камскому Бассейновым водным управлениям Росводресурсов РФ. При оценке качества и экологического состояния поверхностных вод, а также для сравнительного анализа степени загрязнения водных объектов применялись интегральные индексы: индекс загрязненности воды (ИЗВ) и удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ), рассчитанные для лет различной водности. Оценка водности лет определялась по эмпирическим кривым обеспеченности годового притока воды к отдельным водохранилищам. Анализ разностно-интегральных кривых годового притока к Верхневолжскому и Камскому каскадам водохранилищ показал их асинхронность с начала XXI в. Для каждого из водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов выявлены приоритетные для контроля вещества, обеспечивающие наибольший вклад в ухудшение качества воды. Применение методики расчета УКИЗВ и ИЗВ показало, что водохранилища каскадов характеризуются неудовлетворительным состоянием. Ни в одном из водохранилищ качество воды не соответствует рыбохозяйственным нормативам. По категории УКИЗВ качество воды Камских водохранилищ соответствует категории “загрязненное”, а водохранилищ Верхневолжского каскада — “очень загрязненное”. В отдельные годы в Ивановском и Угличском водохранилищах качество воды оценивается как “грязное”. По категории ИЗВ картина аналогичная. Не выявлено влияние водности притока на качество воды в этих водных объектах. Сопоставление результатов оценки качества воды, выполненное по массивам данных Росводресурсов и Росгидромета, продемонстрировало достаточно близкое их совпадение.

Ключевые слова: водохранилища, каскады, качество воды, загрязняющие вещества, интегральные индексы, годовой приток, годы разной водности, разностно-интегральные кривые, Верхняя Волга, Кама

DOI: 10.31857/S2587556624060067, EDN: AKBNQR

ВВЕДЕНИЕ

Химический состав воды водных объектов является одним из основных факторов, определяющих состояние водных экосистем, возможные виды водопользования и стратегию охраны и восстановления водных ресурсов, а также возможные экологические риски. Основными фак-

торами формирования гидрохимического режима водных масс водохранилищ являются:

1. морфометрические характеристики водохранилища: объем, распределение глубин, площадь акватории, изрезанность береговой линии;
2. степень зарегулированности водохранилища (многолетнее или сезонное), определяющая водообмен в водохранилище;

3. режим притока воды с вышележащих участков русла и сбросов на нижележащие участки;
4. гидродинамические параметры: распределение скоростей течения по объему водохранилища;
5. климатический режим и метеорологические условия конкретных лет;
6. природные особенности водосборов водохранилищ (геологическое строение, ландшафтная структура водосборов);
7. антропогенная деятельность на водосборах;
8. береговая абразия;
9. поступление веществ с жидкими и твердыми осадками из атмосферы на водосбор и акваторию водохранилища;
10. внутриводоемные процессы в толще воды;
11. поступление вторичного загрязнения из донных отложений.

Антропогенные источники поступления веществ с водосборов делятся на диффузные (рассредоточенные) и точечные (сточные воды предприятий). Считается, что точечные источники контролируются государственными органами, предприятия отчитываются за проведенные сбросы. Однако на практике система контроля и отчетности 2-ТП (водхоз) носит заявительный характер, а ряд предприятий вообще выведен даже из-под такого контроля (Лукьянов, Коронкевич, 2022). К диффузным антропогенным источникам относятся поля, промышленная и жилая застройка, любые преобразованные человеком участки водосборов, на которых отсутствуют или недостаточны по объему и качеству системы очистки стекающих вод. Однако, как показали работы, выполненные по программе “Оздоровление Волги”, вклад диффузных источников в поступление загрязняющих веществ в водные объекты в бассейне Волги превышает 60%, а на отдельных участках водосборов может достигать до 90% и более (Диффузное ..., 2020). Именно с диффузным загрязнением связывают отсутствие кардинального улучшения состояния воды каскада волжских водохранилищ, несмотря на продолжавшееся почти до последнего времени длительное сокращение объемов промышленного производства и соответственно объемов использования воды и сбросов промышленных предприятий в бассейне Волги (Диффузное ..., 2020). Несмотря на значительный вклад диффузного поступления загрязняющих веществ в водные объекты, оно практически не контролируется современными системами мониторинга природных ресурсов и не является предметом отчетности природоохранных ведомств (Ясинский и др., 2023).

Важнейший фактор формирования гидрохимического режима водохранилища — это величина объема воды в нем в текущий момент времени, который способен разбавить поступающие в него из разных источников загрязняющие ве-

щества. Чем выше коэффициент разбавления (отношение объема воды к объему поступления загрязняющих веществ), тем благоприятнее экологическая ситуация (Антропогенные ..., 2003).

Цель работы — на основе данных сертифицированных гидрохимических лабораторий организаций, подведомственным Бассейновым водным управлениям Росводресурсов РФ, определить характерные загрязняющие вещества и оценить актуальное качество воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов в годы разной водности с использованием применяющихся в практике мониторинга гидрохимических показателей.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Волжский бассейн по водохозяйственному районированию, представленному в Водном кодексе РФ — Закон № 76 ФЗ, разделен на 4 бассейновых округа: Верхневолжский, Окский, Камский и Нижневолжский. Основными водными объектами Верхневолжского бассейнового округа являются: Ивановское, Угличское, Рыбинское, Горьковское и Чебоксарское водохранилища. В Камском бассейновом округе такими водными объектами являются Камское, Воткинское и Нижнекамское водохранилища. Расположенные друг за другом водохранилища в каждом из этих бассейновых округов, образуют Верхневолжский и Камский каскады водохранилищ соответственно. Чебоксарское водохранилище у г. Новочебоксарска и Нижнекамское водохранилище у г. Набережные Челны являются последними водными объектами в системе Верхневолжского и Камского каскадов (рис. 1). Водный и гидрохимический режимы, экологическое состояние и функционирование самого крупного водохранилища на Европейской территории России — Куйбышевского у г. Тольятти (площадь поверхности 6450 км², объем 58 км³) в значительной степени обусловлены поступлением воды через гидроагрегаты плотин Чебоксарского и Нижнекамского водохранилищ. Их водные массы в определенной степени содержат в себе информацию о специфике и динамике гидролого-геохимического режимов расположенных выше них водохранилищ. Эти режимы также обусловлены многими факторами и процессами, происходящими как в этих водных объектах, так и на их водосборах в условиях значительной антропогенной нагрузки. Бассейны Волги и Камы — одни из наиболее густонаселенных и промышленно развитых регионов страны (Демин, 2023).

Различия в морфологических характеристиках, в водном балансе и в водообмене этих водохранилищ показаны в работах (Вуглинский, 1991; Измайлова и др., 2023; Эдельштейн, 1998). Сведения о концентрациях загрязняющих веществ

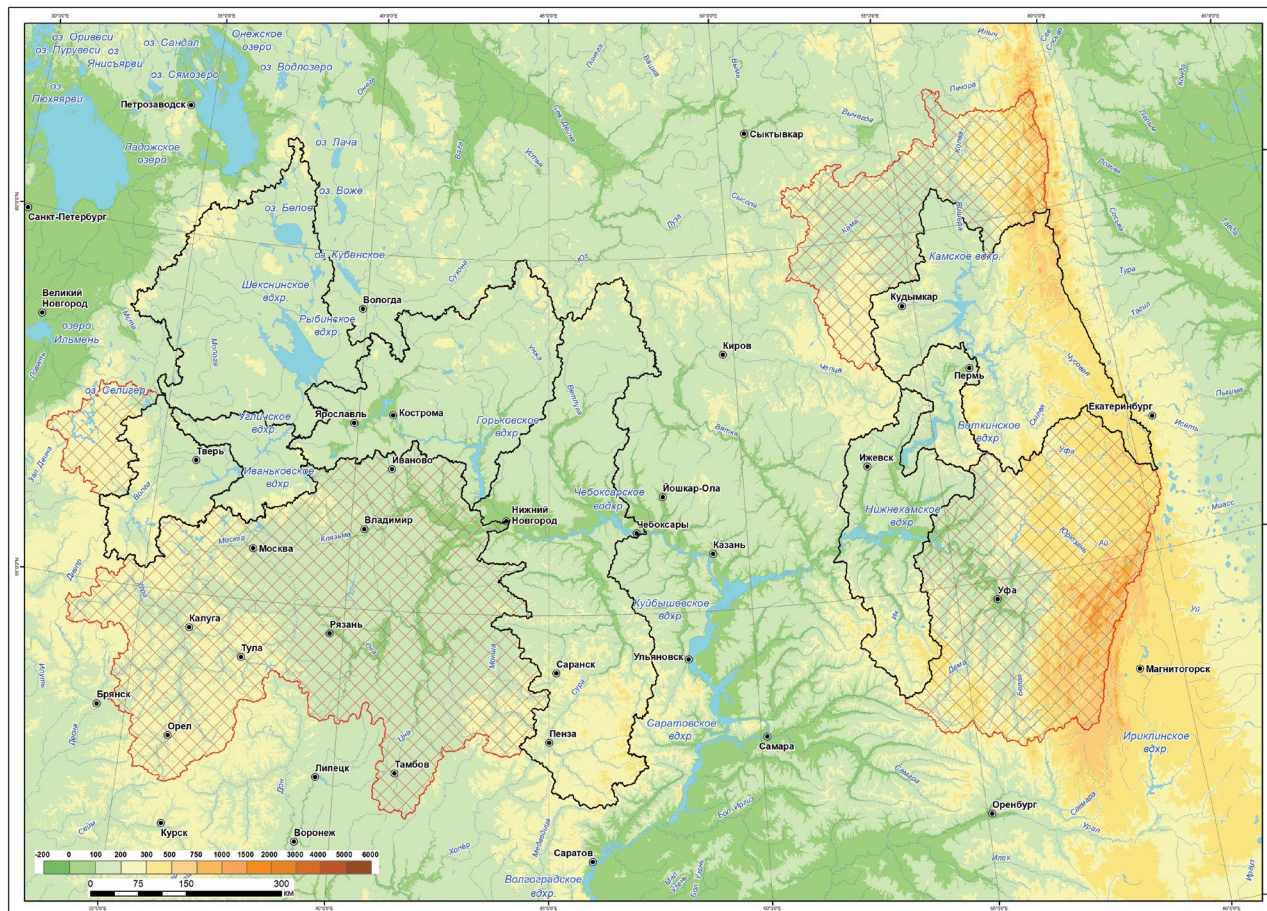


Рис. 1. Верхневолжские и Камские водохранилища и их водосборы. Черным контуром выделены участки водосборных бассейнов, для которых выполнена экспликация, красной штриховкой — нет данных об экспликации.

и гидрохимическом режиме рассматриваемых водохранилищ вплоть до начала XXI в. содержатся в (Болгов и др., 2008; Водоохранилища Верхней Волги, 1975; Дебольский и др., 2010; Ивановское ..., 1978; Томилина и др., 2018). Характеристика процесса абразии берегов водохранилищ приведена в (Соболь, 2022). Сведения о ежегодном накоплении в донных отложениях массы взвешенных, органических и биогенных веществ содержатся в (Буторин и др., 1975; Зимина, Законнов, 1982). Оценки средней ежегодной первичной продукции и деструкции органического вещества в водохранилищах даны в (Водоохранилища и ..., 1986; Романенко, 1984).

На рис. 2 показаны различия в объемах рассматриваемых водохранилищ. Самое большое — Рыбинское водохранилище, осуществляющее многолетнее регулирование стока. Все остальные водохранилища — сезонного регулирования. Регулирующий объем Чебоксарского и Нижнекамского водохранилищ по изначальным проектам должен был быть больше. Однако в силу ряда причин проекты при реализации были изменены: проектные нормальные подпорные уровни (НПУ) в 68 м БС (Балтийская система высот) при строительстве не были достигнуты. Сейчас

эксплуатация ведется на НПУ 63 м БС для Чебоксарского и 63.3 м БС для Нижнекамского водохранилищ.

Различны также и другие характеристики водосборов и самих рассматриваемых водохранилищ, непосредственно влияющие на миграцию химических веществ на водосборах и антропогенную нагрузку на водоемы. В табл. 1 приведена экспликация частных водосборов водохранилищ для каждой ветви отдельно и всего каскада Верхневолжских и Камских водохранилищ в пределах водосборов, но без учета крупных притоков — Оки, Белой, Волги до Ржева, Камы до Бондюга и Вишеры до Рябинино. Участки водосборов, для которых оценена экспликация земель, выделены на рис. 1 черными границами. Приведенная выборочная экспликация в первом приближении дает представление о распределении угодий на всех рассматриваемых водосборах и позволяет судить о ландшафтной структуре водосборов — важнейшем факторе формирования стока воды и других веществ с водосбора.

Наибольшую лесистость имеют водосборы Камского и Горьковского водохранилищ — около 80% их территории занято лесом. Наименьшая

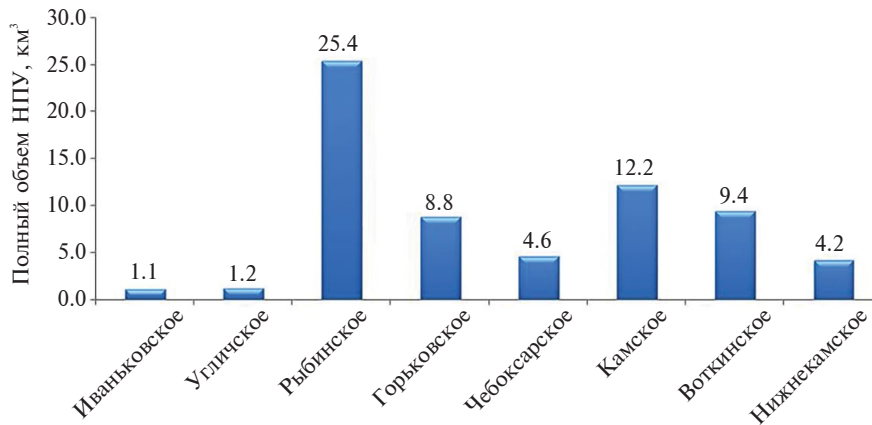


Рис. 2. Объемы водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов при нормальном подпорном уровне. Составлено по: (Измайлова и др., 2023).

лесистость на водосборе Нижнекамского (35%) и Чебоксарского (59%) водохранилищ. Наименее распаханы водосборы Рыбинского, Горьковского и Камского водохранилищ (до 4%), наиболее — водосборы Нижнекамского (42%) и Чебоксарского (23%). Довольно высокая доля урбанизированной территории в выделенной

части бассейна Камского водохранилища (около 8%) связана с частными водосборами рр. Чусовой и Сылвы. Степень урбанизации водосборов Верхневолжских водохранилищ в пределах рассматриваемой территории меньше — от 0.2% на водосборе Рыбинского водохранилища, до 1.5% на водосборе Угличского.

Таблица 1. Экспликация частных водосборов водохранилищ и каскадов водохранилищ Верхней Волги и Камы

Водохранилище	Площадь водосбора, занятого видом поверхности, %							Площадь водосбора*, тыс. км²
	Водные объекты	Лес	Болото	Пахотные земли	Сельские населенные пункты	Города	Луга	
Верхневолжский каскад								
Иваньковское	2.0	65.3	0.4	8.3	2.3	1.2	20.5	29.3
Угличское	2.0	66.7	0.1	7.3	4.1	1.5	18.3	19.5
Рыбинское	7.7	68.4	0.5	2.2	0.8	0.2	20.2	90.9
Горьковское	2.2	79.5	0.2	4.0	1.2	0.9	12.0	80.7
Чебоксарское	1.4	59.5	0.3	23.2	2.0	0.9	12.7	132.1
Камский каскад								
Камское	2.5	82.8	0.1	4.1	1.0	8.0	1.5	90.9
Воткинское	6.9	63.0	0.1	10.0	2.3	4.5	13.2	16.1
Нижнекамское	2.8	35.2	0.9	41.8	2.7	1.8	14.8	51.2
Каскады интегрально								
Верхневолжская ветвь водохранилищ	3.3	67.2	0.3	11.3	1.7	0.8	15.4	352.5
Камская ветвь водохранилищ	3.0	65.3	0.4	16.9	1.7	5.7	7.0	158.2
Верхневолжские и камские водохранилища	3.2	66.6	0.4	13.0	1.7	2.3	12.8	510.7

Примечания. * В водосборе Ивановского водохранилища не учитывается водосбор Волги до створа Ржев, в водосборе Чебоксарского водохранилища — бассейн р. Оки, в водосборе Камского водохранилища — водосбор р. Камы до Бондюга и р. Вишеры до Рябино, в водосборе Нижнекамского водохранилища — бассейн р. Белой. Всего при оценке экспликации не учтен участок водосборов Верхневолжских водохранилищ площадью 263.2 тыс. км², Камских водохранилищ — 215.2 тыс. км².

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами для работы послужили данные государственного водохозяйственного мониторинга, осуществляемого лабораториями организаций, подведомственных Бассейновым водным управлениям (БВУ) Агентства водных ресурсов РФ (Росводресурсов РФ) на всех крупных водохранилищах страны. Мониторинг на верховолжских и камских водохранилищах включает отбор поверхностных и придонных проб воды и донных отложений зимой, весной, летом и осенью от 5 до 11 раз в год в нескольких створах по длине водохранилища (до 12–15 точек) и проведение их химического анализа в сертифицированных лабораториях для определения содержания химических веществ (от 22 до 40 показателей в разных водохранилищах). Информация мониторинга была предоставлена официально по запросу Института географии РАН Верхневолжским и Камским бассейновыми водными управлениями Росводресурсов РФ. Данные включали информацию о гидрохимических показателях Ивановского и Горьковского водохранилищ в 2005–2022 гг., Угличского — в 2009–2022 гг., Рыбинского — в 2010–2022 гг., Чебоксарского — в 2004–2022 гг., Камского и Воткинского — в 2002–2022 гг., Нижнекамского — в 2002–2022 гг.

Данные о притоке воды к водохранилищам получены на сайте Центра Регистра и Кадастра¹.

Оценка водности лет определялась по эмпирическим кривым обеспеченности годового притока воды к отдельным водохранилищам. Предполагалось, что маловодные годы соответствуют притоку обеспеченностью более 66.7%, многоводные — притоку менее 33.3% обеспеченности, а средние по водности — от 33.3 до 66.7% включительно.

Для оценок фаз водности использовались разностно-интегральные кривые.

Информация о ландшафтной структуре водосборов получена с использованием данных спутниковых снимков Sentinel-2 с применением методов дешифрирования, разработанных в Институте географии РАН (Ясинский и др., 2019).

При оценке качества и экологического состояния поверхностных вод, а также для сравнительного анализа степени загрязнения водных объектов применялись интегральные индексы, учитывающие превышение концентраций приоритетных загрязняющих веществ над предельно допустимой концентрацией (ПДК) — гидрохимический индекс загрязненности воды (ИЗВ) и удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ). Индекс ИЗВ применяется с 1986 г. в соответствии с «Временные методические указания, по комплексной оценке, качества

поверхностных и морских вод» Госкомгидромета СССР (1986). ИЗВ — один из наиболее часто используемых в экологической практике показателей для оценки качества воды водных объектов (Рисник и др., 2012). Расчет ИЗВ для поверхностных вод производится по формуле:

$$ИЗВ = \frac{1}{6} \frac{\sum_i C_i}{ПДК}, \quad (1)$$

где C_i — концентрация компонента i или значение физико-химического параметра i ; $ПДК_i$ — предельно-допустимая концентрация, установленная для соответствующего показателя i ; число “6” в знаменателе формулы (1) определяет число компонентов, берущихся для расчета ИЗВ (Временные ..., 1986). В расчет ИЗВ согласно этим указаниям обязательно включается информация о нормированном содержании растворенного кислорода и о нормированном БПК₅. ПДК для разных диапазонов БПК₅ различно (для БПК₅ менее 3 мг О₂/л ПДК равно 3 мг О₂/л, БПК₅ от 3 до 15 мг О₂/л соответствует ПДК, равному 2 мг О₂/л, а БПК₅ свыше 15 мг О₂/л — ПДК = 1 мг О₂/л). Содержание растворенного кислорода нормируется иначе, чем прочие показатели. Вместо отношения $C_i/ПДК_i$ используется $ПДК_i/C_i$, причем чем меньше значения содержания кислорода C_i , тем больше $ПДК_i$.

Оставшиеся четыре компонента для каждого водного объекта выбираются как максимальные по соотношениям $C_i/ПДК_i$, независимо от того, превышают эти показатели ПДК или нет. По полученной величине ИЗВ водному объекту присваивается класс загрязненности воды. Поскольку в разных источниках существуют разногласия в границах диапазонов для установления класса качества воды (Шитиков и др., 2003, с. 126), в табл. 2 приведены использовавшиеся в работе значения, основанные на (Временные ..., 1986).

Методика комплексной классификации водных объектов по УКИЗВ, разработанная Гидрохимическим институтом Росгидромета и утвержденная ведомственным нормативом РД 52.24.643–2002, позволяет дать интегральную оценку качества воды по совокупности находящихся в ней загрязняющих веществ и частоте превышений ПДК. Предварительно, в соответствии с (Методические ..., 2003), оценивается коэффициент комплексности загрязненности воды, показывающий долю показателей, превышающих ПДК, из всего числа измеряемых показателей. При коэффициенте комплексности загрязненности для водного объекта более 10% метод комплексной оценки качества воды по УКИЗВ рекомендован к применению.

При расчете УКИЗВ в соответствии с методикой (Методические ..., 2003) определяют баллы кратности превышения ПДК на основе факти-

¹ <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 10.09.2024).

Таблица 2. Классы качества воды по ИЗВ

Класс качества воды	Характеристика	Величина ИЗВ
I	Очень чистая	менее или равно 0.3
II	Чистая	более 0.3 до 1
III	Умеренно загрязненная	более 1 до 2.5
IV	Загрязненная	более 2.5 до 4
V	Грязная	более 4 до 6
VI	Очень грязная	более 6 до 10
VII	Чрезвычайно грязная	более 10

ческих концентраций для 15 строго регламентированных показателей (растворенный кислород, БПК₅, ХПК, фенолы, нефтепродукты, нитрит-ионы, нитрат-ионы, аммоний-ион, железо общее, медь, цинк, никель, марганец, хлориды, сульфаты), а также баллы повторяемости случаев превышения ПДК этих же показателей. Для Камских водохранилищ из-за отсутствия измерений содержания марганца в воде вместо него для расчетов использовалась информация о содержании свинца. Для растворенного кислорода, в отличие от других показателей, в расчетах использовалось не отношение содержания вещества к ПДК, а наоборот, отношение ПДК к содержанию кислорода в воде, поскольку требовалось учесть недонасыщение воды кислородом.

В методике при расчете УКИЗВ учитывается наличие числа критических показателей загрязненности воды (КПЗ), которые обуславливают перевод воды по степени загрязненности в класс “очень грязная”. Критическим показателем загрязненности считается такой показатель, для которого наблюдается устойчивая либо характерная загрязненность высокого или экстремально высокого уровней загрязненности. При этом вода по своему качеству по этому показателю оценивается как “очень грязная” и “экстремально грязная” (Методические ..., 2003). Критический показатель рассчитывается для каждого ингредиента как произведение функций величин наблюдаемых концентраций загрязняющих веществ и частоты их обнаружения. Показатель становится критическим, когда его значение превышает заданный в (Методические ..., 2003) критический уровень.

По рассчитанной величине УКИЗВ определяют класс качества воды:

- 1 класс — условно чистая;
- 2 класс — слабо загрязненная;
- 3 класс: разряд “а” — загрязненная; разряд “б” — очень загрязненная;
- 4 класс: разряд “а” — грязная; разряд “б” — грязная; разряд “в” — очень грязная; разряд “г” — очень грязная;
- 5 класс — экстремально грязная.

Несмотря на удобство оценки качества воды с помощью индексов загрязнения (УКИЗВ и ИЗВ), ряд авторов отмечает недостатки данного подхода (Данилов-Данильян и др., 2019; Иваницкий и др., 2020; Тимофеева, Фрумин, 2015). К ним, в частности, относятся: ограниченное число анализируемых химических показателей, неучет региональных особенностей геохимических ландшафтов, отсутствие учета типа природопользования и антропогенного воздействия на экосистему водоема, а также условий миграции химических веществ и элементов в разных ландшафтах, возможность синергизма загрязняющих веществ. Показатель не отражает прямую трофический статус водоема. В связи с этим для оценок состояния экосистемы водоема часто рассматривают каждый из химических показателей отдельно и соотношения между ними с учетом региональных особенностей водного объекта.

Для расчетов ИЗВ использовались предварительно осредненные за год показатели содержания веществ по всем измерениям для каждого из водохранилищ. Для расчетов УКИЗВ для каждого из водохранилищ вначале осреднялись данные измерений за каждый месяц года, а далее по ним оценивался среднегодовой УКИЗВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Фазы водности Верхневолжского и Камского каскадов

Приток воды в каждый каскад асинхронен друг другу (рис. 3). Для рассматриваемых в работе Верхневолжских водохранилищ четко выделяются две ветви цикла водности притока в водохранилище: с 2003 по 2013 г. — фаза повышенного притока, а после 2013 г. — сниженного. Для Камских водохранилищ все в противофазе: с 2003 по 2013 г. отмечалась фаза пониженного притока, далее сменившаяся фазой повышенного притока. Однако с начала 2020-х годов наблюдается уменьшение притока в водохранилища Камского каскада. Причинами такой асинхронности являются значительные различия в физико-географических характеристиках и климатическом режиме водосборов этих водохранилищ.

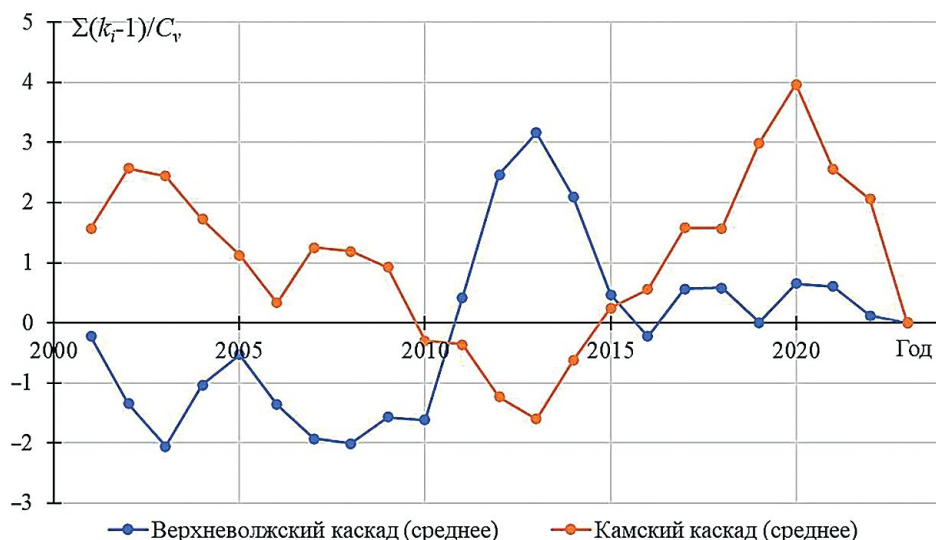


Рис. 3. Осредненные разностно-интегральные кривые притока воды в водохранилища Верхневолжского и Камского каскадов.

*Многоводные и маловодные годы
в Верхневолжском и Камском каскадах
с начала XXI в.*

Для водохранилищ Верхневолжского каскада в качестве характерных для большей части водохранилищ лет выбраны многоводный 2012 г., маловодный 2016 г. и средний по водности 2018 г. Для Камского каскада в качестве многоводного года был взят 2019 г., маловодного — 2021 г. и 2014 г. — как средний по водности год, причем для характеристики водности года авто-

ры ориентировались на приток к Камскому водохранилищу (Калинин и др., 2025). Параметры притока воды к водохранилищам в годы разной водности приведены в табл. 3.

В табл. 4–6 для разных по водности лет для изучаемых водохранилищ приведены показатели, используемые для расчетов ИЗВ и УКИЗВ. Дополнительно указана информация о содержании взвешенных веществ. В таблицах содержится информация о среднегодовых значениях показателей, а также о минимальных и максимальных

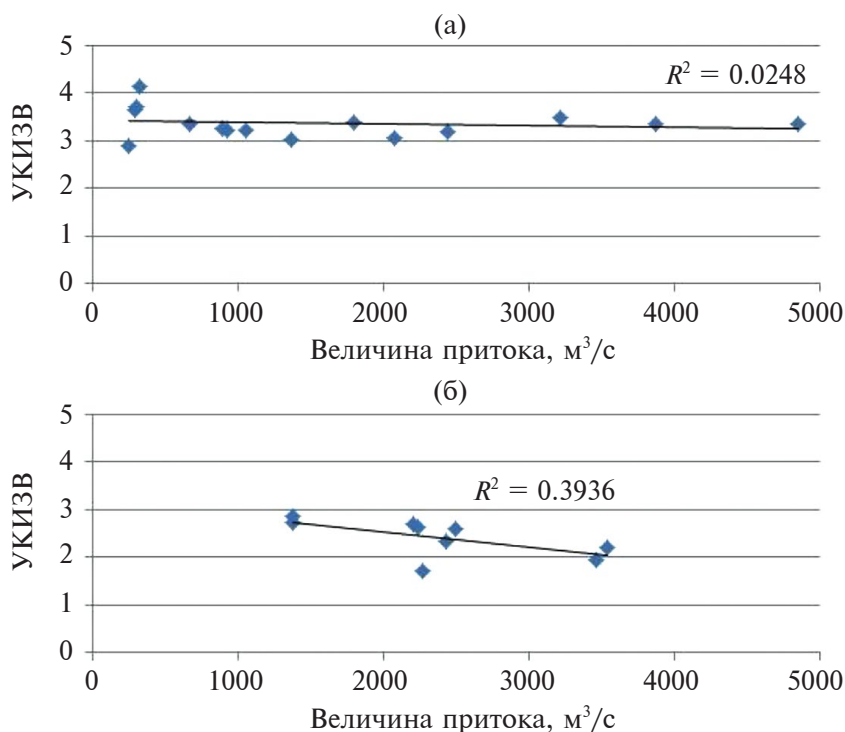


Рис. 4. Зависимость УКИЗВ от величины водности года (среднегодового притока воды к водохранилищу, м³/с): для Верхневолжских (а) и Камских (б) водохранилищ.

Таблица 3. Поступление воды в водохранилища Верхневолжского и Камского каскадов в годы разной водности

Водохранилище	Год	Приток воды в водохранилище за год	
		Объем, км ³	Обеспеченность, %*
Средний по водности год			
Иваньковское	2018	9.4	58.3
Угличское	2018	10.5	62.5
Рыбинское	2018	38.1	33.3
Горьковское	2018	56.8	41.7
Чебоксарское	2018	122.2	33.3
Камское	2014	58.4	47.6
Воткинское	2014	61.0	
Нижекамское	2014	93.5	
Многоводный год			
Иваньковское	2012	21.0	8.3
Угличское	2012	28.1	8.3
Рыбинское	2012	41.4	25.0
Горьковское	2012	77.1	4.2
Чебоксарское	2012	153.1	4.2
Камское	2019	79.5	4.9
Воткинское*	2019	77.0	
Нижекамское*	2019	109.7	
Маловодный год			
Иваньковское	2016	7.9	79.2
Угличское	2016	9.7	75.0
Рыбинское	2016	29.5	70.8
Горьковское	2016	43.2	75.0
Чебоксарское	2016	101.5	70.8
Камское	2021	43.9	95.2
Воткинское	2021	43.9	
Нижекамское	2021	71.5	

Примечание: * водность года установлена по притоку к Камскому водохранилищу.

за год среднемесячных их значениях, что позволяет судить о внутригодовой их динамике. Приведено число измерений показателей (N), на основании которых выполнены расчеты. Значительное число измерений позволяет судить о достоверности выполненных оценок.

*Оценка качества воды
по комплексным показателям*

В табл. 7 приведены результаты оценок качества воды в среднем за год по ИЗВ для Верхневолжского и Камского каскадов в годы разной

водности. При оценке качества воды по величине ИЗВ состояние воды всей Верхневолжской ветви водохранилищ оценивается в основном как “загрязненное”, а в верховьях (в Ивановском и Угличском водохранилищах) в отдельные годы как “грязное”. Наибольшее превышение относительно ПДК для всех водохранилищ Верхневолжской ветви характерно для марганца (лидер по превышению практически везде), железа общего и ХПК, а также для меди. Исключение — Ивановское водохранилище, где показатель содержания нефтепродуктов превышает относительное содержание меди. Воды водохранилищ Камского каскада во все годы характеризуются как “умеренно загрязненные”, то есть они чище, чем Верхневолжские. Однако важно подчеркнуть, что здесь не измерялось содержание марганца, вносящего важнейший вклад в показатели загрязнения Верхневолжских водохранилищ. Для Камских водохранилищ характерные загрязняющие вещества для расчетов ИЗВ те же, что и на Верхневолжских — железо общее, медь, ХПК. Место марганца в списке характерных загрязняющих веществ занимают фенолы. Самое чистое из Камских водохранилищ по показателю ИЗВ — Нижекамское.

По оцененным значениям коэффициентов комплексности все водохранилища во все исследуемые годы отнесены ко II категории с повышенной комплексностью загрязненности. Коэффициенты комплексности находятся в диапазоне от 30 до 40% в Верхневолжских водохранилищах и несколько ниже (от 20%) — в Камских.

Из рассмотренных показателей главное загрязняющее вещество *Верхневолжских водохранилищ* (среднее содержание более всего превышало ПДК) — марганец (до 17–19 ПДК в Ивановском и Угличском водохранилищах). Везде было значительно превышено содержание общего железа, повсеместно превышены показатели содержания органики (ХПК и БПК₅). Повышено содержание аммоний-иона (кроме Чебоксарского и Горьковского водохранилищ в средние и маловодные годы). Везде, кроме Ивановского водохранилища, превышено содержание меди. Эпизодически в маловодные и средние по водности годы в Верхневолжских водохранилищах, кроме Рыбинского, были увеличены по сравнению с ПДК нитриты. В Ивановском водохранилище наблюдался небольшой дефицит растворенного кислорода. Для Горьковского и Чебоксарского водохранилищ характерно постоянное увеличение содержания цинка. В Ивановском и Угличском водохранилищах постоянно отмечалось повышенное содержание нефтепродуктов, а в маловодные и средние по водности годы были превышены концентрации фенолов.

Таблица 4. Характерные концентрации загрязняющих веществ и значения гидрхимических показателей в водохранилищах для многоводного года (для водохранилищ Верхневолжского каскада 2012 г., для Камского каскада 2019 г.)

Показатель	ПДК, мг/л	Иваньковское	Угличское	Рыбинское	Горьковское	Чебоксарское	Камское	Воткинское	Нижнекамское
Число измерений N		40	79	107	210	148	48	88	184
Взвешенные вещества, мг/л	нет	$\frac{8.21}{3-29.5}$	$\frac{3.24}{0.46-13.3}$	$\frac{0.03}{0-0.17}$	$\frac{0.95}{0-3.36}$	$\frac{4.01}{1.29-8.2}$	$\frac{8.72}{4.82-14.72}$	$\frac{10.49}{4.71-25.54}$	$\frac{12.99}{5.90-25.20}$
Растворенный кислород, мг/л	4	$\frac{6.69}{3.38-10.63}$	$\frac{8.7}{6.85-9.66}$	$\frac{9.26}{8.75-10.11}$	$\frac{9.6}{8.78-11.89}$	$\frac{8.98}{8.46-9.85}$	$\frac{8.96}{7.68-9.95}$	$\frac{9.11}{8.07-10.35}$	$\frac{8.92}{7.34-10.49}$
БПК ₅ , мг/л	2.1	$\frac{1.65}{0.61-4.65}$	$\frac{1.91}{0.47-4.82}$	$\frac{1.55}{0-3.89}$	$\frac{2.05}{1.1-3.51}$	$\frac{2.18}{0.4-4.9}$	$\frac{0.81}{0.55-1.10}$	$\frac{0.87}{0.55-1.20}$	$\frac{3.50}{1.24-5.05}$
ХПК, мг/л	15	$\frac{32.9}{7-64}$	$\frac{35.3}{15.3-58.5}$	$\frac{38.27}{25.3-71.2}$	$\frac{36.14}{30-41.7}$	$\frac{31.28}{13-56.4}$	$\frac{30.44}{17.88-41.44}$	$\frac{32.89}{24.48-40.94}$	$\frac{22.27}{12.55-31.55}$
Фенолы, мг/л	0.001	$\frac{5 \cdot 10^{-4}}{0-5 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{3 \cdot 10^{-5}}{0-1.5 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{3.3 \cdot 10^{-5}}{0-1.6 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0.0001}{0-0.00042}$	$\frac{0.00041}{0-0.0024}$	$\frac{0.003}{0.002-0.005}$	$\frac{0.003}{0.002-0.004}$	$\frac{0.002}{0.0-0.003}$
Нефтепродукты, мг/л	0.05	$\frac{0.06}{0.04-0.08}$	$\frac{0.03}{0.02-0.07}$	$\frac{0.01}{0.01-0.02}$	$\frac{0.01}{0.01-0.02}$	$\frac{0.02}{0.01-0.05}$	$\frac{0.05}{0.04-0.08}$	$\frac{0.04}{0.04-0.07}$	$\frac{0.05}{0.04-0.05}$
Нитриты, мг/л	0.08	$\frac{0.033}{0.016-0.088}$	$\frac{0.04}{0-0.08}$	$\frac{0.049}{0-0.296}$	$\frac{0.043}{0.02-0.062}$	$\frac{0.054}{0.004-0.355}$	нет данных	нет данных	$\frac{0.02}{0.02-0.04}$
Нитраты, мг/л	40	$\frac{2.73}{0.13-15.2}$	$\frac{1.4}{0.2-3.88}$	$\frac{1.62}{0.43-4.69}$	$\frac{1.358}{0.498-2.957}$	$\frac{2.162}{0-7}$	$\frac{0.90}{0.33-2.73}$	$\frac{0.92}{0.64-1.73}$	$\frac{1.75}{0.71-2.81}$
Аммоний-ион, мг/л	0.5	$\frac{0.73}{0.4-1}$	$\frac{0.6}{0.38-0.86}$	$\frac{0.82}{0.58-0.98}$	$\frac{0.58}{0.33-0.75}$	$\frac{0.42}{0.28-0.65}$	$\frac{0.33}{0.15-0.57}$	$\frac{0.25}{0.11-0.49}$	$\frac{0.34}{0.25-0.48}$
Железо общее, мг/л	0.1	$\frac{0.35}{0.08-0.58}$	$\frac{0.44}{0.11-0.65}$	$\frac{0.67}{0.5-0.83}$	$\frac{0.54}{0.31-0.68}$	$\frac{0.34}{0.23-0.51}$	$\frac{0.41}{0.10-0.74}$	$\frac{0.36}{0.19-0.45}$	$\frac{0.09}{0.04-0.18}$
Медь, мг/л	0.001	$\frac{1.5 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-4}-9 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{3.4 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-4}-8.6 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{4.2 \cdot 10^{-3}}{1.2 \cdot 10^{-3}-9.7 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{3.5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}-6 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{3 \cdot 10^{-3}}{0-5.4 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0.003}{0.002-0.004}$	$\frac{0.002}{0.002-0.003}$	$\frac{0.001}{0.00-0.001}$
Цинк, мг/л	0.01	$\frac{1.45 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-4}-9.3 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{2.6 \cdot 10^{-3}}{0-1.67 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{2 \cdot 10^{-3}}{0-1.3 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{9.4 \cdot 10^{-3}}{0-2.8 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{1.3 \cdot 10^{-2}}{0-3.1 \cdot 10^{-1}}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.02}$	$\frac{0.001}{0.00-0.002}$
Никель, мг/л	0.01	$\frac{7.6 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}-3.4 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{2 \cdot 10^{-4}}{0-9 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{3 \cdot 10^{-3}}{0-2.9 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{2 \cdot 10^{-3}}{0-4.6 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{2.4 \cdot 10^{-3}}{0-7.2 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$
Марганец, Мп ²⁺ , мг/л	0.01	$\frac{0.19}{0.08-0.27}$	$\frac{0.062}{0.006-0.28}$	$\frac{0.033}{0.002-0.16}$	$\frac{0.03}{0.005-0.105}$	$\frac{0.09}{0.0087-0.33}$	нет данных	нет данных	нет данных
Хлориды, мг/л	300	$\frac{6.23}{2.8-12.8}$	$\frac{8.26}{4.4-13.3}$	$\frac{8.63}{4.2-17.5}$	$\frac{6.94}{1.36-10.8}$	$\frac{9.73}{0.11-24.5}$	$\frac{37.87}{9.79-65.60}$	$\frac{48.26}{27.53-59.06}$	$\frac{49.89}{14.11-74.07}$
Сульфаты, мг/л	100	$\frac{30.0}{8.24-43.46}$	$\frac{24}{16.2-35.9}$	$\frac{21.73}{17.79-30.13}$	$\frac{17.72}{12.47-22.02}$	$\frac{39.12}{11.07-54.84}$	$\frac{42.31}{9.81-118.66}$	$\frac{37.88}{25.21-48.17}$	$\frac{81.31}{10.51-132.11}$

Примечание: над чертой — среднегодовые значения показателей, под чертой — минимальный и максимальный значения за год среднесуточные значения показателей.

Таблица 5. Характерные концентрации загрязняющих веществ и значения гидрхимических показателей в водохранилищах для среднего по водности года (для водохранилищ Верхневолжского каскада 2018 г., для Камского каскада 2014 г.)

Показатель	ПДК, мг/л	Иваньковское	Угличское	Рыбинское	Горьковское	Чебоксарское	Камское	Воткинское	Нижнекамское
Число измерений N		44	68	100	268	136	48	88	184
Взвешенные вещества, мг/л	нет	8.86 3.99–17.7	4.52 1.06–7.42	1.71 0.72–2.88	2.43 0.63–4.48	5.42 1–10.09	7.52 4.83–11.66	11.85 5.81–25.93	8.15 4.58–18.07
Растворенный кислород, мг/л	4	8.35 5.76–10.67	8.34 5.92–10.15	9.31 8.13–10.31	9.09 8.15–9.98	7.99 7.07–8.86	9.01 7.79–10.35	9.12 8.33–10.02	8.43 7.25–9.95
БПК ₅ , мг/л	2.1	2.56 0.7–5.7	2.46 1.3–5.2	2.31 1.55–3.97	2.43 1.87–3.6	2.03 0.4–4.7	0.89 0.59–1.53	0.83 0.55–1.81	2.02 1.20–2.46
ХПК, мг/л	15	28.57 10–56.7	32.3 18–48	34.176 22.7–62.7	37.96 30.5–54	34.34 2.1–5.7	27.63 15.15–37.93	24.36 17.12–30.18	24.70 15.52–30.34
Фенолы, мг/л	0.001	2·10 ⁻³ 5·10 ⁻⁴ –6·10 ⁻³	1.6·10 ⁻³ 5·10 ⁻⁴ –4.4·10 ⁻³	5·10 ⁻⁴ 5·10 ⁻⁴	3·10 ⁻⁵ 0–2.3·10 ⁻⁴	4.98·10 ⁻⁵ 0–1·10 ⁻³	0.002 0.002–0.003	0.002 0.002–0.003	0.001 0.0–0.003
Нефтепродукты, мг/л	0.05	0.05 0.04–0.09	0.04 0.02–0.09	0.02 0.01–0.02	0.02 0.01–0.03	0.02 0.01–0.03	0.04 0.04–0.07	0.05 0.04–0.06	0.06 0.05–0.12
Нитриты, мг/л	0.08	0.077 0.02–1.2	0.04 0.02–0.41	0.044 0.021–0.55	0.031 0.012–0.075	0.05 0–0.39	0.02 0.01–0.023	0.02 0.01–0.03	0.02 0.02–0.04
Нитраты, мг/л	40	1.8 0.1–4	1.97 0.05–5	1.74 0.16–3.64	1.494 0.66–2.422	2.37 0–7.29	0.79 0.23–1.39	1.23 0.65–2.36	1.71 0.79–2.59
Аммоний-ион, мг/л	0.5	0.47 0.18–0.79	0.49 0.31–0.67	0.52 0.31–0.9	0.33 0.19–0.66	нет данных	0.46 0.16–0.97	0.38 0.20–0.55	0.29 0.20–0.41
Железо общее, мг/л	0.1	0.18 0.05–0.43	0.50 0.08–0.90	0.71 0.53–0.97	0.65 0.44–1.05	0.5 0.27–0.75	0.35 0.13–0.70	0.30 0.15–0.42	0.13 0.04–0.36
Медь, мг/л	0.001	5.8·10 ⁻⁴ 1·10 ⁻⁴ –9.8·10 ⁻⁴	4·10 ⁻³ 1·10 ⁻⁴ –1.51·10 ⁻²	4.4·10 ⁻³ 1.4·10 ⁻³ –1.23·10 ⁻²	5.9·10 ⁻³ 3·10 ⁻³ –1·10 ⁻²	3.4·10 ⁻³ 0–1.6·10 ⁻²	0.003 0.002–0.004	0.003 0.002–0.004	0.01 0.00–0.005
Цинк, мг/л	0.01	1·10 ⁻³ 1·10 ⁻⁴ –3.2·10 ⁻³	4·10 ⁻³ 5·10 ⁻⁴ –1.1·10 ⁻²	5·10 ⁻³ 0–8.2·10 ⁻³	1.2·10 ⁻² <5·10 ⁻³ –3.9·10 ⁻²	2·10 ⁻² 0–1.1·10 ⁻¹	0.01 0.01–0.01	0.01 0.01–0.01	0.001 0.00–0.003
Никель, мг/л	0.01	7.2·10 ⁻⁴ 2·10 ⁻⁴ –3.6·10 ⁻³	4.9·10 ⁻⁴ 2·10 ⁻⁴ –1.1·10 ⁻³	<5·10 ⁻³	1·10 ⁻³ <5·10 ⁻³ –3·10 ⁻³	2.3·10 ⁻³ 0–1.4·10 ⁻²	0.01 7.79–0.01	0.01 0.01–0.01	0.01 0.01–0.01
Марганец, Mn ²⁺ , мг/л	0.01	0.14 0.06–0.3	0.151 0.033–0.583	0.095 0.013–0.454	0.071 0.021–0.161	0.087 0–0.201	нет данных	нет данных	нет данных
Хлориды, мг/л	300	8.81 5.8–12.9	10.66 8.1–17	<10 <10–17.77	5.785 2.31–11.6	12.18 2.17–28	38.59 10.84–62.08	37.88 20.91–45.59	52.67 13.11–87.70
Сульфаты, мг/л	100	20.98 16.31–26.3	23.3 15.7–30.4	22.62 15.61–29	17.8 13.46–24.21	37.83 22.85–53.59	42.95 13.90–113.42	38.46 26.72–50.37	57.19 13.38–96.17

Примечание: над чертой — среднегодовые значения показателей, под чертой — минимальный и максимальные за год среднесуточные значения показателей.

Таблица 6. Характерные концентрации загрязняющих веществ и значения гидрхимических показателей в водохранилищах для маловодного года (для водохранилищ Верхневолжского каскада 2016 г., для Камского каскада 2021 г.)

Показатель	ПДК, мг/л	Иваньковское	Угличское	Рыбинское	Горьковское	Чебоксарское	Камское	Воткинское	Нижнекамское
Число измерений N		44	68	100	275	197	48	88	184
Взвешенные вещества, мг/л	нет	$\frac{3.93}{3-6.28}$	$\frac{3.99}{2.14-7.0}$	$\frac{1.25}{0.5-2.67}$	$\frac{2.20}{0.5-5.42}$	$\frac{6.01}{2.9-12.76}$	$\frac{10.66}{6.56-15.43}$	$\frac{10.38}{7.15-21.46}$	$\frac{5.16}{3.62-7.80}$
Растворенный кислород, мг/л	4	$\frac{8.2}{5.2-10.35}$	$\frac{9.22}{7.4-11.15}$	$\frac{8.64}{7.54-9.88}$	$\frac{9.15}{6.68-10.09}$	$\frac{8.46}{7.6-9.33}$	$\frac{9.16}{7.92-10.46}$	$\frac{8.48}{7.43-11.66}$	$\frac{8.68}{6.28-10.84}$
БПК ₅ , мг/л	2.1	$\frac{2.2}{1-6.8}$	$\frac{1.8}{0.9-3.2}$	$\frac{2.02}{1.05-3.93}$	$\frac{1.81}{0.98-3.52}$	$\frac{1.76}{0.5-4.8}$	$\frac{1.61}{0.81-2.27}$	$\frac{1.26}{0.84-2.24}$	$\frac{3.03}{2.23-3.91}$
ХПК, мг/л	15	$\frac{36.37}{20-56}$	$\frac{37.3}{23.2-64}$	$\frac{38.19}{19.9-59.1}$	$\frac{32.15}{14.6-57.8}$	$\frac{29.97}{4.48-51.2}$	$\frac{25.67}{13.82-37.30}$	$\frac{27.78}{19.14-41.04}$	$\frac{23.35}{16.94-29.96}$
Фенолы, мг/л	0.001	$\frac{5.6 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-4}-1 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{6.7 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-4}-1.2 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{5.6 \cdot 10^{-4}}{5.6 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{1 \cdot 10^{-4}}{<5 \cdot 10^{-3}-9.7 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{2 \cdot 10^{-4}}{0-1 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0.003}{0.002-0.004}$	$\frac{0.002}{0.002-0.003}$	$\frac{0.002}{0.0-0.004}$
Нефтепродукты, мг/л	0.05	$\frac{0.07}{0.04-0.1}$	$\frac{0.06}{0.02-0.12}$	$\frac{0.03}{0.01-0.08}$	$\frac{0.02}{0.01-0.04}$	$\frac{0.03}{0.02-0.05}$	$\frac{0.05}{0.04-0.06}$	$\frac{0.05}{0.04-0.08}$	$\frac{0.03}{0.02-0.05}$
Нитриты, мг/л	0.08	$\frac{0.032}{0.02-0.07}$	$\frac{0.05}{0.02-0.66}$	$\frac{0.061}{0.025-0.108}$	$\frac{0.044}{0.025-0.101}$	$\frac{0.099}{0-1.46}$	$\frac{нет}{данных}$	$\frac{нет}{данных}$	$\frac{0.02}{0.02-0.04}$
Нитраты, мг/л	40	$\frac{1.87}{0.5-4}$	$\frac{1.68}{0.29-4.7}$	$\frac{1.24}{0.11-4.05}$	$\frac{1.074}{0.221-2.22}$	$\frac{2.33}{0-12.4}$	$\frac{0.89}{0.40-1.64}$	$\frac{0.94}{0.61-1.38}$	$\frac{2.60}{0.66-4.41}$
Аммоний-ион, мг/л	0.5	$\frac{0.4}{0.1-0.73}$	$\frac{0.33}{0.05-0.63}$	$\frac{0.47}{0.24-1.09}$	$\frac{0.28}{0-0.5}$	$\frac{нет}{данных}$	$\frac{0.18}{0.02-0.27}$	$\frac{0.11}{0.02-0.22}$	$\frac{0.32}{0.23-0.49}$
Железо общее, мг/л	0.1	$\frac{0.31}{0.11-0.92}$	$\frac{0.32}{0.10-0.65}$	$\frac{0.48}{0.31-0.75}$	$\frac{0.39}{0.12-0.71}$	$\frac{0.36}{0.21-0.52}$	$\frac{0.26}{0.13-0.52}$	$\frac{0.17}{0.10-0.22}$	$\frac{0.06}{0.02-0.12}$
Медь, мг/л	0.001	$\frac{1 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-4}-1 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{5.1 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-4}-2.81 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{6.7 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{-4}-1.72 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{7.1 \cdot 10^{-3}}{1.8 \cdot 10^{-3}-1.5 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{3.2 \cdot 10^{-3}}{0-8.1 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{0.003}{0.002-0.004}$	$\frac{0.004}{0.003-0.005}$	$\frac{0.001}{0.00-0.001}$
Цинк, мг/л	0.01	$\frac{2.9 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-4}-1.7 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{1.8 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-4}-8.1 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{<0.005}{<0.005}$	$\frac{9.1 \cdot 10^{-3}}{<0.005-5.3 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{2 \cdot 10^{-2}}{0-1 \cdot 10^{-1}}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.001}{0.00-0.001}$
Никель, мг/л	0.01	$\frac{4.2 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}-1 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{8 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}-1.8 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{<0.005}{<0.005}$	$\frac{1 \cdot 10^{-3}}{<0.005-8 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{0-3.3 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$
Марганец, Mn ²⁺ , мг/л	0.01	$\frac{0.164}{0.08-0.28}$	$\frac{0.084}{0.009-0.23}$	$\frac{0.058}{0.008-0.192}$	$\frac{0.049}{0.018-0.154}$	$\frac{0.075}{0.005-0.19}$	$\frac{нет}{данных}$	$\frac{нет}{данных}$	$\frac{нет}{данных}$
Хлориды, мг/л	300	$\frac{8.06}{5.6-12.5}$	$\frac{10.01}{5.9-14}$	$\frac{<10}{<10-11.06}$	$\frac{7.91}{1.94-11.8}$	$\frac{11.97}{1.68-32}$	$\frac{45.66}{12.18-75.35}$	$\frac{46.95}{30.82-62.87}$	$\frac{42.44}{10.26-57.73}$
Сульфаты, мг/л	100	$\frac{20.77}{14.96-42.6}$	$\frac{25.35}{16.6-35.6}$	$\frac{30.53}{24.71-35.1}$	$\frac{28.22}{16.03-38.78}$	$\frac{42.54}{5.98-62.08}$	$\frac{48.44}{12.94-122.91}$	$\frac{46.92}{35.33-64.29}$	$\frac{72.15}{10.75-142.78}$

Примечание: над чертой — среднегодовые значения показателей, под чертой — минимальный и максимальные значения за год среднеемесячные значения показателя.

Таблица 7. Качество воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов по ИЗВ в разные по водности годы

Показатель, использованный в расчетах ИЗВ	Год	Водность года	ИЗВ	Класс качества воды	Характеристика состояния загрязненности воды
Иваньковское водохранилище					
БПК ₅	2012	многоводный	4.45	V	Грязная
Железо общее	2016	маловодный	4.15	V	Грязная
Марганец	2018	средний	3.32	IV	Загрязненная
Нефтепродукты					
Растворенный кислород					
ХПК					
Угличское водохранилище					
БПК ₅	2012	многоводный	3.05	IV	Загрязненная
Железо общее	2016	маловодный	3.39	IV	Загрязненная
Марганец	2018	средний	4.96	V	Грязная
Медь					
Растворенный кислород					
ХПК					
Рыбинское водохранилище					
БПК ₅	2012	многоводный	3.09	IV	Загрязненная
Железо общее	2016	маловодный	3.50	IV	Загрязненная
Марганец	2018	средний	3.80	IV	Загрязненная
Медь					
Растворенный кислород					
ХПК					
Горьковское водохранилище					
БПК ₅	2012	многоводный	2.60	IV	Загрязненная
Железо общее	2016	маловодный	3.22	IV	Загрязненная
Марганец	2018	средний	3.92	IV	Загрязненная
Медь					
Растворенный кислород					
ХПК					
Чебоксарское водохранилище					
БПК ₅	2012	многоводный	3.14	IV	Загрязненная
Железо общее	2016	маловодный	2.94	IV	Загрязненная
Марганец	2018	средний	3.47	IV	Загрязненная
Медь					
Растворенный кислород					
ХПК					
Камское водохранилище					
БПК ₅	2019	многоводный	2.09	III	Умеренно загрязненная
Железо общее	2021	маловодный	1.82	III	Умеренно загрязненная
Медь	2014	средний	2.12	III	Умеренно загрязненная
Растворенный кислород					
Фенолы					
ХПК					
Воткинское водохранилище					
БПК ₅	2019	многоводный	2.05	III	Умеренно загрязненная
Железо общее	2021	маловодный	1.78	III	Умеренно загрязненная
Медь	2014	средний	1.79	III	Умеренно загрязненная
Растворенный кислород					
Фенолы					
ХПК					
Нижнекамское водохранилище					
БПК ₅	2019	многоводный	1.13	III	Умеренно загрязненная
Железо общее	2021	маловодный	1.15	III	Умеренно загрязненная
Медь	2014	средний	1.13	III	Умеренно загрязненная
Растворенный кислород					
Фенолы					
ХПК					

Однако кроме марганца содержание прочих перечисленных показателей не превышало 7 ПДК (для железа и меди), а в основном составляло 1–2 ПДК.

В водохранилищах Камского каскада во все годы были превышены железо общее, медь, ХПК, нефтепродукты. Иногда отмечались превышения содержания аммонийного азота, БПК₅ и единично (2014 г., Камское водохранилище) цинка. При этом загрязнение Камского водохранилища во все годы, а Воткинского в 2014 г. фенолами достигало 20 ПДК, содержание меди превышало 20 ПДК, ХПК — более 14 ПДК, а содержание железа общего в средние и многоводные годы превышало 30 ПДК. Для других водохранилищ Камской ветви и остальных ингредиентов содержание загрязняющих веществ практически не превышало 2 ПДК.

В табл. 8 приведен перечень загрязняющих веществ, среднемесячные концентрации которых наиболее часто превышают ПДК и соответственно формируют характерное для водохранилищ загрязнение воды в течение года. Данные приведены для наиболее представительных, средних по водности лет: для 2018 г. — для Верхневолжских водохранилищ и 2014 г. — для водохранилищ Камского каскада. В воде Верхневолжских водохранилищ всегда (в 100% случаев) присутствует марганец и всегда превышен ХПК. В воде Чебоксарского водохранилища всегда есть превышение цинка. В Рыбинском и Горьковском водохранилищах всегда фиксируется превышение железа общего и меди. В водохранилищах Камского каскада в 100% случаев превышен ХПК. В Камском и Воткинском водохранилищах всегда отмечается превышение содержания меди и фенолов, а в Камском еще и общего железа.

По УКИЗВ худшее качество воды отмечено для Верхневолжских водохранилищ (табл. 9). Почти во все исследовавшиеся годы вода характеризуется как “очень загрязненная”. Для водохранилищ Камского каскада значения УКИЗВ ниже. Вода относится к категории “загрязненная”, а для Нижнекамского — в основном к категории “слабозагрязненная”. Однако для Камских водохранилищ не было информации о содержании марганца. А именно этот элемент был единственным из всех измерявшихся, кто попал в категорию критических показателей загрязнения для Верхневолжской ветви.

Обе оценки, и ИЗВ, и УКИЗВ, показывают несколько больший уровень загрязнения Верхневолжских водохранилищ по сравнению с Камскими, что, однако, может быть связано с отсутствием данных о содержании марганца в водах Камского каскада. По обоим показателям наилучшее качество воды характерно для Нижнекамского водохранилища.

Зависимость качества воды Верхневолжских и Камских водохранилищ от водности года

Получены незначимые по t -критерию Стьюдента (даже при $p = 0.05$) коэффициенты корреляции между среднегодовыми значениями УКИЗВ и притока воды к водохранилищу (водностью года) для водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов, что свидетельствует об отсутствии связи между качеством воды и водностью года. Но если для Волжских водохранилищ коэффициент корреляции близок к нулю, то для Камских водохранилищ абсолютные значения коэффициента корреляция между этими показателями выше. Для Камского каскада прослеживается тенденция: качество воды улучшается (УКИЗВ уменьшается) при росте водности года. Однако для проверки гипотезы о значимости выявленной тенденции Камских водохранилищ необходимо увеличение числа анализируемых лет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные оценки качества воды по УКИЗВ близки к оценкам Росгидромета (Качество ..., 2013, 2015, 2017, 2019, 2020, 2022) для соответствующих лет (табл. 10). Разница может быть связана как с разными местами отбора проб в разных лабораториях, так и, возможно, с отличиями в применявшихся методиках отбора и анализа проб. Кроме того, если в лабораториях Росгидромета оценивается УКИЗВ для точек наблюдений, то в данной работе подсчитаны УКИЗВ для предварительно осредненных для водохранилищ показателей, что сглаживает оценки. Однако оба массива данных, и Росгидромета и Росводресурсов, свидетельствуют об отсутствии связи качества воды водохранилищ Верхневолжского каскада с водностью лет. И в многоводные, и в маловодные годы качество воды в большинстве своем стабильно неудовлетворительное. Увеличение притока воды в многоводные годы статистически не сказывается на качестве воды в водохранилищах (хотя для камских водохранилищ и прослеживается тенденция улучшения качества вводы в многоводные годы). Можно достаточно уверенно говорить об отсутствии эффекта разбавления загрязненной воды Верхневолжских водохранилищ даже в годы повышенной водности. Причины такого явления могут быть следующими. С одной стороны, это увеличение поступления загрязняющих веществ с водосборов в годы повышенной водности от диффузных источников загрязнения. Диффузный сток в большинстве своем поступает в водные объекты без всякой, даже минимальной, очистки. Увеличение слоя водного стока приводит к росту неконтролируемого выноса веществ как с антропогенно преобразованных территорий (с сельскохозяйственных полей,

Таблица 8. Повторяемость случаев превышения ПДК в водохранилищах для среднего по водности года

Водохранилище	Год	Характеристика загрязнения воды (% случаев превышения ПДК)		
		Устойчивое (более 50%)	Характерное (от 30 до 50%, включая 30%, но исключая 50%)	Неустойчивое (от 10 до 30%, включая 10%, но исключая 30%)
Иваньковское	2018	Марганец ХПК БПК ₅ Фенолы	Аммоний-ион Железо общее	Нефтепродукты Растворенный кислород Нитриты
Угличское	2018	Марганец ХПК Железо общее БПК ₅ Медь Фенолы Аммоний-ион		Нефтепродукты Растворенный кислород
Рыбинское	2018	Железо общее Медь Марганец ХПК БПК ₅	Аммоний-ион	
Горьковское	2018	Железо общее Медь Марганец ХПК БПК ₅	Цинк	Аммоний-ион
Чебоксарское	2018	Железо общее Марганец ХПК Цинк Медь	БПК ₅	Нитриты
Камское	2014	Железо общее Медь Фенолы ХПК	Аммоний-ион Нефтепродукты Цинк	
Воткинское	2014	Медь Фенолы ХПК Железо общее Нефтепродукты	Аммоний-ион	
Нижнекамское	2014	ХПК Железо общее Нефтепродукты Медь Фенолы	БПК ₅	

с территорий населенных пунктов, с промышленных площадок), так и с естественных угодий. При этом функционирование и соответственно сбросы загрязняющих веществ от промышленных и коммунальных предприятий, основных поставщиков точечных контролируемых загрязнений, определяются производственными циклами, и в меньшей степени зависят от водности года. В маловодные годы возрастает доля

точечных источников поступления загрязняющих веществ в водные объекты. Одновременно с ростом водности года увеличивается как абсолютный, так и относительный вклад диффузных источников, а суммарный поток веществ от всех источников растет. Таким образом, рост водности сопровождается одновременным увеличением поступления загрязняющих веществ в водные объекты, что препятствует активизации

Таблица 9. Качество воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов по УКИЗВ в разные по водности годы

Год	Водность года	УКИЗВ	КПЗ (число/ показатели)	Класс и разряд без учета числа КПЗ	Характеристика состояния загрязненности воды без учета числа КПЗ	Класс и разряд с учетом числа КПЗ	Характеристика состояния загрязненности воды с учетом числа КПЗ
Иваньковское водохранилище							
2012	многоводный	3.37	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2016	маловодный	2.88	1/марганец	3а	загрязненная	3б	очень загрязненная
2018	средний	3.65	1/марганец	3б	очень загрязненная	4а	грязная
Угличское водохранилище							
2012	многоводный	3.27	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2016	маловодный	3.72	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2018	средний	4.16	1/марганец	4а	грязная	4а	грязная
Рыбинское водохранилище							
2012	многоводный	3.06	0	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2016	маловодный	3.24	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2018	средний	3.24	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
Горьковское водохранилище							
2012	многоводный	3.18	0	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2016	маловодный	3.03	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2018	средний	3.40	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
Чебоксарское водохранилище							
2012	многоводный	3.37	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2016	маловодный	3.49	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2018	средний	3.36	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
Камское водохранилище							
2019	многоводный	2.59	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
2021	маловодный	2.72	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
2014	средний	2.71	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
Воткинское водохранилище							
2019	многоводный	2.33	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
2021	маловодный	2.86	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
2014	средний	2.64	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
Нижекамское водохранилище							
2019	многоводный	1.94	0	2	слабо загрязненная	2	слабо загрязненная
2021	маловодный	1.71	0	2	слабо загрязненная	2	слабо загрязненная
2014	средний	2.21	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная

Примечание: КПЗ — критические показатели загрязненности воды (ингредиенты или показатели качества воды, которые обуславливают перевод воды по степени загрязненности в класс "очень грязная" на основании величины рассчитываемого по каждому ингредиенту оценочного балла, учитывающего одновременно величину наблюдаемых концентраций и частоту их обнаружения).

Таблица 10. Состояние качества воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов по данным лабораторий Росводресурсов и Росгидромета

Водохранилище	Водность года	Год	Состояние качества воды водохранилища по УКИЗВ			
			по данным Росводресурсов		по данным Росгидромета	
			Класс и разряд с учетом числа КПЗ	Характеристика состояния воды с учетом числа КПЗ	Класс и разряд	Характеристика состояния воды
Иваньковское	многоводный	2012	3б	очень загрязненная	3а—3б—4а	загрязненная — очень загрязненная — грязная
Иваньковское	маловодный	2016	3б	очень загрязненная	3а—3б	загрязненная — очень загрязненная
Иваньковское	средний	2018	4а	грязная	3а—3б	загрязненная — очень загрязненная
Угличское	многоводный	2012	3б	очень загрязненная	3а—3б—4а	загрязненная — очень загрязненная — грязная
Угличское	маловодный	2016	3б	очень загрязненная	3а—3б	загрязненная — очень загрязненная
Угличское	средний	2018	4а	грязная	3а—3б	загрязненная — очень загрязненная
Рыбинское	многоводный	2012	3б	очень загрязненная	3б—4а	очень загрязненная — грязная
Рыбинское	маловодный	2016	3б	очень загрязненная	3б—4а	очень загрязненная — грязная
Рыбинское	средний	2018	3б	очень загрязненная	3а—3б	загрязненная и очень загрязненная
Горьковское	многоводный	2012	3б	очень загрязненная	2—3а—3б—4а	слабозагрязненная — загрязненная — очень загрязненная — грязная
Горьковское	маловодный	2016	3б	очень загрязненная	3а—3б	загрязненная и очень загрязненная
Горьковское	средний	2018	3б	очень загрязненная	3а—3б	загрязненная и очень загрязненная
Чебоксарское	многоводный	2012	3б	очень загрязненная	3а—3б—4а	загрязненная — очень загрязненная — грязная
Чебоксарское	маловодный	2016	3б	очень загрязненная	3а—3б—4а	загрязненная, очень загрязненная — грязная
Чебоксарское	средний	2018	3б	очень загрязненная	3а—3б—4а	загрязненная — очень загрязненная — грязная
Камское	многоводный	2019	3а	загрязненная	3б—4а	очень загрязненная — грязная
Камское	маловодный	2021	3а	загрязненная	3а—3б	загрязненная — очень загрязненная
Камское	средний	2014	3а	загрязненная	3а—3б	загрязненная — очень загрязненная
Воткинское	многоводный	2019	3а	загрязненная	3а—3б	загрязненная — очень загрязненная
Воткинское	маловодный	2021	3а	загрязненная	3б	очень загрязненная
Воткинское	средний	2014	3а	загрязненная	3б	очень загрязненная
Нижнекамское	многоводный	2019	2	слабо загрязненная	3а—3б	загрязненная — очень загрязненная
Нижнекамское	маловодный	2021	2	слабо загрязненная	3а—3б	загрязненная — очень загрязненная
Нижнекамское	средний	2014	3а	загрязненная	3б	очень загрязненная

ции процессов разбавления. С другой стороны, как представляется, значительную роль в сохранении квазистационарного состояния водохранилища могут играть внутриводоемные процессы обмена и трансформации вещества в толще воды и на границах между водой и донными отложениями, между атмосферой и водной толщей. За счет этих факторов (увеличение роста диффузного стока в годы повышенной водности и внутриводоемные процессы), вода водохранилищ каскадов поддерживается в стабильно неудовлетворительном состоянии. Ожидать улучшения качества воды в водохранилищах за счет климатических (природных) флуктуаций водности и фактора разбавления на современном этапе уже нельзя. Решение проблемы — в совершенствовании системы управления водными ресурсами: в модернизации и строительстве современных систем очистки сточных вод промышленных и сельскохозяйственных предприятий, в реализации мероприятий на водосборах по предотвращению и сокращению диффузного стока.

ВЫВОДЫ

1. В водах всех водохранилищ во все исследуемые годы выявлена повышенная комплексность загрязненности: от 20 до 40% контролируемых показателей превышают ПДК. Комплексность выше в водах Верхневолжских водохранилищ, ниже — в Камских.

2. Для каждого из водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов выявлены приоритетные для контроля вещества, содержание которых в наибольшей степени превышают ПДК и соответственно дают наибольший вклад в ухудшение качества воды исследованных водохранилищ. Марганец, общее железо, медь (за исключением Иваньковского водохранилища) в наибольшей степени превышают ПДК и являются главными загрязняющими веществами Верхневолжских водохранилищ. В несколько раз повышено также содержание фенолов, БПК₅ и ХПК. Для водохранилищ Камского каскада плохое качество воды обусловлено высокими содержаниями общего железа, меди, фенолов и в меньшей степени нефтепродуктов.

3. Во всех водохранилищах в 100% проб отмечается превышение ХПК, то есть большое количество трудноокисляемой органики. В воде Верхневолжских водохранилищ всегда (в 100% случаев) присутствует марганец. Отсутствие измерений марганца в базе данных по Камским водохранилищам не позволяет судить о распространенности этого элемента в воде Камской ветви каскада. Во всех рассмотренных водохранилищах устойчивое загрязнение (в более 50% случаев) отмечается для общего железа и меди (для меди — за исключением Иваньковского

водохранилища). В камских водохранилищах и в двух верхних водохранилищах Верхневолжского каскада — Иваньковском и Угличском отмечается устойчивая загрязненность фенолами. Для всех водохранилищ Верхневолжского каскада, за исключением Чебоксарского, устойчиво и загрязнение легкоокисляемым органическим веществом (по БПК₅). В воде Чебоксарского водохранилища характерное загрязняющее вещество — цинк, в Угличском — аммоний, а в Воткинском и Нижнекамском — нефтепродукты.

4. Применение методики расчета УКИЗВ и ИЗВ показало, что водохранилища Верхневолжского и Камского каскадов, несмотря на различия в их природных особенностях и видах антропогенной нагрузки на их водосборах, характеризуются неудовлетворительным состоянием даже при среднегодовом осреднении показателей. Ни в одном водохранилище качество воды не соответствовало рыбохозяйственным нормативам. По категории УКИЗВ качество воды Камских водохранилищ соответствует категории “загрязненное”, а водохранилищ Верхневолжского каскада — “очень загрязненное”, а в Иваньковском и в Угличском водохранилищах оно в отдельные годы оценивается как “грязное”. По категории ИЗВ картина аналогичная. Камские водохранилища несколько чище, их вода характеризуется как “умеренно загрязненная”. Вода Верхневолжских водохранилищ “загрязненная”, а в Иваньковском и Угличском — в ряде случаев “грязная”. И по УКИЗВ, и по ИЗВ лучшее из рассматриваемых водохранилищ качество воды в обоих каскадах выявлено в Нижнекамском водохранилище. Однако вывод о лучшем качестве воды Камских водохранилищ ограничен из-за отсутствия данных измерений марганца — единственного выявленного при расчетах УКИЗВ критического показателя загрязненности воды Верхневолжских водохранилищ. Скорее всего, в большинстве случаев марганец — региональное фоновое загрязняющее вещество (как и общее железо и медь), имеющее природное происхождение (Данилов-Данильян и др., 2020; Фащевская и др., 2023).

5. Сопоставление результатов оценки качества воды, выполненное по массивам данных Росводресурсов и Росгидромета, продемонстрировало достаточно близкое совпадение выполненных оценок качества воды для лет разной водности.

6. И в многоводные, и в маловодные годы качество воды водохранилищ в большинстве своем стабильно неудовлетворительное. Возможно, это состояние может считаться стационарным при существующих климатических условиях. Для Верхневолжских водохранилищ достоверно не выявлен ожидаемый эффект улучшения качества воды за счет большего разбавления в многоводные годы. Возможная причина этого

явления — рост диффузного поступления загрязняющих веществ при увеличении водности года, что препятствует процессам разбавления. В этой ситуации единственная возможность улучшения качества воды в водохранилищах — водоохранные мероприятия, способствующие сокращению поступления загрязняющих веществ с водосборов и непосредственно в водные объекты. К ним относятся строительство и модернизация до современных стандартов очистных сооружений на точечных источниках сбросов, а также перестройка системы водоохранных мероприятий на водосборах для предотвращения поступления диффузного загрязнения в водные объекты.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках гранта РФФ 22-17-00224 “Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах каскадов Верхне-Волжских и Камских водохранилищ при различных сценариях землепользования и изменениях климата на их территориях”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем большую благодарность руководителям Верхневолжского и Камского бассейновых водных управлений Росводресурсов РФ А.Н. Баринову и А. В Михайлову и сотрудникам этих организаций за предоставленные материалы.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the implementation and financial support of the Russian Science Foundation grant no. 22-17-00224 “Formation of hydrological and geochemical processes in the catchment areas of the cascades of the Upper Volga and Kama reservoirs under various land use scenarios and climate changes in their territories.”

ACKNOWLEDGMENTS

We express our deep gratitude to the heads of the Upper Volga and Kama Basin Water Administrations of the Russian Federal Water Resources Agency A.N. Barinov and A.V. Mikhailov and the employees of these organizations for the materials provided.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / отв. ред. Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева. М.: Наука, 2003. 367 с.
- Болгов М.В., Кочерян А.Г., Лебедева И.П., Шашков С.Н. Качество природных вод в каскаде волжских водохранилищ // Аридные экосистемы. 2008. Т. 14. № 35–36. С. 68–82.
- Буторин Н.В., Зимина Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 158 с.
- Водоохранилища Верхней Волги. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 291 с.
- Водоохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука, 1986. 367 с.
- Временные методические указания, по комплексной оценке, качества поверхностных и морских вод. М.: Госкомгидромет СССР, 1986. 5 с.
- Вуглинский В.Г. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 223 с.
- Данилов-Данильян В.И., Веницианов Е.В., Аджиевко Г.В., Козлова М.А. Оценка современных подходов к управлению качеством поверхностных вод и их охране // Вестн. РАН. 2019. Т. 89. № 12. С. 1248–1259.
<https://doi.org/10.31857/s0869-587389121248-1259>
- Данилов-Данильян В.И., Полянин В.О., Фашевская Т.Б., Кирпичникова Н.В., Козлова М.А., Веницианов Е.В. Проблема снижения диффузного загрязнения водных объектов и повышение эффективности водоохранных программ // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 503–514.
<https://doi.org/10.31857/s0321059620050053>
- Дебольский В.К., Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б., Корчагина Я.П., Хрусталева Л.И., Чекмарева Е.А. Современная гидрохимическая характеристика реки Волга и ее водохранилищ // Вода: Химия и Экология. 2010. № 11. С. 2–12.
- Демин А.П. Водопотребление и водоотведение в бассейне реки Волги, их влияние на качество воды // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 6. С. 847–861.
<https://doi.org/10.31857/s2587556623060055>
- Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения: кол. монография под рук. В.И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с.
- Зимина Н.А., Законнов В.В. Аккумуляция биогенных элементов в донных отложениях водохранилищ Верхней Волги // Тр. ИБВВ. 1982. № 50 (53). С. 62–67.
- Иваницкий О.М., Кузьмич В.Н., Янин Е.П. Природные геохимические особенности территорий и проблемы нормирования качества поверхностных вод / Биохимические инновации в условиях коррекции техногенеза биосферы: Тр. Международ. биогеохимич. Симпозиума, посвященного 125-летию со дня рождения академика А.П. Виноградова и 90-летию образования Приднестровского университета. Тирасполь: Приднестровский гос. ун-т им. Т.Г. Шевченко, 2020. Т. 2. С. 183–187.
- Иваньковское водохранилище и его жизнь // Тр. ИБВВ. Л.: Наука, 1978. № 34 (37). 304 с.
- Измайлова А.В., Дубровская К.А., Фуксова Т.В. Многолетние изменения основных составляющих водного баланса крупнейших водохранилищ Европейской территории России // Вопросы ге-

- ографии. Сб. 157. Водные проблемы и их решение / ред. В.М. Котляков и др. М.: Медиа-ПРЕСС, 2023. С. 191–213.
- Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Фасахов М.А., Микова К.Д., Ясинский С.В., Скороход А.С.* Особенности формирования водного режима водохранилищ Камского каскада // Вестн. Воронеж. ун-та. 2025. № 2 (в печати).
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2012 / отв. ред. А.М. Никаноров. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2013. 555 с.
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2014. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2015. 530 с.
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2016. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2017. 556 с.
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2018. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2019. 561 с.
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2019 / отв. ред. М.М. Трофимчук. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2020. 578 с.
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2021 / отв. ред. М.М. Трофимчук. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2022. 620 с.
- Лукьянов К.В., Коронкевич Н.И.* Особенности распределения сточных и возвратных вод на территории Европейской части России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 5. С. 763–778.
<https://doi.org/10.31857/s2587556622050077>
- Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. РД 52.24.643–2002. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 49 с.
- Рисник Д.В., Беляев С.Д., Булгаков Н.Г., Левич А.П., Максимов В.Н., Мамихин С.В., Милько Е.С., Фурсова П.В., Ростовцева Е.Л.* Подходы к нормированию качества окружающей среды, законодательные и научные основы существующих систем экологического нормирования // Успехи современной биологии. 2012. Т. 132. № 6. С. 531–550.
- Романенко В.И.* Первичная продукция органического вещества в процессе фотосинтеза в каскаде волжских водохранилищ / Биологическая продуктивность и качество воды Волги и ее водохранилищ. М.: Наука, 1984. С. 48–60.
- Соболь С.В.* Водоохранилища в окружающей среде. В двух книгах. Н. Новгород: ННГАСУ, 2022. Кн. 1. 388 с.
- Тимофеева Л.А., Фрумин Г.Т.* Проблемы нормирования качества поверхностных вод // Уч. записки Рос. гос. гидрометеорологич. ун-та. 2015. № 38. С. 215–229.
- Томилина И.И., Гапеева М.В., Ложкина Р.А.* Оценка качества воды и донных отложений каскада водохранилищ реки Волга по показателям токсичности и химического состава // Тр. ИБВВ. 2018. № 82 (85). С. 107–131.
<https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0015>
- Фащевская Т.Б., Мотовилов Ю.Г., Картунова К.В.* Моделирование генетических составляющих водного и химического стока тяжелых металлов в бассейне Нижнекамского водохранилища // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 4. С. 492–508.
<https://doi.org/10.31857/s0321059623040077>
- Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
- Эдельштейн К.К.* Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
- Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В.* Диффузное загрязнение водных объектов равнинных территорий: проблема оценки // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 1. С. 115–130.
- Ясинский С.В., Нарыков А.Н., Кашутина Е.А., Сидорова М.В.* Применение космических снимков для оценки диффузного загрязнения бассейнов рек на примере притоков Чебоксарского водохранилища: матер. 17-й Всерос. открытой конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” (Москва, 11–15 ноября 2019 г.). М.: Институт космических исследований РАН, 2019. 129 с.

Current State of Water Quality in the Reservoirs of the Upper Volga and Kama Cascades

S. V. Yasinsky^{a,*}, E. S. Grishantseva^{a, b}, A. M. Rasulova^a,
M. A. Fasahov^d, A. A. Shaydulina^d, and E. A. Kashutina^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geological, Moscow, Russia*

^c*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

^d*Perm State University, Perm, Russia*

*e-mail: yasisergej@yandex.ru

The article is devoted to the assessment of the water quality of the Upper Volga and Kama cascades of the reservoirs of the Volga basin in different years in terms of water content in the modern period. The main factors influencing the formation of water quality in the reservoirs, which is significantly affected by the influx of pollutants from catchments from point and diffuse anthropogenic sources, are determined. The materials for the work were data from the state water management monitoring carried out by laboratories of organizations subordinate to the Upper Volga and Kama Basin Water Administrations of the Federal Water Resources Agency of the Russian Federation. When assessing the quality and ecological state of surface waters, as well as for a comparative analysis of the degree of pollution of water bodies, integral indices were used: the Water Pollution Index (WPI) and the Specific Combinatorial Water Pollution Index (SCWPI), calculated for years of different water content. The assessment of the water content of the years was determined by the empirical curves of the annual water inflow to the individual reservoirs. The analysis of the difference-integral curves of the annual inflow to the Upper Volga and Kama cascades of reservoirs showed their asynchrony since the beginning of the 21st century. For each of the reservoirs of the Upper Volga and Kama cascades, priority substances for control were identified that provide the greatest contribution to the deterioration of water quality. The application of the SCWPI and WPI calculation methodology showed that the reservoirs of the cascades are characterized by an unsatisfactory condition. In none of the reservoirs does the water quality meet the fishery standards. According to the SCWPI category, the water quality of the Kama reservoirs corresponds to the category of “polluted,” and that of the reservoirs of the Upper Volga cascade—“very polluted.” In some years, the water quality in the Ivankovskoye and Uglich reservoirs is assessed as “dirty.” According to the WPI category, the picture is similar. No effect of the inflow water content on the water quality in these water bodies was revealed. A comparison of the water quality assessment results, carried out using data sets from Rosvodresursy and Roshydromet, demonstrated a fairly close match.

Keywords: reservoirs, cascades, water quality, pollutants, integral indices, annual inflow, years of different water content, difference-integral curves

REFERENCES

- Antropogennyye vozdeystviya na vodnye resursy Rossii i so-predel'nykh gosudarstv v kontse 20 stoletiya* [Anthropogenic Impacts on Water Resources of Russia and Neighboring Countries at the End of the 20th Century]. Koronkevich N.I., Zaitseva I.S., Eds. Moscow: Nauka Publ., 2003. 367 p.
- Bolgov M.V., Kocheryan A.G., Lebedeva I.P., Shashkov S.N. Quality of natural waters in the cascade of Volga reservoirs. *Arid. Ekosis.*, 2008, vol. 14, no. 35–36, pp. 68–82. (In Russ.).
- Butorin N.V., Ziminova N.A., Kurdin V.P. *Donnye ot-lozheniya verkhnevolszhskikh vodokhranilishch* [Bottom Sediments of the Upper Volga Reservoirs]. Leningrad: Nauka Publ., 1975. 158 p.
- Danilov-Danilyan V.I., Polyatin V.O., Fashchevskaya T.B., Kirpichnikova N.V., Kozlova M.A., Venitsianov E.V. The problem of reducing the diffuse pollution of water bodies and improving the efficiency of water protection programs. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, no. 5, pp. 691–701.
<https://doi.org/10.1134/s009780782005005X>
- Danilov-Danilyan V.I., Venitsianov E.V., Adzhienko G.V., Kozlova M.A. Assessing recent approaches to quality control and conservation of surface waters. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2019, vol. 89, no. 6, pp. 599–607.
<https://doi.org/10.1134/s1019331619060029>
- Debol'skii V.K., Grigor'eva I.L., Komissarov A.B., Korchagina Ya.P., Khrustaleva L.I., Chekmareva E.A. Modern hydrochemical characteristics of the Volga River and its reservoirs. *Voda: Khim. Ekol.*, 2010, no. 11, pp. 2–12. (In Russ.).
- Demin A.P. Water consumption and water disposal in the Volga River basin, their impact on water quality. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2023, vol. 87, no. 6, pp. 847–861. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/s2587556623060055>
- Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov: problemy i resheniya* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems

- and Solutions]. Danilov-Danilyan V.I., Ed. Moscow: Izd-vo Akad. Nauk, 2020. 512 p.
- Edel'shtein K.K. *Vodokhranilishcha Rossii: ekologicheskie problemy, puti ikh resheniya* [Reservoirs of Russia: Environmental Problems, Ways to Solve Them]. Moscow: GEOS Publ., 1998. 277 p.
- Fashchevskaya T.B., Motovilov Yu.G., Kortunova K.V. Modeling the genetic components of the water and chemical runoff of heavy metals in the basin of the Nizhnekamskoe reservoir. *Water Resour.*, 2023, vol. 50, no. 4, pp. 583–599. <https://doi.org/10.1134/s0097807823040073>
- Ivanitskii O.M., Kuz'mich V. N., Yanin E.P. Natural geochemical features of territories and problems of standardization of surface water quality. In *Biokhimicheskie innovatsii v usloviyakh korrektsii tekhnogeneza biosfery: Tr. mezhdun. biogeokhim. simpoz. Tom 2* [Biochemical Innovations in the Conditions of Correction of Biosphere Technogenesis: Proc. of the Int. Biogeochemical Symp. Vol. 2]. Tiraspol: Pridnestr. Gos. Univ. im. T.G. Shevchenko, 2020, pp. 183–187. (In Russ.)
- Ivan'kovskoe vodokhranilishche i ego zhizn'. *Vyp. 34* [Ivan'kovskoye Reservoir and Its Life. Vol. 34]. Leningrad: Nauka Publ., 1978. 304 p.
- Izmailova A.V., Dubrovskaya K.A., Fuksova T.V. Long-term changes in the main components of the water balance of the largest reservoirs of the European territory of Russia. In *Voprosy geografii. Sb.157: Vodnye problemy i ikh reshenie* [Problems of Geography. Vol. 157: Water Problems and Their Solution]. Kotlyakov V.M., Ed. Moscow: Media-PRESS Publ., 2023, pp. 191–213. (In Russ.)
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2012* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2012]. Nikanorov A.M., Ed. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2013. 555 p.
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2014* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2014]. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2015. 530 p.
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2016* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2016]. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2017. 556 p.
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2018* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2018]. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2019. 561 p.
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2019* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2019]. Trofimchuk M.M., Ed. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2020. 578 p.
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2021* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2021]. Trofimchuk M.M., Ed. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2022. 620 p.
- Kalinin V.G., Shaidulina A.A., Fasakhov M.A., Miko-va K.D., Yasinskii S.V., Skorokhod A.S. Features of the formation of the water regime of the reservoirs of the Kama cascade. *Vestn. Voronezh. Univ.*, 2025, no. 2. (In Russ.)
- Luk'yanov K. V., Koronkevich N.I. Features of the distribution of waste and return waters in the territory of the European part of Russia. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2022, vol. 86, no. 5, pp. 763–778. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/s2587556622050077>
- Metodicheskie ukazaniya. Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod sushu po gidrokhimicheskim pokazatelyam RD 52.24.643–2002* [Guidelines. Method of Comprehensive Assessment of the Degree of Pollution of Surface Waters of Land Based on Hydrochemical Indicators. RD 52.24.643–2002]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 2003. 49 p.
- Risnik D.V., Belyaev S.D., Bulgakov N.G., Levich A.P., Maksimov V.N., Mamikhin S.V., Mil'ko E. S., Fursova P.V., Rostovtseva E.L. Approaches to environmental quality regulation, legislative and scientific foundations of existing environmental regulation systems. *Uspekhi Sovrem. Biol.*, 2012, vol. 132, no. 6, pp. 531–550. (In Russ.)
- Romanenko V.I. Primary production of organic matter in the process of photosynthesis in the cascade of Volga reservoirs. In *Biologicheskaya produktivnost' i kachestvo vody Volgi i ee vodokhranilishch* [Biological Productivity and Water Quality of the Volga River and Its Reservoirs]. Moscow: Nauka Publ., 1984, pp. 48–60. (In Russ.)
- Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. *Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoi identifikatsii* [Quantitative Hydroecology: Methods of System Identification]. Tolyatti: IEVB RAN, 2023. 463 p.
- Sobol' S.V. *Vodokhranilishcha v okruzhayushchei srede. Tom 1* [Reservoirs in the Environment. Vol. 1]. N. Novgorod: NNGASU, 2022. 388 p.
- Timofeeva L.A., Frumin G.T. Problems of standardization of surface water quality. *Uchen. Zapis. Ross. Gos. Gidromet. Univ.*, 2015, no. 38, pp. 215–229. (In Russ.)
- Tomilina I.I., Gapeeva M.V., Lozhkina R.A. Assessment of the quality of water and bottom sediments of the Volga River reservoir cascade based on toxicity and chemical composition indicators. *Tr. IBVV*, 2018, no. 82, pp. 107–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0015>
- Vodokhranilishcha i ikh vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredu* [Reservoirs and Their Environment Impact]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 367 p.
- Vodokhranilishcha Verkhnei Volgi* [Reservoirs of the Upper Volga]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1975. 291 p.
- Vremennye metodicheskie ukazaniya, po kompleksnoi otsenke, kachestva poverkhnostnykh i morskikh vod* [Interim Guidelines for the Comprehensive Assessment of Surface and Marine Water Quality]. Moscow: Goskomgidromet SSSR, 1986. 5 p.

- Vuglinskii V.G. *Vodnye resursy i vodnyi balans krupnykh vodokhranilishch SSSR* [Water Resources and Water Balance of Large Reservoirs of the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1991. 223 p.
- Yasinskii S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V. Diffuse pollution of water bodies in flat areas: the problem of assessment. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2023, vol. 87, no. 1, pp. 115–130. (In Russ.).
- Yasinskii S.V., Narykov A.N., Kashutina E.A., Sidorova M.V. Application of space images to assess diffuse pollution of river basins using the example of tributaries of the Cheboksary reservoir. In *Materialy 17-i Vseross. otkrytoi konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"*, Moskva, 11–15 noyabrya 2019 goda [Proc. of the 17th All-Russian Open Conf. "Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space", Moscow, November 11–15, 2019]. Moscow: Inst. Kosmich. Issled. RAN, 2019. 129 p. (In Russ.).
- Ziminova N.A., Zakonnov V.V. Accumulation of biogenic elements in bottom sediments of Upper Volga reservoirs. *Tr. IBVV*, 1982, no. 50, pp. 62–67. (In Russ.).

УДК 912.43+58.02

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОД НА СЫРЬЕВОЙ ПОТЕНЦИАЛ ЛЕСОВ ПОБЕРЕЖИЙ ОЗЕРА БАЙКАЛ И ИРКУТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2024 г. Е. Л. Макаренко*

*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия***e-mail: elmakarenko@bk.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2023 г.

После доработки 13.09.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Цель исследования – на основе анализа современного состояния лесной растительности на побережьях Иркутского водохранилища и оз. Байкал рассчитать прямой экономический ущерб в результате возможных прямых потерь лесов из-за негативного воздействия вод на затопляемых и абразионных участках. Актуальность исследования обусловлена необходимостью минимизации ущербов лесам побережий при изменении уровней воды в водоемах путем внесения изменений в правила использования водных ресурсов, землепользования, лесопользования и др. Методы исследования: геоботанический, лесотаксационный, геоинформационный, экспертный и др. Ущерб определен в отношении фактически произрастающей на 2022–2023 гг. лесной растительности, он носит потенциальный характер и не отражает ущербы от гибели или повреждения растительности за прошлые годы. Расчет ущерба произведен в отношении ресурсов древесины, древесной зелени, коры, лесной подстилки, грибов, ягод, орехов, березового сока, лекарственных растений и др. Для его расчета применены нормативные ставки платы за единицу объема лесных ресурсов. Определение объема лесных ресурсов основывалось на показателях биологической продуктивности, рассчитанных по региональным методикам. Исследование позволило определить и картографировать размещение лесопокрываемых участков в составе категорий земель и отдельных землепользований, качественные характеристики лесов, а также экономический ущерб в разрезе видов лесных ресурсов по уровням потенциального подъема воды. Среди муниципальных образований наибольшие значения экономического ущерба отмечены в Иркутском районе – за счет высоких таксационных характеристик лесов, большей частью расположенных на абразионных побережьях Иркутского водохранилища. Определены тенденции увеличения площади лесов и экономического ущерба в зависимости от увеличения абсолютной высоты местности. Эта тенденция особенно выражена для побережий Иркутского водохранилища, где от высотной отметки 457.0 до 457.85 м через каждые 10 см высоты сечения рельефа площадь лесов увеличивается на 5603.1–7344.7 м², а экономический ущерб – на 85879.2–125512.1 руб. Для побережий оз. Байкал тенденция устойчивого увеличения данных показателей нарушается после отметки 457.4 м, что связано с особенностями их геоморфологического строения и развитием остепненных и заболоченных лесорастительных комплексов.

Ключевые слова: затопление, абразия, подтопление, продуктивность леса, категории земель, древесные, недревесные, пищевые лесные ресурсы

DOI: 10.31857/S2587556624060075, EDN: AJLAOR

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проблемы негативного воздействия вод на уникальные водные и прибрежные экосистемы оз. Байкал, р. Ангары стали особо значимо проявляться с момента создания Иркутского водохранилища в 1950-х годах (Болгов и др., 2017; Гармаев, Цыренов, 2019; Ступин и др., 2018), которое привело не только к повышению уровня воды в озере в пределах 1.0–1.2 м, но и значительным его колебаниям. В то время

проектирование экономического развития региона и регулирования стока не предполагало предварительных научных и инженерно-исследовательских работ по оценке возможных негативных последствий создания Иркутской ГЭС и водохранилища для природных экосистем. Природоведческие вопросы, по мнению И.Ю. Долгушина, Л.Ф. Куницына и других авторов (Природа ..., 1975), стали учитываться в инструктивных и нормативных документах только начиная с 1960-х годов.

Колебания уровней воды в водохранилище и озере — взаимосвязанных природно-техногенной и природной систем — обусловлены, с одной стороны, различной сезонной и среднегодовой приточностью, а с другой стороны, нормами и ограничениями по сбросу вод из верхнего в нижний бьеф Иркутского водохранилища. Нормы и ограничения по сбросу продиктованы требованиями энергетики, водного транспорта, расположением в нижнем бьефе Иркутской ГЭС крупных населенных пунктов, включая г. Иркутск. Корректирующее влияние на показатели сброса вод оказывает также подпорный характер каскада ангарских ГЭС — Братского, Усть-Илимского, Богучанского гидроузлов. Таким образом, с момента строительства Иркутской ГЭС “озеро используется в режиме водохранилища многолетнего регулирования” (Гармаев, Цыренов, 2019, с. 39). С 1898 по 2021 г. минимальный и максимальный уровни на озере составили 454.92 (1900 г., 1904 г.) и 457.39 м (1988 г.) соответственно. С середины 1990-х годов, за исключением отдельных лет, на Байкале отмечался маловодный период. Начиная с 2018 г. вследствие значительного выпадения осадков в бассейнах главных притоков озера, в числе которых р. Селенга, уровень Байкала поднимался до 456.95 м. При этом отметка 457.0 м является максимальной в период средней водности, что обозначено в постановлении Правительства Российской Федерации № 234 от 26 марта 2001 г. “О предельных значениях уровня воды в оз. Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности”¹, приостановленного согласно постановлению от 16 марта 2022 г. № 379². Отмечается (Гармаев, Цыренов, 2019), что превышение отметки 457.0 м уже ведет к значительным ущербам для прибрежных природных экосистем. Высокие уровни воды в озере и водохранилище преимущественно по причине максимальных климатических осадков в 1962, 1964, 1971, 1973, 1983, 1986, 1988, 1990, 1994, 2018 гг. и в последующие годы резко обострили развитие негативных водных процессов³, к которым относятся периодические затопления и подтопления, развитие абразии и эрозионные процессы, ведущие к избыточному переувлажнению почв и заболачиванию, геоморфологической перестройке береговой линии с потерей земель и пр.

Особое место среди природных компонентов побережий, на которые водные процессы оказывают негативное влияние, занимают леса. Их гибель и повреждения сказываются на изменении функционирования всех прибрежных

экосистем. Древесная растительность согласно ГОСТ 18486—87⁴ выступает не только важнейшей частью леса, но и его средообразующим эдификатором. Ресурсы леса, включая древостой, выполняют, согласно современной парадигме природного капитала, различные экосистемные услуги, под которыми понимают все виды материальных и нематериальных благ, получаемые человеком от живой природы (Экосистемные ..., 2016; Millennium ..., 2005). Они оцениваются монетарными или немонетарными показателями (Касимов Д.В., Касимов В.Д., 2017).

Среди водных процессов, оказывающих негативное воздействие на бореальные леса, наибольшее значение имеет избыточное переувлажнение почв в результате затоплений и подтоплений. Вопросы индикационных реакций лесорастительных сообществ на избыточное переувлажнение изучаются давно и представлены во многих отечественных и зарубежных работах (Бахтенко, 2001; Булко и др., 2013; Горбачев и др., 2012; Денисов и др., 1958; Чевердин и др., 2018; Annemarie et al., 2017; Armstrong et al., 1994; de Bello et al., 2013; Garssen et al., 2015; Ström et al., 2011; Violle et al., 2011). В целом отмечается тесная связь между климатом и развитием многих водных процессов, крайне негативное воздействие длительного и частого избыточного переувлажнения почв на леса, приводящего к их гибели и замене типичных лесорастительных формаций на влагоустойчивые. Особого внимания заслуживают воздействия негативных водных процессов на лесную растительность в зонах влияния крупных гидротехнических сооружений (Дьяконов, 1975; Дьяконов, Ретеюм, 1967; Сулейманова, Спицына, 2012; Угрюмов, Даниленко, 2007; Филькин, 2011; и др.). Развитию негативных водных процессов на исследуемой территории посвящены работы ряда исследователей (Козырева и др., 2020; Потемкина, 2000).

Воздействия негативных водных процессов на природные и социально-экономические объекты ведут к значительным экономическим ущербам (фактическим или потенциальным). В этой связи, применительно к территории исследования, отметим оценки ущербов, проведенные в середине 1990-х годов Байкальским институтом рационального природопользования в рамках научно-технической программы “Сибирь” (Оценки ..., 1996). Разработанная для этих целей методика отличалась многофакторностью, но вместе с тем громоздкостью вычислений, спецификой используемых показателей оценки, затрудняющих получение данных для расчетов и др.

Актуальность экономической оценки ущербов обусловлена необходимостью минимизации

¹ <https://base.garant.ru/2157975/> (дата обращения 22.12.2023).

² <https://npalib.ru/2022/03/16/postanovlenie-379-id275552/> (дата обращения 22.05.2024).

³ http://irkipedia.ru/content/geomorfologiya_baykala_dinamika_izmeneniy_beregov (дата обращения 22.05.2024).

⁴ <https://docs.cntd.ru/document/1200022985> (дата обращения 22.12.2023).

их путем регулирования уровня воды Иркутского водохранилища и оз. Байкал, строительства защитных прибрежных сооружений, внесения изменений в схемы территориального планирования и зонирования, земле- и лесопользования (Гагаринова, Заборцева, 2022).

ТЕРРИТОРИЯ, ЦЕЛИ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цели и задачи исследования определены рамками проекта “Влияние изменений уровня воды в озере Байкал на состояние экосистемы озера, определение ущерба объектам экономики и инфраструктуры прибрежных территорий Республики Бурятия, Иркутской области в зависимости от уровней озера и сбросов Иркутской ГЭС”, который выполнялся в 2021–2023 гг. научно-исследовательскими организациями Иркутской области и Республики Бурятия, включая Институт географии им. В.Б. Сочавы (г. Иркутск)⁵.

Целью нашей части исследования, которое территориально охватывало побережья в верхнем бьефе Иркутской ГЭС (Иркутского водохранилища и оз. Байкал на территории Иркутского, Ольхонского, Слюдянского районов Иркутской области и г. Иркутска) являлся анализ современного состояния лесов на участках негативного воздействия вод, оценка прямого экономического ущерба (ПЭУ) в результате прямых возможных потерь лесорастительных ресурсов от негативных водных процессов. Таким образом, в рамках исследования ПЭУ носит потенциальный характер и затрагивает только сырьевую сторону ресурсов леса. Теоретически ПЭУ является наиболее важной частью общего экономического ущерба, рассчитываемого с учетом затрат на восстановление, упущенной выгоды и косвенного ущерба (Методика ..., 2006). Затраты на лесовосстановление не определены ввиду того, что их расчет их объема находится в компетенции территориальных органов управления лесным хозяйством. Два других вида ущерба применимы лишь к экономическим видам деятельности, участникам земельно-правовых отношений.

Для достижения поставленной цели на исследуемых участках негативного воздействия вод решены следующие задачи: 1) выделены лесопокрываемые земли и проанализировано современное геоботаническое состояние лесов; 2) определены важнейшие виды лесных ресурсов, подлежащие оценке; 3) выбраны методические подходы и рассчитаны экономические ущербы по видам лесных ресурсов в разрезе землепользований, категорий земель, муниципальных образований;

⁵ <https://idsbras.ru/rossijskie-uchenye-predlagajut-izmenit-pravila-ispolzovanija-vodnogo-regulirovanija-irkutskogo-kaskada-gjes/> (дата обращения 03.09.2024).

4) проведено картографирование лесопокрываемых участков; 5) создана геоинформационная база данных, содержащая по каждому лесопокрываемому участку данные по его площади, лесотаксационным характеристикам (породный состав, тип леса, относительная полнота, класс бонитета, группа возраста, средний запас древесины на единицу лесопокрываемой площади), нормативно-правовому положению земель (кадастровый номер, категория земель, вид разрешенного использования), на которых расположены леса.

Данные получены в ходе полевых геоботанических исследований, анализа таксационных показателей лесов по ключевым лесным выделам в лесничествах (Ольхонское, Слюдянское, Иркутское, Ангарское) и особо охраняемых природных территориях (Прибайкальский национальный парк, Байкало-Ленский заповедник), предоставленных в виде выписок из государственного лесного реестра⁶. В работе были использованы тематические карты (Байкал ..., 1993; Растительность ..., 1972), результаты региональных геоботанических исследований (Сизых, 2021; Чепинога, 2015). В целях картографирования границ лесопокрываемых участков и определения некоторых таксационных характеристик лесов методами дешифрирования и аналогий использовались информационно-спутниковые системы SASPlanet и Google Earth. Информация по нормативно-правовому положению земель получена из Государственного реестра земель Иркутской области⁷. Пространственно-координатная локализация лесопокрываемых земель, определение их площадей, формирование базы данных и тематическое картографирование выполнены при использовании функций картографо-геоинформационной среды MapInfo Pro.

В соответствии с заданием по проекту для расчета экономических ущербов использовались официально-действующие методики, а также нормативно-правовая база российского законодательства, в том числе в отношении границ прибрежных участков оз. Байкал, подверженных негативным водным процессам, связанных с его высокой или низкой водностью. Согласно постановлению Правительства № 654 от 27 апреля 2021 г. “О максимальных и минимальных уровнях воды в озере Байкал в 2021 г.”⁸ прибрежные участки, на которых активно проявляются негативные процессы, ограничены диапазоном 455.54–457.85 м (в тихоокеанской системе высот). Этот диапазон находится в соответствии с минимальными (для периода малой водности) и максимальными (для периода большой водности) уровнями Байкала. Абсолютная высотная

⁶ <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rossii-ot-30102013-n-464/> (дата обращения 20.12.2023).

⁷ <https://egrp365.org/map/> (дата обращения 20.12.2023).

⁸ <https://base.garant.ru/400729221/> (дата обращения 15.09.2023).

отметка 457.0 м представляет собой нормальный подпорный уровень водохранилища (НПУ)⁹, превышение которого оказывает существенное воздействие на прибрежные экосистемы. Исследования показали, что она превышает в многоводные годы (например, в 2021 г.), но не достигает отметок, близких к форсированному подпорному уровню, — 457.85 м.

Условными границами участков затопления для оз. Байкал приняты диапазоны — 457.0–457.85 м (в тихоокеанской системе высот), а для Иркутского водохранилища — 456.9–457.85 м, что обусловлено его более низкими, чем на озере, высотными отметками. Выбор режимов регулирования уровня оз. Байкал внутри диапазона 456.0–457.0 м не требует стоимостных оценок, так как он соответствует нормальным проектным условиям и по опыту эксплуатации Иркутской ГЭС не вызывает социально-экономических потерь и ущербов (Гагаринова, Заборцева, 2022). Именно с отметки НПУ (457.0 м) отмечается увеличение расходов воды из верхнего бьефа в нижний до максимально допустимых — 3200–4500 м³/с (с учетом расхода р. Иркут) по условию незатопления г. Иркутска. Превышения уровня 457.4 м обуславливают максимально возможные расходы в нижний бьеф 4500–6000 м³/с (с учетом расхода р. Иркут), при этом расходы ГЭС не должны превышать 5100–5400 м³/с. Превышения уровня 457.5 м при катастрофически высокой водности (обеспеченность менее 1%) обуславливают введение особого (чрезвычайного) режима пропуска экстремальных паводков.

Условные границы абразионных участков побережий образованы расстоянием от исходных до конечных высотных отметок, соответствующим среднемноголетним данным по абразионным потерям земель на побережьях в периоды большой водности. В обобщенном виде местоположение таких участков представлено на мелко-масштабной карте “Геоморфологическое строение и динамика берегов и дна” (Байкал ..., 1993).

Таким образом, расчеты проведены для зоны формирования максимально возможных ущербов, где находятся наибольшая часть прибрежных лесов и практически все инфраструктурные и социально-экономические объекты, активно ведется разнообразная деятельность.

Основой для расчета ПЭУ послужила высокоточная цифровая модель рельефа (ЦМР), выполненная сотрудниками Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН для прибрежных территорий суши, а также мелководий (для оценки ущерба биологическим водным ресурсам) Байкала, Иркутского водохранилища и нижнего бьефа Иркутской

ГЭС, подверженных потенциальным ущербам при регулировании уровня озера. Для получения массива высотных точек, проанализированных при помощи современных программных ГИС-пакетов, была проведена лидарная съемка самолетного типа (технология получения и обработки информации дистанционного зондирования с помощью лазерных оптических систем). Цифровая аэрофотосъемка (АФС) проведена с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) — беспилотного комплекса самолетного типа Геоскан 101, а также квадрокоптера DJI Mavic2 Pro. Полученные в результате съемки изображения позволили создать при помощи программного обеспечения (Agisoft Metashape PRO) ортофотопланы и 3D модели рельефа с точностью выше 10 см на пиксель, что примерно соответствует масштабу топографического плана 1 : 1000. Также для согласования всей информации и получения ЦМР были использованы нерегулярные триангуляционные сети. Полетные маршруты в автоматическом режиме строились с использованием программных приложений PIX4Dcapture и Геоскан (для БПЛА самолетного типа). Продольное и поперечное перекрытие снимков при этом достигало около 70%. В качестве источников для мелководной части побережий также использовались изолинии рельефа с векторной топоосновы масштабов 1 : 25000 и 1 : 50000; отметки глубин и изобаты, оцифрованные с лоцманских карт водохранилища, промеры глубин, выполненные с помощью эхолота. Ряд задач выполнялся с помощью программ QGIS и EasyTrace.

Процессы абразии и затопления на территории исследования имеют наибольшее распространение и визуально отражают непосредственную связь побережий с водоемами путем единого массо- и энергопереноса, поверхностного и грунтового стока. Мы не выделяли в самостоятельную группу и не исследовали участки побережий, подверженные подтоплениям. Во многом это связано с отсутствием системных и крупномасштабных гидрогеологических наблюдений за процессами подтопления на территории исследования, которые бы давали ответы на многие вопросы, например, о границах данного явления, количественных и качественных параметрах связи между уровнями грунтовых вод и колебаниями уровней воды в водоемах. Однако предполагаем, что на ряде участков побережий Байкала и Иркутского водохранилища затопление сопровождается процессами подтопления, обусловленными глубиной залегания подземных вод до 10 м (реже 25–50 м) в водообильных рыхлых отложениях (Байкал ..., 1993). Здесь процессы подтопления развиты, скорее всего, на территории прибрежных низинных (эвтрофных) болот с гидроморфным (до 3 м) или по-

⁹ <http://www.rushydro.ru> (дата обращения 22.12.2023).

лугидроморфным (3–6 м), реже автотрофным (более 6 м) типом залегания вод. Для остальной, большей части побережий характерны слабодообильные метаморфические и осадочные породы с глубиной залегания подземных вод 100 м и более.

Анализ официально действующей методики по оценке экономических ущербов от негативных водных процессов (Методика ..., 2006) показал ее неприменимость в отношении расчета ПЭУ от гибели или повреждения лесных ресурсов. В частности, отметим неоднозначность изложенных в ней суждений, малого числа оцениваемых показателей без учета разнообразия лесных ресурсов, их количественных и качественных параметров и др. В этой связи, с учетом лесного законодательства, разработан подход, позволяющий более объективно, по нашему мнению, оценить ПЭУ, исходя из разнообразия видов лесных ресурсов, таксационных характеристик лесов, отражающих продуктивность не только древесных, но и иных ресурсов леса: недревесных или второстепенных (лесной подстилки, древесной зелени, коры, сучьев), пищевых и лекарственных (грибов, ягод, орехов, березового сока, листьев лекарственных растений), выступающих частью ресурсов побочного пользования (ГОСТ Р 59058–2020)¹⁰.

Для древесных ресурсов, ввиду того, что леса побережий относятся к защитным, применены нормативные ставки для Иркутской области согласно приложения № 2 “Таксы для исчисления размера вреда, причиненного лесным насаждениям, заготовка древесины которых не допускается” к постановлению Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 1730 “Об утверждении особенностей возмещения вреда, причиненного лесам и находящимся в них природным объектам вследствие нарушения лесного законодательства”¹¹. Для древесных ресурсов на абразионных участках выбраны таксы для древостоев, поврежденных до степени прекращения их роста, а для древесных ресурсов, находящихся на затопляемых участках — таксы, соответствующие древостоям с повреждениями, не влекущими прекращения роста. Для остальных видов лесных ресурсов применены ставки платы за единицу их объема согласно Постановления Правительства РФ от 22 мая 2007 г. № 310¹², проиндексированные на 1 января 2023 г. согласно Постановления Правительства РФ от 23 декабря 2022 г. № 2405 “О применении в 2023–2026 годах коэффициентов к ставкам платы за единицу объема

лесных ресурсов и ставкам платы за единицу площади лесного участка, находящегося в федеральной собственности”¹³ (табл. 1). При этом для тех видов лесных ресурсов, которые учтены в расчетах, но отсутствуют в вышеназванном документе, нами применены условные ставки платы.

Расчет объема (количества) ресурсов основывался на показателях их биологической продуктивности и урожайности (Краткий ..., 2005). Значения показателя продуктивности древесных ресурсов — среднего запаса древесины на единицу лесопокрытой площади (м³/га) определены из таксационных описаний лесных выделов, а пищевых, лекарственных и недревесных лесных ресурсов — с помощью региональных методик (см. табл. 1), большей частью представленных в таксационном справочнике (Таксационный ..., 2018), где они дифференцированы по лесным районам Российской Федерации, названия и территориальный охват которых приведены в Приказе Минприроды России от 18 августа 2014 г. № 367¹⁴. Определение объема лесных ресурсов для абразионных и затопляемых участков произведен в границах Байкальского горного лесного района, к которому относится исследуемая территория. В случае отсутствия для некоторых видов лесных ресурсов методических подходов по определению их продуктивности, использованы те, которые разработаны для районов со сходными лесорастительными условиями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На затопляемых участках расположена большая часть всех лесов, подверженных негативным водным процессам, — 1368432.1 м² или 93.5%. Запас древесины составляет 19033.8 м³. Экономический ущерб от потери оцениваемых лесных ресурсов на этих участках — 18668487.5 руб. или 72.9% от всего ПЭУ (табл. 2). Леса здесь представлены преимущественно заболоченными осоково-кустарничково-моховыми сообществами с преобладанием берез (*Betula pendula* Roth, *B. platyphylla* Sukaczew, *Betula fruticosa* Pall.), ивы (*Salix viminalis* L., *S. pentandra* L., *S. caprea* L., *S. rhamnifolia* Pall.). На побережье южного Байкала встречаются душекия (*Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar) и тополь (*Populus suaveolens* Fisch.). Леса низинных заболоченных участков подвержены деструктивным сукцессиям, что выражается в угнетении, изреживании древостоев, замене их на влагоустойчивые виды. Для более возвышенных участков характерен относительно развитый лесорастительный покров,

¹⁰ <https://files.stroyinf.ru/Data/752/75220.pdf> (дата обращения 22.05.2024).

¹¹ http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_315299/ (дата обращения 20.12.2023).

¹² http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_68813/ (дата обращения 20.12.2023).

¹³ https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_435493/#dst100007 (дата обращения 20.12.2023).

¹⁴ http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169590/ (дата обращения 20.12.2023).

Таблица 1. Виды лесных ресурсов, ставки платы за единицу их объема и методические источники для вычисления продуктивности и урожайности

Вид лесных ресурсов	Ставка платы*	Источники
Древесные ресурсы		
а) поврежденные до степени прекращения роста	4110 руб./м ³ (для абразионных участков)	Таксационные описания выделов в Иркутском, Ангарском Слюдянском, Ольхонском лесничествах, Прибайкальском национальном парке и Байкало-Ленском государственном природном заповеднике
б) при повреждении, не влекущем прекращения роста	822 руб./м ³ (для участков затопления)	
Пищевые лесные ресурсы**		
Ягоды (брусника, черника)	1.61 руб./кг	Биологическая урожайность ягодников Иркутской области, кг/га (Основные ..., 1980)
Березовый сок	10.7 руб./ц	Средний показатель сокопродуктивности для Восточно-Сибирского экономического района — 20 т/га (Орлов, Рябчук, 1982)
Кедровые орехи	2.14 руб./кг	Биологическая урожайность кедровых насаждений III, IV и V классов бонитета (кг/га) Иркутской области (Основные ..., 1980)
Грибы	1.07 руб./кг	Шкала биологической урожайности грибов в основных группах типов леса (Лесохозяйственный регламент Иркутского ..., 2018)
Мед	2.14 руб./кг	Медопродуктивность по типам леса Западного Забайкалья (Республика Бурятия) (Шевцова, 1987)
Папоротник-орляк (<i>Pteridium aquilinum</i>)	1.07 руб./кг	Фитомасса вай орляка соснового для трех типов леса на юге Приенисейской Сибири (Пономарев, 2013)
Ресурсы лекарственных растений		
Листья (брусника, черника)	1.61 руб./кг	Запас лекарственного сырья на 1 га в Иркутской области (кг воздушно-сухой/сырой вес) (Основные ..., 1980)
Недревесные лесные ресурсы***		
Лесная подстилка	0.05 руб./га	Запас подстилки в культурах основных лесобразующих пород Сибири (Решетникова, 2015)
Древесная зелень	11.66 руб./т	Объем древесной зелени в сосновых, еловых и березовых насаждениях (по Н. И. Казимирову) (Таксационный ..., 2018)
Крупные сучья	4110 и 822 руб./м ³	Первичная продукция из недревесных лесных ресурсов в 1000 м ³ вывезенной древесины (Лесохозяйственный регламент Таштыпского ..., 2013)
Кора	2.78 руб./т	

Примечания. * Ставки платы для Иркутской области без учета коэффициента индексации на 2023 г. — 2.59 (Постановление Правительства РФ от 23 декабря 2022 г. № 2405). ** Условные ставки платы: для ягод брусники и черники — 1.61 руб./кг (как за лекарственное сырье); для меда — 2.14 руб./кг (как за дикорастущие орехи); для папоротника-орляка — 1.07 руб./кг (как за грибы). *** Условные ставки платы: для древесной зелени (ветви, хвоя и листья) — 11.66 руб./т (как за лапы хвойных пород); для крупных сучьев — 4110 и 822 руб./м³ соответственно на участках абразии и затопления (как для древесных ресурсов); для коры — 2.78 руб./т или 2.0 руб./м³ (в пересчете для средней удельной плотности коры сосны и березы — 0.72 г/см³).

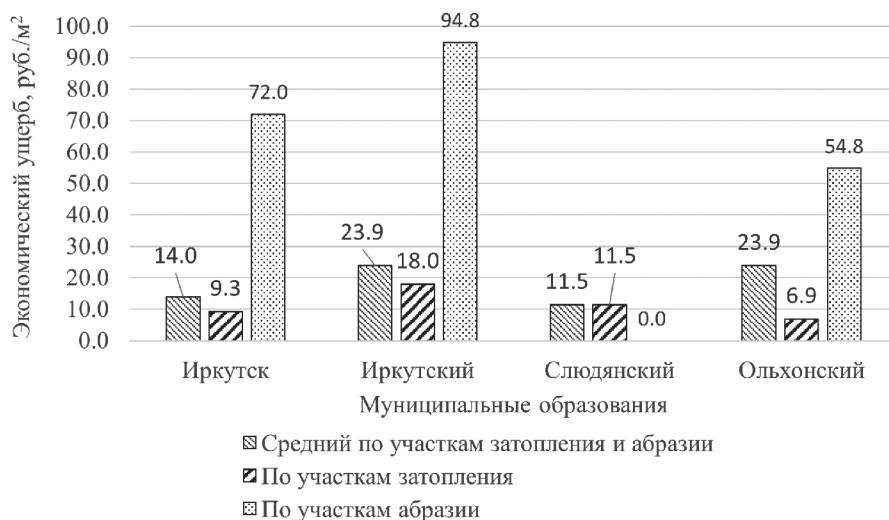
испытывающий переувлажнение лишь в отдельные годы — в результате значительного повышения уровней воды в водоемах. Здесь развиты вторичные сукцессии, которые выражаются в зарастании древесной растительностью ранее переувлажненных (заболоченных) земель.

Леса на абразионных участках занимают 94795.8 м² или 6.5% от общей площади всех лесов на территории исследования, а запас древесины составляет 1489.8 м³. В составе древостоев на абразионных побережьях водохранилища пре-

обладают мелколиственные (*Betula pendula* Roth, *Populus tremula* L.) с сосной (*Pinus sylvestris* L.), а на западных побережьях озера — лиственница (*Larix sibirica* Ledeb., *L. czekanowskii* Szafer) и сосна (*Pinus sylvestris* L.). ПЭУ от потери всех видов лесных ресурсов здесь — 6919578.7 руб. или 27.1% от всего ущерба на исследуемой территории. Леса на абразионных участках, которые в большей части сложены рыхлыми кайнозойскими отложениями, подвержены значительным рискам гибели. Почти катастрофический

Таблица 2. Распределение лесопокрытой площади и ПЭУ по муниципальным образованиям на участках затопления и абразии

Муниципальное образование	Лесопокрытая площадь, м ²			Запас древесины, м ³			ПЭУ, руб.		
	Абразия	Затопление	Всего	Абразия	Затопление	Всего	Абразия	Затопление	Всего
г. Иркутск	319.5	3957.7	4277.2	5.0	37.8	42.8	23017.0	36696.8	59713.7
Иркутский район	42914.7	520766.4	563681.1	874.4	9465.4	10339.8	4070261.3	9373714.8	13443976.2
Слюдянский район	0.0	749621.5	749621.5	0.0	8880.4	8880.4	0.0	8605723.9	8605723.9
Ольхонский район	51561.6	94086.5	145648.1	610.4	650.2	1260.6	2826300.4	652352.1	3478652.5
Итого	94795.8	1368432.1	1463227.9	1489.7	19033.9	20523.6	6919578.7	18668487.5	25588066.3

**Рис. 1.** Распределение удельных показателей прямого экономического ущерба по участкам затопления и абразии в муниципальных образованиях городского и районного уровней, руб./м².

характер приобрели эти процессы на побережьях Иркутского водохранилища, где ежегодно безвозвратно из хозяйственного оборота выводятся значительные площади земельного фонда.

Доли лесопокрытой площади и ПЭУ на участках затопления и абразии по категориям земель распределены следующим образом: на земли лесного фонда приходится соответственно 63.7 и 62.3%, на земли с неопределенной категорией — 21.6 и 20.8, населенных пунктов — 7.2 и 5.2, ООПТ — 5.6 и 10.3, сельскохозяйственного назначения — 1.6 и 1.2, промышленности — 0.3 и 0.2%. При этом в Слюдянском районе доли лесопокрытой площади и ПЭУ от общих их значений на исследуемой территории занимают соответственно 51.2 и 33.6%, в Иркутском — 38.5 и 52.5, Ольхонском — 10.0 и 13.7, в г. Иркутске — 0.3 и 0.2 (см. табл. 2). Наиболее значительна площадь лесов, находящихся на участках негативного воздействия вод, — на южных побережьях Байкала (Слюдянский район). Однако максимальный ПЭУ может быть достигнут на побережьях Иркутского водохранилища (Иркутского район) за счет более высокой лесистости и наличия высокопродуктивных древостоев, часть которых находится на абразионных участ-

ках, где удельная величина ущерба на единицу лесопокрытой площади значительно выше, чем на участках затопления, за счет потенциальной безвозвратной гибели лесов (рис. 1).

Распределение площади лесов и ПЭУ по высотным ступеням потенциального подъема воды, проведенных через 10 см высоты сечения рельефа (табл. 3), показало тенденцию увеличения их значений с увеличением абсолютной высоты участка, что говорит об ослаблении негативного влияния вод на леса и, как следствие, — улучшении лесорастительных условий, влияющих на увеличение таксационных показателей леса — бонитета, полноты, запаса древесины, а также биологического разнообразия. Эта тенденция особенно выражена для побережий Иркутского водохранилища, где от абсолютной отметки 457.0 м через каждые 10 см высоты сечения рельефа площадь лесов увеличивается на 5603.1–7344.7 м², или на 0.9–1.2%, а ПЭУ — на 85879.2–125512.1 руб. или на 0.6–0.9% — соответственно от общих (суммарных) значений их площади и ущерба на побережьях водохранилища.

Для побережий оз. Байкал тенденция устойчивого увеличения площади лесов с абсолютной

Таблица 3. Распределение лесопокрытой площади лесов и ПЭУ по уровням подъема воды

Побережья Байкала									
Уровень подъема воды, м	457.0–457.1	457.1–457.2	457.2–457.3	457.3–457.4	457.4–457.5	457.5–457.6	457.6–457.7	457.7–457.8	457.8–457.85
Площадь леса, м ²	66475.2	80143.3	87135.1	112719.3	108481.0	113753.5	103965.0	96374.5	96730.4
Доля от общей площади лесов, %	7.7	9.2	10.1	13.0	12.5	13.1	12.0	11.1	11.2
Ущерб, руб.	826998.7	986623.1	1106397.4	1435049.5	1447152.0	1512392.4	1555058.0	1397567.7	1378486.6
Доля от общего экономического ущерба, %	7.1	8.5	9.5	12.3	12.4	13.0	13.4	12.0	11.8
Побережья Иркутского водохранилища									
Уровень подъема воды, м	456.9–457.0	457.0–457.1	457.1–457.2	457.2–457.3	457.3–457.4	457.4–457.5	457.5–457.6	457.6–457.7	457.7–457.85
Площадь леса, м ²	39659.1	45262.2	52373.5	59600.0	66749.9	74094.6	80521.4	86644.2	92545.4
Доля от общей площади лесов, %	6.6	7.6	8.8	10.0	11.2	12.4	13.5	14.5	15.5
Ущерб, руб.	1094530.8	1189028.7	1311936.4	1437448.5	1561239.3	1686719.6	1793993.8	1890782.2	1976661.4
Доля от общего экономического ущерба, %	7.9	8.5	9.4	10.3	11.2	12.1	12.9	13.6	14.2

высотой местности прослеживается до отметки 457.4 м, затем наблюдается неустойчивое снижение площади лесов с некоторым увеличением на отметках 457.6 м и 457.85 м. ПЭУ при этом последовательно увеличивается до отметки 457.7 м и только после нее переходит к снижению. Отмеченную тенденцию снижения площади лесов от названной отметки для побережий Байкала можно связать с развитием остепненных (Ольхонский район) или заболоченных комплексов. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена, отражающий указанные выше зависимости увеличения площади лесов и ПЭУ от высоты местности, является очень высоким и составляет для Иркутского водохранилища 1.0, для оз. Байкал — 0.93.

Очевидно, что чем выше абсолютная высота участка, тем меньше вероятность развития негативных водных процессов. Таким образом, следует ожидать, что ущербы, возможные при превышении максимального за историю наблюдений уровня (457.39 м), будут возможны только при развитии самых неблагоприятных климатических условий и формировании экстремальной водности притоков. Однако следует признать, что за счет физических связей водоемов с рыхлыми грунтами побережий, даже при меньших уровнях поднятия вод будет наблюдаться их негативное воздействие на лесную растительность за счет развития переувлажнения и заболоченности, абразионно-эрозионных процессов, влекущих за собой размыв и уничтожение земель побережий.

Созданная в геоинформационной среде база данных по лесопокрытым участкам на землях,

подверженным процессам затопления и абразии, содержит по каждому из них кадастровый номер, функциональную категорию, разрешенное использование земельного участка, на котором расположен лес, а также площадь, таксационные показатели (породный и возрастной состав, полнота, бонитет, запас сырораствующего леса на единицу лесопокрытой площади), объемы лесных ресурсов в разрезе их видов (древесных, недравесных, пищевых и лекарственных растений), а также суммарный ПЭУ по всем имеющимся на участке видам лесных ресурсов. Площадь и ПЭУ также рассчитаны по ЦМР, ее 10-сантиметровым высотным уровням потенциального подъема воды по каждому лесопокрытому участку.

В качестве примера приведен фрагмент карты (рис. 2, табл. 4), отображающий часть Слюдянского района, которая в лесорастительном отношении является типичной для большей части исследуемой территории. Кроме того, он демонстрирует уровни, находящиеся ниже 457.0 м, которые не учитываются при расчете ПЭУ, однако важны для понимания общей картины распределения на побережье высотных уровней и земель, покрытых лесом. Кроме того, из рисунка видно, что основная часть лесопокрытых земель находится на отметках выше 457.2 м. Аналогичная ситуация характерна для всех остальных исследуемых побережий. Распределение ПЭУ по видам лесных ресурсов (табл. 5) показало, что более 80% от общего значения ПЭУ занимают ущербы от потенциальной гибели и повреждений древесных ресурсов,

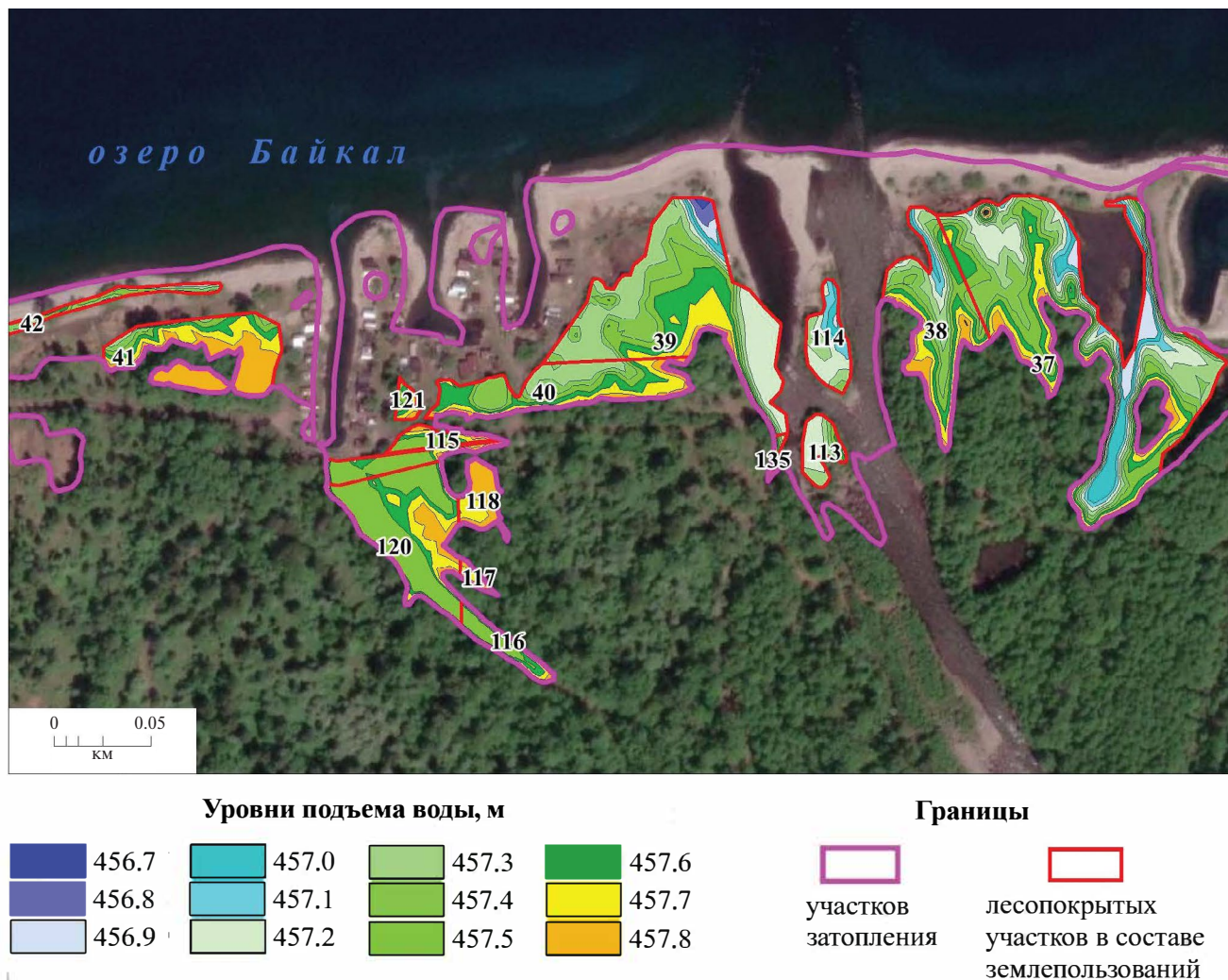


Рис. 2. Фрагмент карты “Уровни потенциального подъема воды в границах участков негативного воздействия вод (на примере части Слюдянского района Иркутской области)”.

менее 20% приходится на прочие ресурсы леса (пищевые, недревесные и лекарственные).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определено, что рассчитанные величины ПЭУ на участках негативного воздействия вод, зависят от многих факторов: площади лесопокрытого участка, его лесотаксационных характеристик, вида негативного воздействия вод на леса, оцениваемых видов лесных ресурсов. Результаты исследования показали, что наибольший вклад в общий ПЭУ вносит ущерб в результате гибели или повреждений древесных ресурсов. Наибольший ПЭУ от потенциальной гибели или повреждения лесов в целом отмечен на затопляемых землях, однако удельный размер его на единицу лесопокрытой площади максимальных значений достигает на абразионных участках за счет значительных рисков безвозвратной гибели лесов. Наибольшая площадь лесов на участках негативного воздействия вод находится в Слюдянском районе, однако мак-

симальный ущерб может быть достигнут в Иркутском районе за счет значительной площади произрастающих здесь лесов с высокими таксационными характеристиками.

Рассчитанные по 10-сантиметровым высотным уровням побережий оз. Байкал и Иркутского водохранилища значения площади лесопокрытых земель и ПЭУ, показали высокую положительную корреляционную связь между ними и абсолютной высотой участка за счет ослабления с высотой негативного влияния вод.

Проведенная работа в значительной степени носит методический характер и основывается на действующем лесном законодательстве. Однако применение его показало необходимость внесения ряда изменений, например, в размеры ставок платы за единицу объема лесных ресурсов, которые в настоящее время являются крайне низкими, а также дополнения перечня видов лесных ресурсов новыми категориями с разработкой для них соответствующих такс. Стала очевидной необходимость разработки дополнительных методик по оценке продуктивности

Таблица 4. ПЭУ по уровням подъема воды на лесопокрытых участках в границах землепользований

Номер участка	Кadaстровый номер землепользования*	Категория земель*	Разрешенное использование**	Запас древесины, м ³	Уровень подъема воды, м									
					457.0–457.1	457.0–457.2	457.0–457.3	457.0–457.4	457.0–457.5	457.0–457.6	457.0–457.7	457.0–457.8	457.0–457.85	
ПЭУ, руб.														
37	38:25:000000:1684	ЗНП	РН; ОТ	213.5	14759.9	25623.5	51093.6	81447.7	111501.2	143129.0	168717.0	187510.1	203156.2	
38	38:25:020103:0	—***	—	27.7	650.7	1684.2	3253.1	6568.4	11201.7	15444.1	19708.4	23217.9	27003.3	
39	38:25:020102:354	ЗНП	ОЭЗ ТРТ	64.6	828.6	1438.9	11341.6	26658.9	36772.6	45122.0	54001.1	59272.3	60933.1	
40	38:25:020102:4917	ЗНП	ОРН ОЭЗ	39.1	0.0	0.0	0.0	6086.5	13761.2	18028.0	25855.7	32120.4	37332.2	
41	38:25:020102:4917	ЗНП	ОРН ОЭЗ	22.8	0.0	0.0	0.0	371.1	1324.9	3051.4	5893.4	10310.8	22235.7	
42	38:25:020102:4918	ЗНП	ОРН ОЭЗ	7.8	0.0	102.7	364.6	3088.6	4904.0	6881.3	7612.0	7612.0	7612.0	
113	38:25:020103:0	—	—	2.7	0.0	0.0	1338.7	2063.8	2255.6	2452.1	2593.9	2626.8	2626.8	
114	38:25:020103:0	—	—	4.2	519.1	1344.1	2954.9	4013.7	4186.3	4186.3	4186.3	4186.3	4186.3	
115	38:25:020102:354	ЗНП	ОРН ОЭЗ	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2430.4	3374.5	4297.0	5264.0	
116	38:25:020102:5059	ЗНП	ОРН ОЭЗ	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3286.1	4738.8	5981.5	7192.8	
117	38:25:020102:5059	ЗНП	ОРН ОЭЗ	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	573.8	1673.3	
118	38:25:020102:5059	ЗНП	ОРН ОЭЗ	8.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.3	1994.3	7833.2	
119	38:25:020102:4917	ЗНП	ОРН ОЭЗ	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6319.3	7276.0	8055.6	9227.1	
120	38:25:020102:5039	ЗНП	ОРН ОЭЗ	41.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22428.5	28558.4	34462.6	39908.2	
121	38:25:020102:4917	ЗНП	ОРН ОЭЗ	1.6	0.0	0.0	0.0	2.6	72.2	501.3	937.0	1384.8	1567.3	
135	38:25:020102:4918	ЗНП	—	0.7	0.0	0.0	0.0	29.4	111.8	171.7	252.1	357.9	726.3	

Примечания. *Категории земель даны в соответствии с открытыми данными публичной кадастровой карты. Категория земель: ЗНП — земли населенных пунктов. **Разрешенное использование: РН ОТ — для рекреационного назначения, территории отдыха и туризма; ОЭЗ ТРТ — под особую экономическую зону туристско-рекреационного типа; ОРН ОЭЗ — для размещения объектов рекреационного назначения под особую экономическую зону туристско-рекреационного типа. ***Категории земель и (или) разрешенное использование по данным публичной кадастровой карты не определены.

¹ <https://egrp365.org/map/> (дата обращения 25.05.2024).

Таблица 5. Распределение ПЭУ на лесопокрытых участках по видам лесных ресурсов

Номер участка	Площадь лесопокрытая, м ²	ПЭУ всего, руб.	ПЭУ по видам лесных ресурсов, руб.											
			Древесина	Мелопродук- тивность	Березовый сок	Кедровые орехи	Ягоды	Грибы	Папоротник	Лекарственные растения	Лесная подстилка	Древесная зелень	Сучья	Кора
37	8539.6	203156.2	175489.2	26.6	1325.3	586.9	391.7	71.0	0.0	1353.2	4188.4	309.5	19303.8	110.6
38	2773.1	27003.3	22794.6	11.7	830.0	32.3	0.0	23.1	0.0	0.0	741.4	48.6	2507.4	14.4
39	5870.2	60933.1	53078.3	69.5	455.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1313.4	144.3	5838.6	33.4
40	2442.5	37332.2	32123.2	674.3	135.4	0.0	0.0	20.3	0.0	0.0	759.1	66.1	3533.6	20.2
41	2283.5	22235.7	18770.0	9.6	683.4	26.6	0.0	19.0	0.0	0.0	610.5	40.0	2064.7	11.8
42	781.7	7612.0	6425.6	3.3	234.0	9.1	0.0	6.5	0.0	0.0	209.0	13.7	706.8	4.0
113	530.0	2626.8	2178.4	8.3	73.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	118.1	7.6	239.6	1.4
114	844.7	4186.3	3471.6	13.3	117.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	188.1	12.1	381.9	2.2
115	392.3	5264.0	4514.8	1.5	104.4	8.9	0.0	3.3	0.0	0.0	122.4	9.3	496.6	2.8
116	536.1	7192.8	6169.0	2.1	142.6	12.2	0.0	4.5	0.0	0.0	167.2	12.7	678.6	3.9
117	124.7	1673.3	1435.1	0.5	33.2	2.8	0.0	1.0	0.0	0.0	38.9	3.0	157.9	0.9
118	583.8	7833.2	6718.3	2.3	155.3	13.3	0.0	4.9	0.0	0.0	182.1	13.8	739.0	4.2
119	687.7	9227.1	7913.8	2.7	183.0	15.6	0.0	5.7	0.0	0.0	214.5	16.3	870.5	5.0
120	2974.3	39908.2	34228.0	11.6	791.3	67.6	0.0	24.7	0.0	0.0	927.9	70.4	3765.1	21.6
121	180.4	1567.3	1334.5	0.5	40.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	40.2	2.9	146.8	0.8
135	64.9	726.3	586.6	37.1	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.4	1.3	64.5	0.4

видов лесных ресурсов в разрезе лесорастительных районов страны, а также новой методики по оценке экономических ущербов от вредного воздействия вод, которая бы в полной мере отвечала задачам комплексной оценки ущерба в отношении не только сырьевых, но и важнейших экологических характеристик леса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по темам НИР: “Цифровое атласное картографирование развития общества и природы регионов Северной и Северо-Восточной Азии” (№ АААА-А21-121012190063-2); “Оценка тенденций изменений природных и социально-хозяйственных систем прибрежных территорий Иркутской области при влиянии колебаний уровня озера Байкал” (№ 122010800014–7).

FUNDING

The work was carried out on the scientific topics: “Digital Atlas Mapping of the Development of Society and Nature in the Regions of North and North-East Asia” (no. АААА-А21-121012190063-2); “Assessment of Trends in Changes in Natural and Socio-Economic Systems of Coastal Areas of the Irkutsk Region under the Influence of Fluctuations in the level of Lake Baikal” (no. 122010800014–7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Байкал. Атлас. М.: Федер. служба геодезии и картографии России, 1993. 160 с.
- Бахтенко Е.Ю. Аутоэкологический подход к физиологическому ответу растительности к затоплению и засухе (регуляторные аспекты). Автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. Вологда, 2001. 38 с.
- Болгов М.В., Бубер А.Л., Коробкина Е.А. Водные ресурсы озера Байкал и возможные стратегии управления его уровенным режимом // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 89–102. <https://doi.org/35567/1999-4508-2017-3-6>
- Булко Н.И., Москаленко Н.В., Шабалева М.А., Машков И.А. Влияние избыточного увлажнения почв на фотосинтезирующую составляющую ассимиляционного аппарата древесных растений // Тр. Белорус. гос. технол. ун-та. 2013. № 1. С. 64–66.
- Гагаринова О.В., Заборцева Т.И. Исследование влияния колебаний уровня озера Байкал на прибрежные территории // Водные ресурсы. 2022. № 6. С. 59–69. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_6_4
- Гармаев Е.Ж., Цыренов Б.З. Уровенный режим озера Байкал: состояние и перспективы в новых условиях регламентации // Вестн. Бурятского гос. ун-та. Биология. География. 2019. № 4. С. 37–43.
- Горбачев В.Н., Бабинцева Р.М., Карпенко Л.В., Карпенко В.Д. Негативное влияние крупных водохрани-

- лиц на окружающую среду // Ульяновский медико-биологический журн. 2012. № 2. С. 7–16.
- Денисов А.К., Незабудкин Г.Н., Смирнов В.Н. О влиянии подтопления на состояние лесных насаждений // Сб. тр. Поволжск. лесотехн. ин-та. 1958. № 53. 19 с.
- Дьяконов К.Н. Влияние крупных равнинных водохранилищ на леса прибрежной зоны. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. 128 с.
- Дьяконов К.Н., Ретеюм А.Ю. Влияние Камского водохранилища на леса прибрежной зоны // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1967. № 4. С. 67–75.
- Касимов Д.В., Касимов В.Д. Некоторые подходы к оценке экосистемных функций (услуг) лесных насаждений в практике природопользования. М.: Мир науки, 2015. 91 с.
- Козырева Е.А., Кадетова А.В., Рыбченко А.А., Пеллинен В.А., Светлаков А.А., Тарасова Ю.С. Типизация и современное состояние берегов озера Байкал // Водные ресурсы. 2020. Т. 4. № 4. С. 453–465.
- Краткий словарь основных лесоводственно-экономических терминов / В.В. Острошенко. Уссурийск: РИО Приморской ГСХА, 2005. 161 с.
- Лесохозяйственный регламент Иркутского лесничества Иркутской области // “Областная”. 2018. № 120. 26 октября 2018 г.
- Лесохозяйственный регламент Таштыпского лесничества Республики Хакасия. Красноярск, 2013. 180 с.
- Методика оценки вероятностного ущерба от вредного воздействия вод и оценки эффективности осуществления превентивных водохозяйственных мероприятий. М.: ФГУП “ВИЭМС”, 2006. 97 с.
- Орлов И.И., Рябчук В.П. Березовый сок. М.: Лесная промышленность, 1982. 566 с.
- Основные положения организации и развития лесного хозяйства Иркутской области. Иркутск: Прибайкальское лесоустроительное предприятие, 1980. 506 с.
- Оценки экономических ущербов в связи с изменением уровня озера Байкал. Ч. 1 / отв. ред. А.К. Тулохонов / Гидроэнергетика и Байкал. В 2-х частях. СО РАН. Байкальский институт рационального природопользования. Региональная научно-техническая программа “Сибирь”. Улан-Удэ, 1996. 55 с.
- Пономарев А.В. Эколого-ценотическая проиуроченность и продуктивность папоротника орляка сонового *Pteridium pinetorum* С.Н. Page et R.R. Mill на юге Приенисейской Сибири. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2013. 21 с.
- Потемкина Т.Г. Литодинамика прибрежной зоны озера Байкал. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск, 2000. 17 с.
- Природа. Техника. Геотехнические системы / отв. ред. В.С. Преображенский. М.: Наука, 1975. 146 с.
- Растительность юга Восточной Сибири (карта масштаба 1 : 500000). М.: ГУГК, 1972. 4 л.
- Решетникова Т.В. Формирование органического вещества почвы в культурах основных лесообразующих пород Сибири. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2015. 16 с.
- Сизых А.П. Трансформация и восстановление растительности в Прибайкалье // Изв. Иркутск. ун-та. Серия “Науки о Земле”. 2021. Т. 37. С. 86–102.
- Ступин В.П., Пластинин Л.А., Олзоев Б.Н. Морфодинамическое исследование и геоинформационное картографирование зоны влияния Иркутского водохранилища // Интерэкспо “ГЕО-Сибирь”. Иркутск, 2018. № 1. С. 221–229.
- Сулейманова Ж.Р., Спицына Н.Т. Влияние строительства гидротехнических сооружений на лесные экосистемы // Вестн. КрасГАУ. 2012. № 3. С. 114–119.
- Таксационный справочник по лесным ресурсам России (за исключением древесины) / Л.Е. Курлович, В.Н. Косицын. Пушкино: ВНИИЛМ, 2018. 282 с.
- Угрюмов Б.И., Даниленко О.К. Прогноз изменения древесной растительности под влиянием затопления ложа Богучанского водохранилища // Лесной вестн. 2007. № 4. С. 32–37.
- Филькин Т.Г. Состояние почвенно-растительного покрова в зоне подтопления Камским водохранилищем. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Пермь, 2011. 24 с.
- Чевердин Ю.И., Ахтямов А.Г., Сауткина М.Ю. Влияние режима уровня грунтовых вод на биопродуктивность древесных пород в лесных полосах Каменной Степи // Живые и биокосные системы. 2018. № 24.
<https://doi.org/10.18522/2308-9709-2018-24-3>
- Чепиного В.В. Разнообразие растительности Иркутской области с позиции флористической классификации: предварительный обзор классов // Изв. Иркутск. гос. ун-та. Серия “Биология. Экология”. 2015. Т. 12. С. 2–19.
- Шевцова Н.Е. Медоносные ресурсы Западного Забайкалья и перспективы их использования // Растительные ресурсы Забайкалья и их использование: сб. ст. Улан-Удэ: БФСО АН СССР, 1987. С. 62–82.
- Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 1. Услуги наземных экосистем / ред.-сост. Е.Н. Букварёва, Д.Г. Замолотчиков. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2016. 148 с.
<https://doi.org/10.31857/S0044459620060068>
- Armstrong W., Brandle R., Jackson M.B. Mechanisms of flood tolerance in plants // Acta Botanica Neerlandica. 1994. Vol. 43. P. 307–358.
<https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1994.tb00756.x>
- de Bello F., Mudrak O. Plant traits as indicators: Loss or gain of information? // Appl. Vegetation Sci. 2013. № 16. P. 353–354.
<https://doi.org/10.1111/avsc.12035>
- Garssen A.G., Baattrup-Pedersen A., Riis T., Raven B.M., rishtian Hoffman C.Ch., Verhoeven J.T.A., Soons M.B. Effects of increased flooding on riparian vegetation: Field experiments simulating climate change along five Eu-

- ropean lowland streams // *Global Change Biology*. 2017. Vol. 23. № 8. P. 3052–3063.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13687>
- Garssen A.G., Baattrup-Pedersen A., Voesenek L.A., Verhoeven J.T., Soons M.B. Riparian plant community responses to increased flooding: A meta-analysis // *Global Change Biology*. 2015. Vol. 21. № 8. P. 2881–2890.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12921>
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being. In: Synthesis Report. Washington: Island Press, 2005. 160 p.
- Ström L., Jansson R., Nilsson C., Johansson M.E., Xiong S. Hydrologic effects on riparian vegetation in a boreal River: An experiment testing climate change predictions // *Global Change Biology*. 2011. Vol. 17. P. 254–267.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02230.x>
- Violle C., Bonis A., Plantegenest M., Cudennec C., Damgaard C., Marion B., Bouzillé J.B. Plant functional traits capture species richness variations along a flooding gradient // *Oikos*. 2011. Vol. 120. P. 389–398.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18525.x>

Assessment of Economic Damage Caused by Negative Impact of Water on the Raw Material Potential of Forests on the Coasts of Lake Baikal and the Irkutsk Reservoir

E. L. Makarenko*

V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

*e-mail: elmakarenko@bk.ru

The purpose of the study is to analyze the current state of forest vegetation on the shores of the Irkutsk Reservoir and Lake Baikal, to calculate the direct economic damage as a result of possible direct losses of forests due to the negative impact of water on flooded and abrasion areas. The relevance of the study is determined by the need to minimize the damage to the coastal forests when water levels in the reservoirs change by introducing changes in the rules for the use of water resources, land use, forest management, etc. The main research methods were: geobotanical, forest taxation, geoinformation, expert, etc. The damage was determined in relation to the forest vegetation actually growing in 2022–2023, it is of a potential nature and does not reflect the damage from its death or damage in previous years. The calculation of damage was made in relation to wood resources, tree greens, bark, forest litter, mushrooms, berries, nuts, birch sap, medicinal plants, etc. To calculate it, standard payment rates per unit volume of forest resources were used. In turn, the determination of the volume of forest resources was based on indicators of biological productivity calculated using regional methods. The study made it possible to determine and map the distribution of forested areas within land categories and individual land uses, the qualitative characteristics of forests, and the economic damage by forest resource types at potential water rise levels. Among the municipalities, the highest values of economic damage were noted in the Irkutsk district due to the high taxation characteristics of forests, mostly located on the abrasion banks of the Irkutsk Reservoir. The quantitative parameters of the trend toward an increase in forest area and economic damage were determined depending on the increase in the absolute altitude of the terrain. This trend is especially pronounced for the coasts of the Irkutsk Reservoir, where from an altitude of 457.0 m to 457.85 m, for every 10 cm of relief cross-section height, the forest area increases by 5603.1–7344.7 m², and the economic damage increases by RUB 85879.2–125512.1. For the shores of Lake Baikal, the trend of a steady increase in these indicators is disrupted after the 457.4 m mark, which is associated with the peculiarities of the geomorphological structure of the lake shores and the specific development of steppe (Olkhon region) and swampy forest vegetation complexes.

Keywords: flooding, abrasion, waterlogging, forest productivity, land categories, timber forest resources, non-timber forest resources, food forest resources

REFERENCES

- Armstrong W., Brandle R., Jackson M.B. Mechanisms of flood tolerance in plants. *Acta Bot. Neerl.*, 1994, vol. 43, pp. 307–358.
<https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1994.tb00756.x>
- Bakhtenko E.Yu. Autoecological approach to the physiological response of vegetation to flooding and drought (regulatory aspects). *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Vologda, 2001. 38 p.
- Baikal. Atlas* [Baikal. Atlas]. Moscow: Fed. Sluzhba Geodezii i Kartografii Rossii, 1993, 160 p.
- de Bello F., Mudrak O. Plant traits as indicators: Loss or gain of information? *Appl. Veg. Sci.*, 2013, no. 16, pp. 353–354.
<https://doi.org/10.1111/avsc.12035>
- Bolgov M.V., Buber A.L., Korobkina E.A. Water resources of Lake Baikal and possible strategies for managing its level regime. *Vodn. Khoz. Rossii*, 2017, no. 3, pp. 89–102. (In Russ.).
<https://doi.org/35567/1999-4508-2017-3-6>

- Bulko N.I., Moskalenko N.V., Shabaleva M.A., Mashkov I.A. The influence of excessive soil moisture on the photosynthetic component of the assimilation apparatus of woody plants. *Tr. Belarus. Gos. Tekhnol. Univ.*, 2013, no. 1, pp. 64–66. (In Russ.).
- Chepinoga V.V. Vegetation diversity of the Irkutsk region from the position of floristic classification: A preliminary review of classes. *Izv. Irkutsk. Gos. Univ., Ser. Biol. Ekol.*, 2015, vol. 12, pp. 2–19. (In Russ.).
- Cheverdin Yu.I., Akhtyamov A.G., Sautkina M.Yu. Influence of groundwater level regime on the bioproductivity of tree species in the forest belts of the Kamenaya Steppe. *Zhiv. Biokos. Sist.*, 2018, no. 24. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18522/2308-9709-2018-24-3>
- Ecosystem Services of Russia: Prototype of the National Report. T. 1. Terrestrial ecosystem services. Bukhareva E.N., Zamolodchikov D.G., Eds. Moscow: Izd-vo Tsentra Okhrany Dikoi Prirody, 2016. 148 p.
<https://doi.org/10.31857/S0044459620060068>
- Filkin T.G. The state of the soil and vegetation cover in the zone of flooding by the Kama reservoir. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Perm, 2011. 24 p.
- Gagarinova O.V., Zabortseva T.I. A Study of the Lake Baikal level fluctuations on coastal territories). *Vodn. Resur.*, 2022, no. 6, pp. 59–69. (In Russ.).
https://doi.org/10.35567/19994508_2022_6_4
- Garmayev E.Zh., Tsyrenov B.Z. Level regime of Lake Baikal: state and prospects in the new conditions of regulation. *Vestn. Buryat. Gos. Univ.: Biol. Geogr.*, 2019, no. 4, pp. 37–43. (In Russ.).
- Garssen A.G., Baatrup-Pedersen A., Riis T., Raven B.M., Hoffman C.Ch., Verhoeven J.T. A., Soons M.B. Effects of increased flooding on riparian vegetation: Field experiments simulating climate change along five European lowland streams. *Glob. Change Biol.*, 2017, vol. 23, no. 8, pp. 3052–3063.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13687>
- Garssen A.G., Baatrup-Pedersen A., Voeselek L.A., Verhoeven, J. T., Soons M.B. Riparian plant community responses to increased flooding: A meta-analysis. *Glob. Change Biol.*, 2015, vol. 21, no. 8, pp. 2881–2890.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12921>
- Gidroenergetika i Baykal. Ch. 1: Otsenki ekonomicheskikh ushcherbov v svyazi s izmeneniyem urovnya ozera Baikal* [Hydropower and Baikal. Part 1: Estimates of Economic Damage due to Changes in the Level of Lake Baikal]. Tulokhonov A.K., Ed. Ulan-Ude: Baykal. Inst. Ratsional'. Prirodopol'zov., 1996. 55 p.
- Gorbachev V.N., Babintseva R.M., Karpenko L.V., Karpenko V.D. Negative impact of large reservoirs on the environment. *Ul'yanov. Mediko-Biol. Zh.*, 2012, no. 2, pp. 7–16. (In Russ.).
- Denisov A.K., Nezabudkin G.N., Smirnov V.N. On the influence of flooding on the condition of forest plantations. In *Sb. tr. Povolzhsk. lesotekhn. in-ta. Vyp. 53* [Collection of Works of the Volga State University. Vol. 53], 1958. 19 p. (In Russ.).
- Dyakonov K.N. *Vliyanie krupnykh ravninnykh vodokhranilishch na lesa pribrezhnoi zony* [The Influence of Large Lowland Reservoirs on the Forests of the Coastal Zone]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975. 128 p.
- Dyakonov K.N., Reteyum A.Yu. The influence of the Kama Reservoir on forests in the coastal zone. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1967, no. 4, pp. 67–75. (In Russ.).
- Kasimov D.V., Kasimov V.D. *Nekotorye podkhody k otsenke ekosistemnykh funktsii (uslug) lesnykh nasazhdeniy v praktike prirodopol'zovaniya* [Some Approaches to Assessing Ecosystem Functions (Services) of Forest Plantations in Environmental Management Practice]. Moscow: Mir nauki Publ., 2015. 91 p.
- Kozyreva E.A., Kadetova A.V., Rybchenko A.A., Pelling V.A., Svetlakov A.A. Typification and the current state of Baikal Lake shore. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, pp. 651–662.
<https://doi.org/10.1134/S0097807820040077>
- Kratkii slovar' osnovnykh lesovodstvenno-ekonomicheskikh terminov* [A Brief Dictionary of Basic Forestry and Economic Terms]. Ostroshenko V.V., Ed. Ussuriysk: Izd-vo Primor. Gos. Sel'skokhoz. Akad., 2005. 161 p.
- Lesokhozyaystvennyi reglament Irkutskogo lesnichestva Irkutskoi oblasti. Vyp. 120* [Forestry Regulations of the Irkutsk Forestry of the Irkutsk Region. Vol. 120]. Irkutsk: Oblastnaya Publ., 2018.
- Lesokhozyaystvennyi reglament Tashtypskogo lesnichestva Respubliki Khakasiya* [Forestry Regulations of the Tashtyp Forestry of the Republic of Khakassia]. Krasnoyarsk, 2013. 180 p.
- Metodika otsenki veroyatnostnogo ushcherba ot vrednogo vozdeystviya vod i otsenki effektivnosti osushchestvleniya preventivnykh vodokhozyaystvennykh meropriyatiy* [Methodology for Assessing the Probable Damage from the Harmful Effects of Water and Assessing the Effectiveness of the Implementation of Preventive Water Management Measures]. Moscow: FGUP "VIEMS", 2006. 97 p.
- Millennium ecosystem assessment. Ecosystems and human well-being. In *Synthesis Report*. Washington: Island Press, 2005. 160 p.
- Orlov I.I., Ryabchuk V.P. *Berezovyi sok* [Birch Sap]. Moscow: Lesnaya promyshlennost'. Publ., 1982. 566 p.
- Osnovnye polozheniya organizatsii i razvitiya lesnogo khozyaystva Irkutskoi oblasti* [Basic Provisions for the Organization and Development of Forestry in the Irkutsk Region]. Irkutsk: Pribaikal. Lesoustroitel'noe Predpr., 1980. 506 p.
- Ponomarev A.V. Ecological and cenotic confinement and productivity of the pine bracken fern *Pteridium pinetorum* C.N. Page et R.R. Mill in the south of the Yenisei Siberia. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Krasnoyarsk, 2013. 21 p.
- Potemkina T.G. Lithodynamics of the coastal zone of Lake Baikal. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*: 11.00.04. Irkutsk, 2000. 17 p.

- Priroda. Tekhnika. Geotekhnicheskie sistemy* [Nature. Technique. Geotechnical Systems]. Preobrazhenskii V.S., Ed. Moscow: Nauka Publ., 1975. 146 p.
- Rastitel'nost' yuga Vostochnoi Sibiri (karta masshtaba 1:500000)* [Vegetation of the South of Eastern Siberia (Scale 1:500000)]. Moscow: GUGK, 1972. 4 p.
- Reshetnikova T.V. Formation of soil organic matter in the cultures of the main forest-forming species of Siberia. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Krasnoyarsk, 2015. 16 p.
- Shevtsova N.E. Honey resources of Western Transbaikalia and prospects for their use. In *Rastitel'nye resursy Zabaikal'ya i ikh ispol'zovanie* [Plant Resources of Transbaikalia and Their Use]. Ulan-Ude: BFSO AN SSSR, 1987, pp. 62–82. (In Russ.).
- Sizykh A.P. Transformation and restoration of vegetation in the Baikal region. *Izv. Irkut. Univ., Ser. Nauki Zemle*, 2021, vol. 37, pp. 86–102. (In Russ.).
- Ström L., Jansson R., Nilsson C., Mats E.J., Xiong S. Hydrologic effects on riparian vegetation in a boreal River: An experiment testing climate change predictions. *Glob. Change Biol.*, 2011, vol. 17, pp. 254–267. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02230.x>
- Stupin V.P., Plastinin L.A., Olzoev B.N. Morphodynamic study and geoinformation mapping of the zone of influence of the Irkutsk reservoir. In *Interekspo "GEO-Sibir"*. No. 1 [Interekspo "GEO-Siberia". No. 1]. Irkutsk, 2018, pp. 221–229. (In Russ.).
- Suleimanova Zh.R., Spitsyna N.T. Influence of the construction of hydraulic structures on forest ecosystems. *Vestn. KrasGAU., Ser. Ekol.*, 2012, no. 3, pp. 114–119. (In Russ.).
- Taksatsionnyi spravochnik po lesnym resursam Rossii (za isklucheniym drevesiny)* [Taxation Reference Book on Forest Resources of Russia (Except for Wood)]. Kurlovich L.E., Kositsyn V.N., Eds. Pushkino: VNIILM, 2018. 281 p.
- Ugryumov B.I., Danilenko O.K. Forecast of changes in tree vegetation under the influence of flooding of the bed of the Boguchansky reservoir. *Lesn. Vestn.*, 2007, no. 4, pp. 32–37. (In Russ.).
- Violle C., Bonis A., Plantegenest M., Cudennec C., Damgaard C., Marion B., Bouzillé J.B. Plant functional traits capture species richness variations along a flooding gradient. *Oikos*, 2011, vol. 120, pp. 389–398. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18525.x>