

ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

19(2)' 2026

Москва, Издательство РГАУ-МСХА

Moscow,
Publishing house of Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy



ISSN 1997-6011

ПРИРОДООБУСТРОЙСТВО

Научно-практический журнал

2026; Том 19, № 2

Учредитель и издатель:**ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева**Адрес учредителя и издателя:
127434, Российская Федерация,
г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых
коммуникаций**Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-58566 от 14 июля 2014 г.**Журнал включен в перечень изданий,
рекомендованных ВАК РФ
для публикации трудов соискателей
ученых степеней кандидата и доктора наук
**Издание включено в систему РИНЦ,
CrossRef, AGRIS (Agricultural
Research Information System),
КиберЛенинка (Open Science)**Полнотекстовые версии доступны на сайте
<http://elibrary.ru>
<https://environment.timacad.ru/jour>Редактор *В.И. Марковская*
Компьютерный набор и верстка –
А.С. Лаврова
Перевод на английский язык –
В.Г. Рябчикова
Ответственный за выпуск –
*Н.Я. Филатова*Адрес редакции: 127434, Москва,
Приишниковая ул., 14, строение 7-7А
Тел.: 8 (499) 976-36-67
Email: pririodamgur@mail.ru
Сайт: environment.elpub.ruОтпечатано в типографии
ООО «Офсет Принт»
127550, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 39, корп. 1
Тел: 8 (499) 976-24-85,
8 (916) 503-02-43Подписано в печать 26.05.26 г.
Формат 60 84/8, Тираж 500 экз.При использовании
материалов журнала в любой форме
ссылка на журнал обязательна.© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, 2026**Главный научный редактор****Журавлева Л.А.**, д-р техн. наук, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Заместитель научного редактора****Бенин Д.М.**, канд. техн. наук, доцент, член-кор.
Российской академии водохозяйственных наук
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Члены редакционного совета****Алексеев А.С.**, д-р. геогр. наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет имени С.М. Кирова,
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)**Балабанов В.И.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Безбородов Ю.Г.**, д-р. техн. наук, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Брянская Ю.В.**, д-р. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет» (г. Москва, Российская Федерация)**Волосухин В.А.**, д-р. техн. наук, профессор
Академия безопасности гидротехнических сооружений
(г. Новочеркасск, Российская Федерация)**Дубенок Н.Н.**, д-р. с.-х. наук, профессор, академик РАН
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Исмаилов Г.Х.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Кентбаев Е.Ж.**, д-р. с.-х. наук, профессор, Академик КазНАЕН
НАО «Казахский национальный исследовательский университет»
(г. Алматы, Республика Казахстан)**Кирейчева Л.В.**, д-р. техн. наук, профессор
ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова (г. Москва, Российская Федерация)**Косиченко Ю.М.**, д. техн. наук, профессор
ФГБНУ РосНИИПМ (г. Новочеркасск, Российская Федерация)**Лисичкин С.Е.**, д-р. техн. наук, с.н.с.
Филиал АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» (Москва, Российская Федерация)**Лихацевич А.П.**, д-р. техн. наук, член-кор. Академии Наук Белоруссии
Республиканское научное дочернее унитарное предприятие «Институт мелиорации»
(г. Минск, Республика Беларусь)**Матвеев С.М.**, д-р. биол. наук, профессор
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова
(г. Воронеж, Российская Федерация)**Мирзаев Б.С.**, д-р техн. наук, профессор
НИУ «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
(Ташкент, Узбекистан)**Михеев П.А.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Ольгаренко Г.В.**, д-р. с.-х. наук, профессор, член-корреспондент РАН
ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения
и сельхозводоснабжения Радуга (г. Коломна, Российская Федерация)**Попов И.И.**, PhD, доцент
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Пчелкин В.В.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Раткович Л.Д.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Рубин О.Д.**, д-р. техн. наук, профессор
АО «Институт Гидропроект» (Москва, Российская Федерация)**Ханов Н.В.**, д-р. техн. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Хлюстов В.К.**, д-р. с.-х. наук, профессор
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (г. Москва, Российская Федерация)**Худаев И.Ж.**, канд. техн. наук., доцент
НИУ «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»
(г. Ташкент, Узбекистан)**Шевченко В.А.**, д-р. с.-х. наук, профессор, академик РАН
ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова (г. Москва, Российская Федерация)**ПОДПИСКА:**электронный каталог «Пресса России» <https://www.pressa-ru/cat/1/edition/t80746/>**Цена подписная**



ISSN 1997-6011

PRIRODOOBUSTROJSTVO

Theoretical-practical journal

2026;19(2)

Founder and Publisher:**Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy**Address of Founder and Publisher:
49, Timiryazevskaya str., Moscow,
127434, Russian FederationThe journal is registered
by the Federal service for supervision
of communications, information technology
and mass media**Certificate of registration
PI No FS 77-58566 dated July 14, 2014**The journal is included in the list of publications
recommended by Higher Attestation Commission
of the Russian Federation for publishing papers
of those seeking PhD and DSc scientific degrees
**The issue is listed in the Russian Science
Citation Index, CrossRef,
AGRIS (Agricultural Research Information System),
Kiberleninka (Open Science)**Full versions are posted on the site
<http://elibrary.ru>
<https://environment.timacad.ru/jour>Editor *V.I. Markovskaya*Computer typesetting and makeup –
*A.S. Lavrova*Translation into English – *V.G. Ryabchikova*
Responsible for the issue of the journal –
*N.Ya. Filatova*Address of the editorial office:
building 7-7A, Pryanishnikova str., 14,
Moscow, 127434, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 976-36-67
Email: prirodangup@mail.ru
Website: environment.elpub.ruPrinted in typography
OOO "Offset Print"
127550, Moscow,
Dmitrovskoe shosse, 39, building 1
Tel.: +7 (499) 976-24-85,
+7 (916) 503-02-43Signed for print 26.05.26
Format 60 84/8, Circulation 500When using the materials of the journal
in any form reference to the journal is obligatory.© Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2026**Scientific editor-in-chief****Larisa A. Zhuravleva**, DSci. (Eng), Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Deputy scientific editor-in-chief****Dmitry M. Benin**, CSci. (Eng), Associate Professor, Corresponding Member
of the Russian Academy of Hydro Economic Sciences
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Members of the Editorial Board****Alexander S. Alekseev**, DSci. (Geogr), Professor
St. Petersburg state university named after S.M. Kirov (Saint-Petersburg, Russian Federation)**Victor I. Balabanov**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Yury G. Bezborodov**, DSci. (Eng), Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Yuliya V. Bryanskaya**, DSci. (Eng), Associate Professor
“National Research Moscow State University of Civil Engineering” (Moscow, Russian Federation)**Victor A. Volosukhin**, DSci. (Eng), Professor
Academy of safety of hydraulic structures (Novocherkassk, Russian Federation)**Nikolay N. Dubenok**, DSci. (Agr), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Gabil Kh. Ismailyov**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Erzhan Zh. Kentbaev**, DSci. (Agr), Professor, Academician of KazNAEN
NAO “Kazakh National Research University” (Almaty, Republic of Kazakhstan)**Lyudmila V. Kireycheva**, DSci. (Eng), Professor
Federal Research Center VNIIGiM named after A.N. Kostyakov (Moscow, Russian Federation)**Yury M. Kosichenko**, DSci. (Eng), Professor
FGBNU Russian Research Institute of Applied Mathematics (Novocherkassk, Russian Federation)**Sergey E. Lisichkin**, DSci. (Eng), Senior Researcher
Branch of JSC “Institute Hydroproject – “NIIES” (Moscow, Russian Federation)**Anatoly P. Likhatchevich**, DSci. (Eng),
Corresponding Member of the Academy of Sciences of Belarus
Republican scientific subsidiary unitary Enterprise “Institute of Land Reclamation”
(Minsk, Republic of Belarus)**Sergey M. Matveev**, DSci. (Bio), Professor
Voronezh state forestry engineering university named after G.F. Morozov (Voronezh, Russian Federation)**Bahadir S. Mirzaev**, DSci. (Eng), Professor
Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers (Tashkent, Uzbekistan)**Pavel A. Mikheev**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Gennadiy V. Olgarenko**, DSci. (Agr), Professor,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences
All-Russian research institute of irrigation and agricultural water supply systems Raduga
(Kolomna, Russian Federation)**Ivan I. Popov**, PhD, Associate Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Victor V. Pchelkin**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Lev D. Ratkovich**, Doctor of technical sciences, Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Oleg D. Rubin**, DSci. (Eng), Professor
Institute Hydroproject – “NIIES” (Moscow, Russian Federation)**Nartmir V. Khanov**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Vitaly K. Khlyustov**, DSci. (Eng), Professor
Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy
named after C.A. Timiryazev (Moscow, Russian Federation)**Ibrakhim Zh. Khudaev**, CSci. (Eng), Associate Professor
National Research University “Tashkent institute of irrigation
and agricultural mechanization engineers” (Tashkent, Uzbekistan)**Victor A. Shevchenko**, DSci. (Agr), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Federal Research Center VNIIGiM named after A.N. Kostyakov (Moscow, Russian Federation)

Содержание

Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Л.В. Кирейчева, Д.А. Рогачев, М.Н. Лытов Концептуальные положения создания высокотехнологичных систем орошения	6
С.В. Василенков Проблема мелиорации территорий при сценарии экологической защиты от радиоактивного загрязнения	16
Максимов С.А., Головинов Е.Э., Ичитегетсе И. Оценка влияния тенденций изменения климата на обоснование оросительных норм в условиях Республики Бурунди	24
О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов, А.С. Гузалов, А.В. Куриленко, Д.А. Москвичев Вынужденное зажигание торфяной почвы от выхлопных систем автомобилей при проведении сельскохозяйственных работ	31
И.В. Белов, Х.А. Абдулмажидов, М.А. Карапетян, С.К. Тойгамбаев Исследование состояния защитных конструкций каналов оросительных систем и их восстановление с применением оптимальных составов бетонных смесей	39
Р.В. Калининченко, А.Е. Беденко Влияние орошения на эвапотранспирацию и продуктивность кукурузы по данным дистанционного зондирования земли	48

Гидротехническое строительство

В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, И.Ю. Шалагин, А.А. Кадысева Технология аккумулирования энергии морских волн в виде жидкого воздуха, льда и горячей воды	55
Д.А. Колганов, М.Г. Загоруйко, Н.Ф. Рыжко, С.Н. Рыжко Энергосберегающая технология частотного регулирования оборотов насосов на подкачивающих станциях	64
О.Д. Рубин, А.В. Александров, Чжан Цзюньхао, В.Б. Балагуров, С.Е. Лисичкин Экспериментальные исследования железобетонного фрагмента напорной стены руслового здания ГЭС, усиленного внешним армированием на основе композитных углеродных лент	72

Гидравлика и инженерная гидрология

Ж.Т. Сивохиш¹, В.М. Павлейчик² Многолетняя динамика притока воды в Ириклинское водохранилище	83
М.В. Ушаков Многолетние колебания годового стока рек на побережье залива Креста	92
Н.П. Карпенко, Б.И. Корженевский, Г.Ю. Толкачев Изучение и анализ динамики загрязнения грунтовых вод инфильтратом ТБО «Ядрово» и комплекс мероприятий по их защите	98

Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация

А.В. Брюханов, Г.А. Демиденко, С.В. Жила Специфика учета пожаров на землях сельскохозяйственного назначения в России и меры по уменьшению ущерба от них	105
А.А. Андропова, А.А. Вайс, П.В. Михайлов, В.Н. Немич, Н.А. Соклаков, А.И. Мельник, И.А. Дрейман, Н.В. Козлов Характеристика крупных древесных остатков в пихтовых насаждениях, поврежденных уссурийским полиграфом (<i>Polygraphus proximus</i> Blandf.)	114
А.А. Камашев, В.А. Савченкова Типологические особенности лесов и особенности естественного возобновления хвойных пород в условиях подзоны Северной тайги	124
Х.М. Хетагуров, И.А. Николаев, А.В. Грязькин, А.Б. Базаев, Э.Р. Калайдjian Видовой состав, встречаемость и численность подлеска под пологом высокогорных кленовников Северного Кавказа	133
М.Г. Варгузина, И.К. Лукина Композиционная и ландшафтно-функциональные особенности размещения территории монастырских комплексов	139
Д.Ю. Гостева, А.В. Лебедев Таксационные показатели поврежденных короедом-типографом еловых древостоев Подмосковья	145

Contents

Land reclamation, water economy and agrophysics

L.V. Kireicheva¹, D.A. Rogachev¹, M.N. Lytov² Conceptual principles for the development of high-technology irrigation systems	6
S.V. Vasilenkov The problem of land reclamation in the scenario of environmental protection from radioactive contamination	16
S.A. Maksimov, E.E. Golovin, Icitegetse Innocent Assessment of the impact of climate change trends on the justification of irrigation standards in the republic of Burundi	24
O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov, A.S. Guzalov, A.V. Kurilenko, D.A. Moskvichev Forced ignition of peat soil from vehicle exhaust systems during agricultural work	31
I.V. Belov, Kh.A. Abdulmajidov, M.A. Karapetyan, S.K. Toygambaev Study of the state of protective structures of irrigation system canals and their restoration by the use of optimal compositions of concrete mixtures	39
R.V. Kalinichenko, A.E. Bedenko The effect of irrigation on the evapotranspiration and productivity of corn according to remote sensing data	48

Hydraulic engineering construction

V.V. Mironov, Yu.A. Ivanyushin, I.Yu. Shalagin, A.A. Kadyseva Technology for accumulating the energy of sea waves in the form of liquid air, ice and hot water	55
D.A. Kolganov, M.G. Zagoruiko, N.F. Ryzhko, S.N. Ryzhko Energy-saving technology for frequency control of pump speeds at pumping stations	64
O.D. Rubin, A.V. Aleksandrov, Zhang Junhao, V.B. Balagurov, Lisichkin S.E. Experimental research of a reinforced concrete fragment of a pressure wall of a riverbed hydroelectric power plant reinforced with external reinforcement based on composite carbon tapes	72

Hydraulics and engineering hydrology

Zh.T. Sivokhip, V.M. Pavleichik Long-term dynamics of water inflow into the Iriklienskoye reservoir	83
M.V. Ushakov Long-term fluctuations in the annual flow of rivers on the coast of the Bay of the Cross	92
N.P. Karpenko, B.I. Korzhenevsky, G.Y. Tolkachev Study and analysis of the dynamics of groundwater contamination by the infiltration of solid waste «Yadrovoye» and a set of measures to protect them	98

Forest science, forestry, forest crops, agricultural afforestation, landscaping, forest pyrology and taxation

A.V. Bryukhanov, G.A. Demidenko, S.V. Zhila Specificity of accounting for fires on agricultural lands in Russia and measures to reduce damage from them	105
A.A. Andronova, A.A. Vais, P.V. Mikhaylov, V.N. Nemich, N.A. Soklakov, A.I. Melnik, I.A. Dreiman, N.V. Kozlov Characteristics of large wood residues in fir plantations damaged by the ussuri polygraph (<i>Polygraphus proximus</i> Blandf.)	114
A.A. Kamashev, V.A. Savchenkova Typological features of forests and features of natural regeneration of coniferous species in the conditions of the Northern Taiga subzone	124
K.M. Khetagurov, I.A. Nikolaev, A.V. Gryazkin, A.B. Bazaev, E.R. Kalaijyan Species composition, frequency and number of underwood under the canopy of the high-mountain maple forests of the North Caucasus	133
M.G. Varguzina, I.K. Lukina Compositional and landscape-functional features of the location of the territory of monastery complexes	139
D.Yu. Gosteva, A.V. Lebedev Forest stand indicators of spruce stands damaged by the bark beetle in the Moscow region	145

Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Оригинальная статья

УДК 631.67:004.8

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-6-15>



КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ СИСТЕМ ОРОШЕНИЯ

Л.В. Кирейчева¹, Д.А. Рогачев^{2✉}, М.Н. Лытов³

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова» (ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»); г. Москва, Российская Федерация

¹ kireychevalw@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7114-2706

² rogachev.soft@gmail.com; ORCID: 0009-0003-4014-4770

³ LytovMN@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-2743-9825

Аннотация. Цель исследований заключается в разработке концептуальных положений создания интеллектуальных гибких оросительных систем (ИГОС) нового поколения, обеспечивающих рациональное водопользование, адаптацию к изменяющимся природно-климатическим условиям и повышение устойчивости агроландшафтов. Методология исследований основана на применении методов системного анализа (для обоснования структуры ИГОС), экономико-математического моделирования (для формирования задачи многокритериальной оптимизации водораспределения), цифрового моделирования (при разработке цифровых двойников), а также методов искусственного интеллекта (для реализации адаптивного управления и прогнозирования мелиоративных процессов). Предложена структура интеллектуальной гибкой оросительной системы, включающая в себя три уровня: межхозяйственную, внутрихозяйственную и подсистему поля, – объединенные информационно-технологической платформой с цифровыми двойниками, обеспечивающей многокритериальную оптимизацию водораспределения, моделирование технической эксплуатации и прогнозирования мелиоративных процессов. Разработана и внедрена информационная система управления водопользованием (ИСУ «Водопользование ОС»), реализующая эволюционно-генетические алгоритмы оптимизации и адаптивное управление на межхозяйственных оросительных системах. Научная новизна исследований заключается в формировании структуры ИГОС как интегрированной многоуровневой системы, объединяющей процессы водораспределения, технической эксплуатации и управления мелиоративными режимами на основе цифровых двойников и методов искусственного интеллекта. Практическое применение системы на государственных оросительных системах Волгоградской области обеспечило экономию водных и финансовых ресурсов до 10% при сохранении производственных показателей. Результаты подтверждают эффективность перехода от традиционных инерционных оросительных систем к интеллектуальным высокотехнологичным структурам, основанным на цифровой трансформации и искусственном интеллекте. Сделан вывод о том, что ИГОС представляет собой новую форму организации мелиоративного производства, обеспечивающую системное управление природно-техническим комплексом и устойчивое развитие орошаемого земледелия в условиях дефицита водных ресурсов.

Ключевые слова: интеллектуальная гибкая оросительная система, цифровой двойник, многокритериальная оптимизация, управление водопользованием, искусственный интеллект, мелиоративные системы, автоматизация орошения, устойчивое земледелие, цифровая трансформация

Формат цитирования: Кирейчева Л.В., Рогачев Д.А., Лытов М.Н. Концептуальные положения создания высокотехнологичных систем орошения. Природообустройство. 2026;Т.19(2):6-15. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-6-15>

CONCEPTUAL PRINCIPLES FOR THE DEVELOPMENT OF HIGH-TECHNOLOGY IRRIGATION SYSTEMS

L.V. Kireicheva¹, D.A. Rogachev¹✉, M.N. Lytov²

¹Federal State Budgetary Scientific Institution “A.N. Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation” (A.N. Kostyakov Federal State Budgetary Scientific Research Center VNIIGiM), Moscow, Russian Federation

¹kireychevalw@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7114-2706

²rogachev.soft@gmail.com; ORCID: 0009-0003-4014-4770

³LytovMN@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-2743-9825

Abstract. The research aims to develop conceptual principles for creating a new generation of intelligent flexible irrigation systems that ensure rational water use, adaptation to changing climatic conditions, and increased agro-landscape sustainability. The study applies methods of systems analysis, economic-mathematical and digital modeling of water distribution and reclamation processes, principles of flexible production systems, and artificial intelligence technologies. A structure of the Intelligent Flexible Irrigation System (IFIS) is proposed, comprising inter-farm, on-farm, and field subsystems integrated through an IT platform with digital twins that enable multi-criteria optimization of water distribution, maintenance modeling, and prediction of reclamation processes. An information system for water use management (ISWU “Water Use OS”) has been developed and implemented, applying evolutionary-genetic optimization algorithms and adaptive real-time control. Its practical application in state irrigation systems of the Volgograd region achieved up to 10% savings in water and financial resources while maintaining productivity levels. The results confirm the effectiveness of transitioning from traditional inert irrigation systems to intelligent high-technology structures based on digital transformation and artificial intelligence. It is concluded that the IFIS represents a new organizational and technical form of reclamation production, ensuring systemic management of water use and sustainable development of irrigated agriculture under water scarcity conditions.

Keywords: intelligent flexible irrigation system, digital twin, multi-criteria optimization, water use management, artificial intelligence, reclamation systems, irrigation automation, sustainable agriculture, digital transformation

Citation format: Kireicheva L.V., Rogachev D.A., Lytov M.N. Conceptual principles for the development of high-technology irrigation systems. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):6-15. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-6-15>

Введение. Современный этап развития общества характеризуется созданием высокотехнологичных систем, обеспечивающих управление производственными процессами на базе информационных технологий с использованием искусственного интеллекта. Это относится и к оросительным системам, для которых необходимо применять системное управление потоками воды и минеральных веществ на мелиорируемом поле для обеспечения потребности сельскохозяйственных культур и получения урожайности, близкой к природно-ресурсному потенциалу данной климатической зоны. Цифровизация и автоматизация управления позволяют оперативно собирать и эффективно обрабатывать большие объемы данных, а также обеспечивать согласование необходимых воздействий между потребностями растений, показателями мелиоративного состояния земель и технологическими средствами, реализующими эти воздействия на оросительной системе [1-3]. При этом на практике наблюдается

противоречие между возрастающей вариабельностью природно-климатических условий, требованиями к ресурсосбережению и ограниченными возможностями существующих оросительных систем, характеризующихся высокой инерционностью управления и отсутствием инструментов адаптивного регулирования. Это обуславливает необходимость разработки принципиально новых подходов к организации и управлению оросительными системами [4, 5].

Действующие в настоящее время оросительные системы в большинстве случаев инерционны, что не позволяет своевременно реагировать на изменение метеорологических параметров, требований растений к мелиоративному режиму и подобным факторам и полноценно выполнять производственные функции. Кроме того, существующие системы, построенные более 30 лет назад, капиталоемкие и водозатратны и характеризуются высокой мелиоративной нагрузкой на агроландшафт, что зачастую приводит к деградации

почвенного покрова и прилегающей территории. В последнее время на оросительных системах по различным причинам (изменение структуры возделываемых культур, обновление технологий полива, переход на новые источники энергии и водоснабжения) возникает производственная необходимость замены отдельных элементов, что требует корректировки технологических параметров системы и ее реконструкции. Указанные ограничения свидетельствуют о необходимости перехода от традиционных инерционных оросительных систем к интеллектуальным системам нового типа, способным обеспечивать адаптивное управление водопользованием и мелиоративными режимами в условиях изменяющейся внешней среды.

В отличие от ранее выполненных исследований, посвященных отдельным аспектам управления водопользованием, моделирования мелиоративных процессов и цифровизации оросительных систем, в статье предложен интеграционный подход, предусматривающий объединение указанных решений в рамках единой интеллектуальной гибкой оросительной системы, обеспечивающей согласованное управление всеми уровнями оросительной инфраструктуры.

Материалы и методы исследований.

Основанием для создания высокоавтоматизированных оросительных систем нового типа являются разработанная ранее в ФНИЦ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова» парадигма биосферного природопользования и принципы построения гибких производственных систем, адаптированные к условиям управления оросительными системами. Указанные принципы обеспечивают оперативную перенастройку системы при изменении вида и объема продукции, а также способов ее производства. Рассматривая орошение как технологический процесс, можно сформулировать основные тенденции его реализации в мировой практике: сочетание различных способов полива для создания оптимальных условий развития растений; специализация применительно к виду выращиваемых культур (зерновые, овощи, кормовые, технические и пр.); приоритет развития малообъемных способов орошения, обеспечивающих снижение инфильтрационных потерь и уменьшение площади дренажа; энерго- и ресурсосбережение за счет увеличения масштаба и видов применения возобновляемых источников энергии и нетрадиционных источников воды для орошения [1, 2, 6, 7].

Рассматриваемые в работе методологические положения включают в себя использование системного анализа при формировании

иерархической структуры оросительной системы, экономико-математического моделирования при постановке и решении задачи оптимизации водораспределения, а также цифрового моделирования при разработке цифровых двойников подсистем. Методы искусственного интеллекта применяются при реализации алгоритмов адаптивного управления и прогнозирования мелиоративных процессов.

Совокупность указанных факторов, наряду с автоматизацией управления и применением методов искусственного интеллекта (ИИ), позволит сформировать оросительные системы нового типа с изменяемыми функциональными модулями, обеспечивающими применение различных способов полива в пределах поля при существующих технических параметрах и использование этих систем для снижения климатических рисков. Указанный подход существенно расширяет диапазон управляемых параметров и сценариев функционирования оросительной системы и обеспечивает решение задач управления в зависимости от специфики производственного цикла. Способность таких систем собирать, анализировать и использовать информацию для выбора оптимальных режимов функционирования в зависимости от изменяющихся внешних и внутренних условий определяет их интеллектуальный характер.

Наличие изменяемых функциональных модулей, обеспечивающих адаптацию и развитие возможностей оросительных систем без перестройки базовой архитектуры, придает им свойства гибких производственных комплексов нового поколения. Следовательно, создание высокоавтоматизированных систем орошения с изменяемыми функциональными модулями следует рассматривать как формирование интеллектуальных гибких производственных систем.

Применение указанных методов позволило сформировать концептуальные и алгоритмические решения, положенные в основу построения интеллектуальной гибкой оросительной системы, включая структуру ее подсистем, модели водораспределения и элементы цифровых двойников, обеспечивающие адаптивное управление мелиоративными режимами.

Результаты и их обсуждение. Предлагаемая структура интеллектуальной гибкой оросительной системы (ИГОС) представляет собой результат интеграции ранее разработанных моделей и алгоритмов в единую функционально связанную систему управления, обеспечивающую согласованное функционирование всех уровней оросительной системы.

ИГОС включает в себя технологии искусственного интеллекта (ИИ) и обладает моделью внутренней среды (цифровой двойник), что позволяет действовать в условиях неопределенности информации, реализовать механизмы самообучения и адаптации путем генерации последовательности действий для поставленной цели, а также подстраивать функционирование под изменяющиеся условия окружающей среды для достижения поставленных целей [8-10]. Управление ИГОС должно быть основано на компьютерной системе и настроено в режиме реального времени, для чего необходима разработка цифрового двойника.

Интеллектуальные оросительные системы представляют собой следующий шаг к более устойчивому и эффективному сельскому хозяйству. Их внедрение позволит фермерам адаптироваться к современным вызовам, связанным с цифровой трансформацией сельского хозяйства, изменением климата и растущими потребностями в продовольствии, обеспечивая при этом более рациональное использование ресурсов. Исходя из вышеизложенного структура ИГОС должна включать в себя [9-11]:

- устройства для выполнения технологического процесса. В данном случае это комплекс взаимосвязанных гидротехнических сооружений оросительной системы, техника полива, инфраструктура;

- модульную архитектуру с различными способами полива, характерными для данной природно-климатической зоны;

- состав управляющих воздействий оросительной системы для комплексного регулирования средообразующих факторов как совокупность программных и аппаратных средств по получению, преобразованию, анализу, передаче данных и использованию их для управления оборудованием оросительной сети при реализации эксплуатационного режима орошения;

- алгоритмы описания информационных процессов, включающие в себя сбор информации о функционировании природно-технического комплекса оросительной системы, обработку поступивших данных с помощью моделей процессов, протекающих при функционировании оросительной системы;

- модели прогнозирования природных процессов и программные комплексы, позволяющие анализировать воздействие на природную среду и оптимизировать мелиоративные режимы;

- устройства и датчики, обеспечивающие получение информации о состоянии технологического процесса функционирования оросительной

сети и мелиоративного состояния агроэкосистемы на орошаемых землях, включающие в себя автоматизированный контроль качества полива;

- интеллектуальную систему управления оросительной системой – это ядро ИГОС, которое принимает обработанную информацию, вырабатывает управляющие воздействия на оборудование оросительной сети, а также получает обратные связи о результатах этих воздействий. Система управления должна иметь способность к обучению и адаптации, то есть способность генерировать последовательность действий для поставленной цели, а также подстраивать свое поведение под изменяющиеся условия для достижения поставленных целей.

Гибкая оросительная система представляет собой иерархическую структуру, состоящую из трех взаимосвязанных подсистем: межхозяйственной, обеспечивающей забор воды из вод источника и распределение по оросительной сети; внутрихозяйственной, предназначенной для подачи воды к поливной технике и осуществляющей полив сельскохозяйственных культур; и собственно орошаемое поле, на котором происходит регулирование мелиоративного режима (рис. 1).

Выбор и обоснование критериев оптимизации – сложная и неоднозначная задача. В качестве первоочередных критериев оптимизации водораспределения между хозяйствами/водопользователями предлагается рассматривать:

- Финансовый результат водохозяйственной организации (ВХО), который рассчитывается как разность между выручкой от подачи воды потребителю и затратами на ее подачу. Максимизация финансового результата ВХО стимулирует поддержание межхозяйственной системы в исправном состоянии, обеспечивающем снижение потерь воды в водопроводящей сети.

- Площадь орошения как показатель использования производственного потенциала орошения. Максимизация этого критерия повышает равноправность доступа потребителей к водным ресурсам и снижает социальное неравенство.

- Стоимость валовой продукции растениеводства, полученной хозяйствами-потребителями воды, служит в качестве критерия оценки эффективности водораспределения.

Экономико-математическая модель оптимизации водораспределения на межхозяйственной оросительной системе, в которой целевая функция формируется на основе трех указанных критериев, а их баланс достигается с помощью весовых коэффициентов, отражающих приоритетность целей, представлена в работе [12].

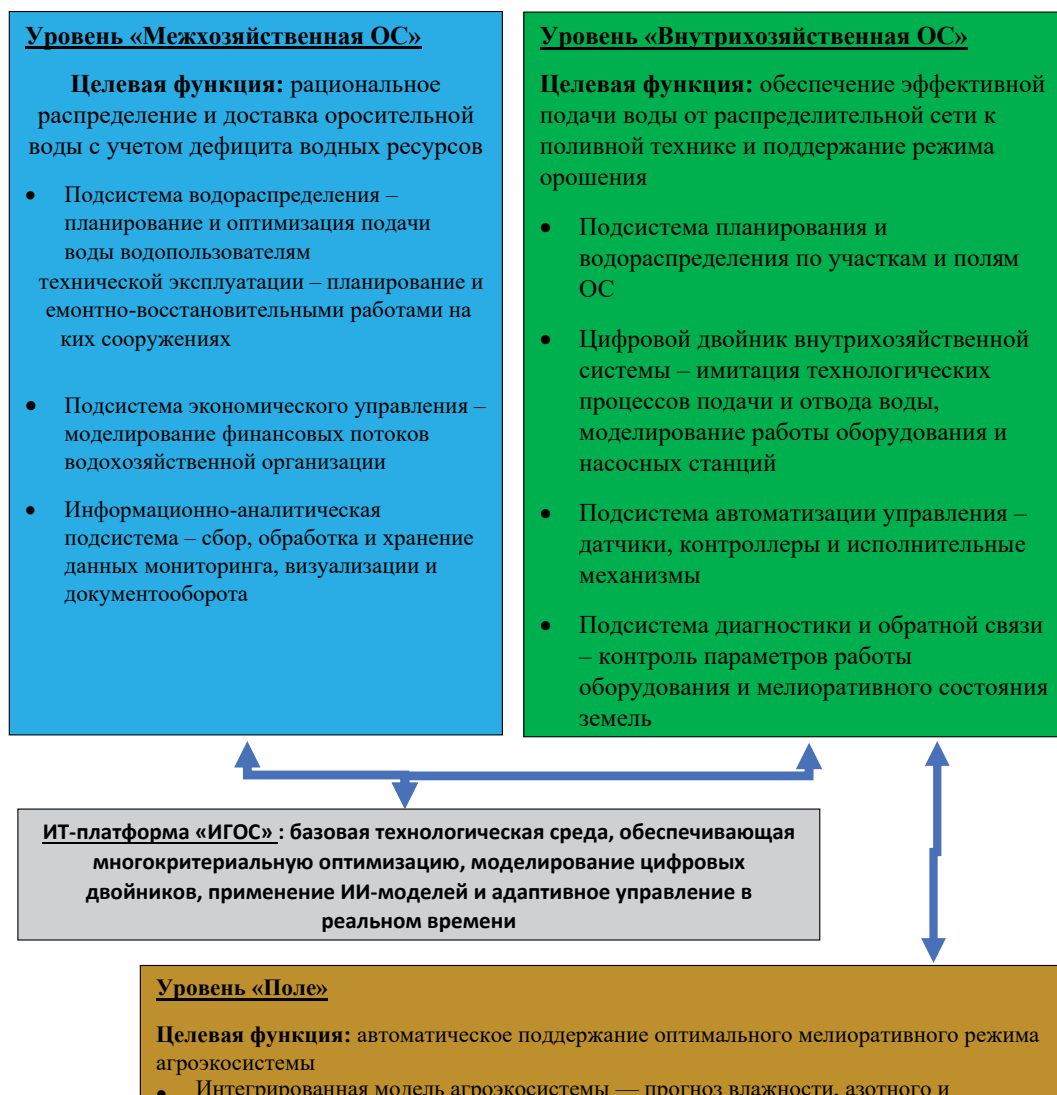


Рис. 1. Иерархическая схема взаимосвязей подсистем Интеллектуальной гибкой оросительной системы (ИГОС)

Fig. 1. Hierarchical scheme of interrelations of subsystems of the Intelligent Flexible Irrigation System (IGOS)

Разработана информационная система управления водопользованием (ИСУ «Водопользование ОС»), апробированная на государственных межхозяйственных оросительных системах, функционирующих в условиях дефицита оросительной воды и ограниченного финансирования ремонтно-восстановительных работ, что создает серьезные вызовы для рационального использования водных и инфраструктурных ресурсов. Структурно-функциональная схема ИСУ «Водопользование» представлена на рисунке 2.

Система использует методы многокритериального экономико-математического моделирования, искусственного интеллекта, модели-двойники управления организацией и обеспечивает решение следующих задач:

– планирование тактического и оперативного водораспределения на межхозяйственных

оросительных системах в напряженных метеорологических и хозяйственных условиях;

– назначение мероприятий ремонтно-восстановительных работ на гидротехнических сооружениях (ГТС), входящих в состав мелиоративной системы;

– управление финансово-экономическими процессами водохозяйственной организации для стабилизации рынка сельскохозяйственной продукции.

Ядро ИСУ «Водопользование ОС» включает в себя специализированные базы данных [14] и интеллектуальные программные модули «Оптимизация распределения оросительной воды», «Планирование технической эксплуатации», использующие эволюционно-генетические алгоритмы [15]. Программный комплекс обеспечивает как визуализацию атрибутивных и графических

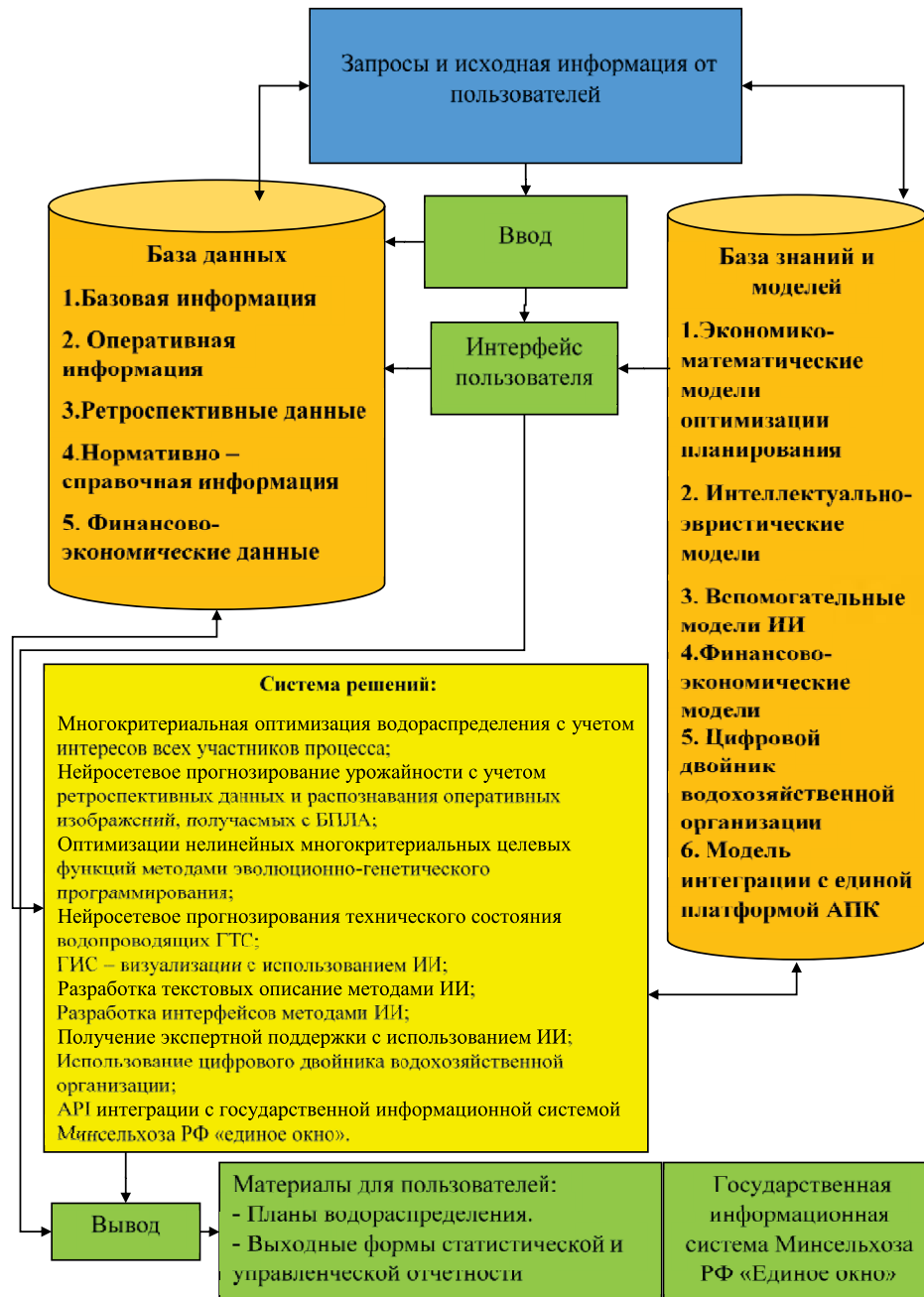


Рис. 2. Структурно-функциональная схема ИСУ «Водопользование ОС» [13]

Fig. 2. Structural and functional diagram of the ISWU "Environmental Water Use" [13]

данных, так и автоматизацию документооборота по управлению процессами водопользования на государственных оросительных системах.

Апробация разработанной системы управления водопользованием выполнена на базе ФГБУ «Управление „Волгоградмелиоводхоз“ (Городищенский филиал) в 2023-2024 гг. в условиях дефицита оросительной воды и ограниченного финансирования. В результате внедрения обеспечено повышение эффективности распределения водных ресурсов за счет согласования заявок водопользователей с техническими возможностями системы, а также оптимизации планирования ремонтно-восстановительных мероприятий.

Совокупный эффект был выражен в снижении водных и финансовых затрат до 10% по сравнению с традиционными методами планирования при сохранении уровня сельскохозяйственного производства. Полученные результаты подтверждают эффективность и практическую реализуемость предложенного подхода. Управление внутриводхозяйственной системой осуществляется с использованием цифрового двойника процесса управления (рис. 3).

Алгоритмы поливных модулей автоматизации представляют собой формализованное описание информационно-технологических процедур, включающих в себя сбор априорных данных

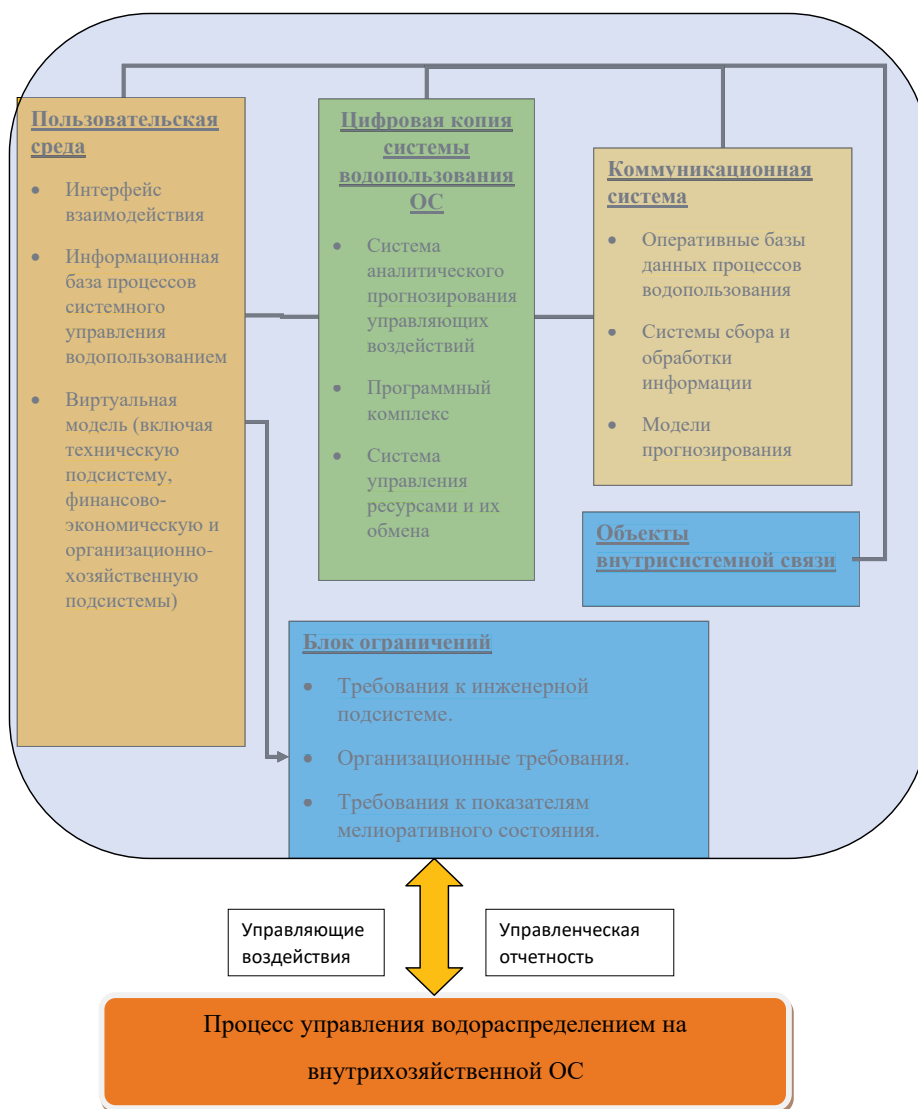


Рис. 3. Схема цифрового двойника внутрихозяйственной оросительной системы

Fig. 3. Diagram of the digital twin of the on-farm irrigation system

о состоянии и функционировании природно-технического комплекса оросительной системы и орошаемых земель, обработку данных моделирования процессов водопользования, формирование управляющих воздействий на оборудование оросительной сети и получение обратной связи о результатах их реализации.

При управлении мелиоративным режимом агроэкосистем на орошаемых землях предусматривается автоматическое поддержание заданных параметров или их изменение во времени на основе интегрированной модели с использованием нейросетевых методов. В этой связи разработана такая модель, предназначенная для оперативного регулирования водного и питательного режимов и обеспечивающая прогнозирование влажности, содержания органических веществ и азотных соединений в почвенном слое с целью поддержания оптимальных мелиоративных условий (рис. 4).

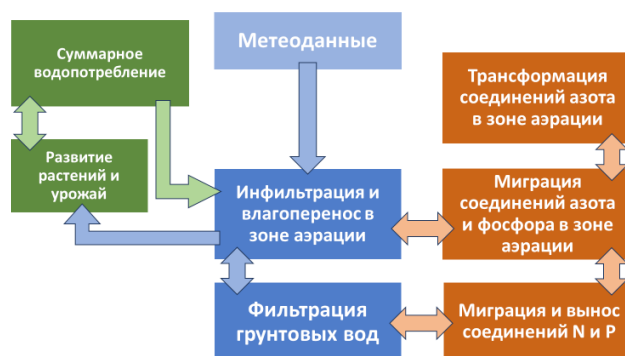


Рис. 4. Структурная схема программного комплекса моделирования мелиоративных процессов

Fig. 4. Structural diagram of the software package for modeling reclamation processes

Интегрированная модель агрогеосистемы представляет собой комплекс, объединяющий модель агрогеоценоза с моделью пространственной геофильтрации. Такая модель дает возможность

определять ключевые параметры мелиоративного режима с учетом экологических требований. Для описания перемещения влаги в зоне аэрации, развития растений и общего водопотребления были применены подходы, заимствованные из модели SWAP [8, 10]. Вместе с тем введен ряд упрощений: не учитывается воздействие стабильных почвенных фракций, игнорируется влияние трещиноватости горных пород, а также не моделируется уменьшение испаряемости с поверхности почвы. Для расчета миграции и трансформации соединений азота использованы принципы, реализованные в модели ANIMO [8]. При этом перенос и превращение фосфорных соединений не рассматриваются, а задача оценки поступления веществ в дренаж и поверхностный решается в модели пространственной геофильтрации.

Пространственная геофильтрация и массоперенос моделировались с помощью трехмерной модели nMtWolf, созданной Санкт-Петербургским отделением ИГЭ РАН. Модель разработана для решения трехмерных задач гидродинамики подземных вод и перемещения загрязнений в стационарных и нестационарных условиях – как для напорных, так и для безнапорных режимов фильтрации.

Сопряжение моделей влагопереноса и переноса азотных соединений с трехмерной моделью геофильтрации выполнено алгоритмическим методом, что дает возможность применять модульный принцип построения системы.

Для подготовки входных параметров разработана специализированная геоинформационная система (ГИС), которая обеспечивает задание пространственно-временных данных по аналоговому принципу и формирует единый массив исходной информации для интегрированной модели.

В блоке моделирования урожайности рост растения описывается с помощью индекса листовой поверхности, высоты растения и глубины корневой зоны как функций стадии развития, изменяющихся линейно во времени. Определение урожайности выполняется согласно методике [8, 10].

Миграционный модуль ориентирован на прогнозные задачи переноса загрязняющих веществ в масштабах бассейнов различных уровней. Он использует сетку, граничные условия и поля межблочных потоков, формируемые в фильтрационной части программы. Применение единой расчетной схемы для задач фильтрации и массопереноса уменьшает численные ошибки и повышает устойчивость решения, что особенно важно для нестационарных постановок. В расчетах учитываются продольная и поперечная дисперсии, молекулярная диффузия и массообмен между

зонами различной проницаемости, что позволяет получать корректные результаты на этапах кратко- и среднесрочного прогноза, когда миграционный процесс задействует еще не весь поровый объем водоносного горизонта.

Полученные результаты апробации и реализованные алгоритмы оптимизации водораспределения подтверждают возможность и эффективность применения заявленных методов в рамках разработанной системы управления.

Выводы

Результаты исследований являются обоснованием необходимости перехода от традиционных инерционных оросительных систем к интеллектуальным гибким системам нового поколения, основанным на принципах цифровой трансформации, моделировании и применении технологий искусственного интеллекта. Интеллектуальная гибкая оросительная система (ИГОС) формирует новый тип организационно-технического устройства мелиоративного производства, способного адаптироваться к изменяющимся природно-климатическим и хозяйственным условиям, обеспечивая рациональное водопользование и повышение устойчивости агроландшафтов.

Реализация принципов модульности, иерархического управления и интеграции цифровых двойников на всех уровнях: от межхозяйственного до уровня поля – обеспечивает возможность многокритериальной оптимизации водораспределения, планирования технической эксплуатации и моделирования мелиоративных режимов в реальном времени.

Внедрение информационной системы управления водопользованием (ИСУ «Водопользование ОС») продемонстрировало практическую эффективность подхода: экономия водных и финансовых ресурсов составила около 10% по сравнению с традиционным планированием при сохранении стабильных показателей продуктивности.

Совокупность разработанных решений формирует научно-техническую основу для создания высокотехнологичных систем орошения нового типа, обеспечивающих переход от локального управления технологическими процессами к системному управлению мелиоративными объектами на базе интеллектуальных цифровых платформ. Это открывает перспективы повышения эффективности водопользования, экологической устойчивости агроэкосистем и результативности орошаемого земледелия в условиях нарастающего дефицита водных ресурсов и климатических изменений.

Список использованных источников

1. Ольгаренко В.И. и др. Функции планирования водопользования на оросительных системах с использованием современных IT-технологий // Мелиорация и водное хозяйство. 2025. № 1. С. 34-40 EDN: VYCUPN
2. Vallejo-Gómez D., Tarazona-Bermúdez G., López-Vicente M. et al. Smart Irrigation Systems in Agriculture: A Systematic Review // *Agronomy*. 2023. Vol. 13, No. 2. Art. 342. DOI: 10.3390/agronomy13020342
3. Del-Coco M., Leo M., Carcagnì P. Machine Learning for Smart Irrigation in Agriculture: How Far along Are We? // *Information*. 2024. Vol. 15, No. 6. Art. 306. DOI: 10.3390/info15060306
4. FAO, ITU. Digital Excellence in Agriculture: FAO-ITU Regional Contest on Good Practices Advancing Digital Agriculture in Europe and Central Asia. Rome: FAO, 2023. 168 p.
5. Сергеев Л.И., Сергеев Д.Л., Шендерюк-Жидков А.В. Стратегические направления цифровой трансформации агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов России // *Балтийский экономический журнал*, 2025.(3(51)) С. 53-73. <https://doi.org/10.46845/2073-3364-2025-0-3-53-73>
6. Токарев К.Е. и др. Теория и технологии управления орошением сельскохозяйственных культур на основе информационных технологий поддержки принятия решений и математического моделирования // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2020. № 4 (60). С. 433-448 EDN: VIMXRU
7. Preite L. & Vignali G. (2024). Artificial intelligence to optimize water consumption in agriculture: A predictive algorithm-based irrigation management system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 223, 109126.
8. Ahsen R. et al. Harnessing digital twins for sustainable agricultural water management: a systematic review // *Applied Sciences*. 2025. Т. 15, № 8. С. 4228
9. Silva L. et al. The digital twin paradigm applied to soil quality assessment: a systematic literature review // *Sensors*. 2023. Т. 23, № 2. С. 1007
10. Pavón R.M. et al. Digital Twin development and implementation for the management of irrigation networks // *Expert Systems with Applications*. 2026. Т. 297. С. 129330
11. Kumar R., Singh A. Adaptive Irrigation Scheduling Using AI Techniques under Water Scarcity // *Agricultural Systems*. 2022. Vol. 198. Art. 103386
12. Кирейчева Л.В., Рогачев Д.А., Юрченко И.Ф., Рогачев А.Ф. Оптимизация распределения ограниченных водных ресурсов методами эволюционно-генетического программирования // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2024. № 2. С. 233-238. EDN: QABDGE
13. Рогачев Д.А., Кирейчева Л.В., Юрченко И.Ф., Рогачев А.Ф. Технология управления системным водопользованием с применением методов искусственного интеллекта и моделей-двойников организации // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2024. Т. 67, № 4 (400). С. 404-410. DOI: 10.55186/25876740_2024_67_4_404
14. Параметры для оптимизации распределения оросительной воды в условиях дефицита водных ресурсов с использованием генетического алгоритма: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624124 Российская Федерация: заявл. 15.11.2023; опублик. 22.11.2023 / Д.А. Рогачев; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»
15. Оптимизация распределения оросительной воды в условиях дефицита методом эволюционно-генетических вычислений с нелинейной многокритериальной целевой функцией: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611825 Российская Федерация:

References

1. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Korzhov I.V. Functions of planning water use in irrigation systems using modern IT technologies // *Melioration and water management*. 2025. No. 1. P. 34-40. EDN: VYCUPN
2. Vallejo-Gómez D., Tarazona-Bermúdez G., López-Vicente M., et al. Smart Irrigation Systems in Agriculture: A Systematic Review // *Agronomy*. 2023. Vol. 13, No. 2. Art. 342. DOI: 10.3390/agronomy13020342.
3. Del-Coco M., Leo M., Carcagnì P. Machine Learning for Smart Irrigation in Agriculture: How Far along Are We? // *Information*. 2024. Vol. 15, No. 6. Art. 306. DOI: 10.3390/info15060306
4. FAO, ITU. Digital Excellence in Agriculture: FAO-ITU Regional Contest on Good Practices Advancing Digital Agriculture in Europe and Central Asia. Rome: FAO, 2023. 168 p.
5. Sergeev L.I., Sergeev D.L., Shenderyuk-Zhidkov A.V. Strategic directions of digital transformation of the agro-industrial and fisheries complexes of Russia // *Bulletin of the Volga State Technological University // Baltic Economic Journal*, 2025;(3(51)):53-73. <https://doi.org/10.46845/2073-3364-2025-0-3-53-73>
6. Tokarev K.E. and others. Theory and technologies of crop irrigation management based on information technologies for decision support and mathematical modeling // *Izvestia of the Nizhnevolsky Agrouniversity Complex: Science and higher professional education*. 2020. No. 4 (60). P. 433-448. EDN: VIMXRU
7. Preite L., & Vignali G. (2024). Artificial intelligence to optimize water consumption in agriculture: A predictive algorithm-based irrigation management system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 223, 109126.
8. Ahsen R. et al. Harnessing digital twins for sustainable agricultural water management: a systematic review // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. No. 8. p. 4228.
9. Silva L. et al. The digital twin paradigm applied to soil quality assessment: a systematic literature review // *Sensors*. 2023. Vol. 23. no. 2. pp. 1007. 5. Pavón R.M. et al. Digital Twin development and implementation for the management of irrigation networks // *Expert Systems with Applications*. 2026. Vol. 297. P. 129330.
10. Pavón R.M. et al. Digital Twin development and implementation for the management of irrigation networks // *Expert Systems with Applications*. – 2026. – V. 297. – P. 129330.
11. Kumar R., Singh A. Adaptive Irrigation Scheduling Using AI Techniques under Water Scarcity // *Agricultural Systems*. 2022. Vol. 198. Art. 103386.
12. Kireicheva L.V., Rogachev D.A., Yurchenko I.F., Rogachev A.F. Optimization of the distribution of limited water resources by methods of evolutionary genetic programming // *International Agricultural Journal*. 2024. no. 2. P. 233-238. EDN: QABDGE
13. Rogachev D.A., Kireicheva L.V., Yurchenko I.F., Rogachev A.F. Technology of management of systemic water use using artificial intelligence methods and organization twin models // *International Agricultural Journal*. 2024. Vol. 67, No. 4(400). P. 404-410. DOI: 10.55186/25876740_2024_67_4_404.
14. Certificate of state registration of the database No. 2023624124 Russian Federation. Parameters for optimizing the distribution of irrigation water in conditions of water scarcity using a genetic algorithm: No. 2023624014: application no. 11/15/2023; published 11/22/2023 / D.A. Rogachev; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Hydrotechnics and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov".
15. Certificate of state registration of the computer program No. 2024611825 Russian Federation. "Optimization of irrigation water distribution in conditions of scarcity by the method of evolutionary genetic calculations with a nonlinear multi-criteria objective function": No. 2023688940: application 22.12.2023:

заявл. 22.12.2023; опублик. 25.01.2024 / Д.А. Рогачев; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»

published 25.01.2024 / D.A. Rogachev; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation"

Информация об авторах

Людмила Владимировна Кирейчева, д-р техн. наук, профессор, руководитель научного направления Федерального научного центра гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова; ORCID: 0000-0002-7114-2706; kireychevalw@mail.ru

Дмитрий Алексеевич Рогачев, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела природоохранных и информационных технологий; ORCID: 0009-0003-4014-4770; rogachev.soft@gmail.com

Михаил Николаевич Лытов, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник ВНИИОЗ – филиала ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»; ORCID: 0000-0003-2743-9825; LytovMN@yandex.ru

Information about the authors

Lyudmila V. Kireicheva, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the scientific department of the Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova; ORCID: 0000-0002-7114-2706; kireychevalw@mail.ru

Dmitry A. Rogachev, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Department of Environmental Protection and Information Technology; ORCID: 0009-0003-4014-4770, rogachev.soft@gmail.com

Mikhail N. Lytov, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher at VNIIOZ – branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution FNTS VNIIGiM named after A.N. Kostyakov, ORCID: 0000-0003-2743-9825, LytovMN@yandex.ru

Вклад авторов

Л.В. Кирейчева – разработка концептуального замысла, проверка логики изложения

Д.А. Рогачев – разработка структуры статьи, редактировании текста и научной корректировке рукописи.

М.Н. Лытов – оформление графических материалов и подготовка рукописи к публикации.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict

Поступила в редакцию / Received 28.10.2025

Поступила после рецензирования / Received 19.03.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 21.03.2026

Author Contribution

L.V. Kireicheva – development of a conceptual idea, verification of the logic of presentation

D.A. Rogachev – development of the article structure, text editing and scientific correction of the manuscript.

M.N. Lytov – design of graphic materials and preparation of the manuscript for publication.

Оригинальная статья

УДК 631.438.2:626.81:504.1

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-16-23>

ПРОБЛЕМА МЕЛИОРАЦИИ ТЕРРИТОРИЙ ПРИ СЦЕНАРИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОТ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

С.В. ВасиленковБрянский государственный аграрный университет; Брянская область, п. Кокино, Российская Федерация
vasilenkov_sergey@mail.ru; ORCID: 0009-0009-2027-394X

Аннотация. Цель исследований – изучение сценария экологической защиты радиоактивно загрязненных или находящихся в опасности загрязнения территорий путем оросительных мелиораций, активного использования химических удобрений в сочетании с приемами интенсификации промывки почв и снижения поступления радионуклидов в растения, в организмы животных и человека. Приведены результаты оценки снижения дозы внешнего и внутреннего облучения населения, подчеркнута важная роль уменьшения экологической опасности территорий в масштабе загрязненного региона, защиты здоровья населения, продления трудоспособной человеческой жизни. Применяемые нами химические и физические приемы не один раз проверены в лабораторных опытах и полевых экспериментах. В местах повышенной радиоэкологической опасности, особенно вблизи населенных пунктов с дефицитом водоснабжения и других ресурсов, изучены различные способы экологической защиты и сценарии развития негативной миграции радионуклидов. Природные явления в полевых условиях могут ускорить вынос цезия-137 и значительно сэкономить затраты ресурсов. Применение удобрений и промывных поливов, цеолитовых конструкций для перехвата цезия-137, известкования или внесения органики, глубокого рыхления и интенсификаторов улучшает режим фиксации и выноса радиоактивного загрязнения. Полив водой из осушительных каналов, также интенсивно выщелачивает цезий-137. Оросительная мелиорация должна повысить экологическую защиту за счет предотвращенной дозы внешнего и внутреннего облучения, снизить его до минимально допустимого предела 1 мЗв/год, что положительно скажется на здоровье и продолжительности трудоспособной жизни населения, повысит качество и объем растениеводческой и животноводческой продукции.

Благодарности. Автор выражает благодарность и признательность научному руководителю – профессору, доктору технических наук Валерию Фёдоровичу Василенкову, коллективу кафедры природообустройства и водопользования, за посильный вклад в выполнение данной работы

Ключевые слова: экологическая защита, мелиорация территории, загрязненный почвенный слой, вымывание цезия, предотвращенная доза облучения

Для цитирования: Василенков С.В. Проблема мелиорации территорий при сценарии экологической защиты от радиоактивного загрязнения. Природообустройство. 2026;Т.19(2):16-23. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-16-23>

Original article

THE PROBLEM OF LAND RECLAMATION IN THE SCENARIO OF ENVIRONMENTAL PROTECTION FROM RADIOACTIVE CONTAMINATION

S.V. VasilenkovBryansk State Agrarian University, 243365, Bryansk region, Kokino village, Russian Federation
vasilenkov_sergey@mail.ru; ORCID: 0009-0009-2027-394X

Abstract. Our goal is to study the scenario of environmental protection of radioactively contaminated or at risk of contamination of territories through irrigation reclamation, active use of chemical fertilizers, combined with methods of intensifying soil washing and reducing the intake of radionuclides into plants, animals and humans. The results of the assessment of reducing the dose of external and internal radiation to the population are presented, the important role of reducing the environmental hazard of territories on the scale of a polluted region, protecting public health, and prolonging able-bodied human life is emphasized. The chemical and physical techniques we use have been tested many times in laboratory experiments and field experiments. In places of increased radioecological danger, especially near settlements with a shortage of water supply and other resources, various methods of environmental protection and

scenarios for the development of negative migration of radionuclides have been studied. Natural phenomena in the field can accelerate the removal of caesium-137 and greatly save resource costs. The use of fertilizers and washing irrigation, zeolite structures for intercepting caesium-137, liming or applying organic matter, deep loosening and intensifiers improves the regime of fixation and removal of radioactive contamination. Watering with water from drainage channels also intensively leaches caesium-137. Irrigation reclamation should increase environmental protection by preventing the dose of external and internal radiation, reduce it to the minimum allowable limit of 1 mSv / year, which will positively affect the health and life expectancy of the population, improve the quality and volume of crop and livestock products.

Gratitudes. The author expresses his gratitude and appreciation to the scientific supervisor, Professor, Doctor of Technical Sciences Vasilenkov Valery Fedorovich; members of their family; to the staff of the Department of Environmental Engineering and Water Use for their feasible contribution to the implementation of this work.

Keywords: environmental protection, land reclamation, polluted soil layer, leaching of cesium, prevented radiation dose

For citation: Vasilenkov S.V. The problem of land reclamation in the scenario of environmental protection from radioactive contamination. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):16-23. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-16-23>

Введение. Пример радиоактивного загрязнения Брянской области может быть показательным для территорий, испытывающих подобное, а также для тех мест, которые расположены вблизи опасных возможных выбросов радиоактивного заражения. В зону риска попадают не только сельскохозяйственные угодья, но и жилые районы возле атомных станций, хвостохранилищ разработок радиоактивной руды, мест захоронения и консервации радиоактивных отходов. Даже если здесь изначально соблюдены все меры по изоляции и поддержанию

радиационного фона на допустимом уровне, утечки происходят постоянно, а аварии или нарушения по причине природных катаклизмов могут иметь катастрофические последствия для окружающей среды и здоровья населения.

Данные таблицы 1 наглядно свидетельствуют о том, что коэффициенты радиационного риска для внешнего облучения на несколько порядков превышают коэффициенты риска получения больших доз внутреннего облучения. При этом получение доз внешнего облучения усугубляет опасность воздействия на здоровье

Таблица 1. Коэффициенты радиационного риска для разных путей облучения [1]

Table 1. Radiation risk coefficients for different exposure routes [1]

Обозначение радионуклида / <i>Radionuclide designation</i>	Коэффициент радиационного риска при / <i>The coefficient of radiation risk at</i>		
	потреблении воды и продуктов питания, риск / Бк / <i>consumption of water and food, risk / Bq</i>	дыхании, риск / Бк / <i>breathing, risk / Bq</i>	внешнем облучении, риск / год Бк / г / <i>external exposure, risk / year Bq / g</i>
K-40	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$8,5 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Co-60	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-10}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
Zn-65	$7,9 \cdot 10^{-10}$	$9,4 \cdot 10^{-11}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$
Sr-90	$3,8 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$
Ru-106	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
I-131	$8,9 \cdot 10^{-9}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$
Cs-134	$9,4 \cdot 10^{-10}$	$3,3 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
Cs-137	$6,5 \cdot 10^{-10}$	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$
Ra-226	$7,5 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$
Ba-140	$8,9 \cdot 10^{-10}$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Th-228	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
U-235	$6,5 \cdot 10^{-9}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
U-238	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$
Na-24	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$8,9 \cdot 10^{-11}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$

людей и животных, на экологию окружающей среды в целом с течением времени.

Вопросы экологической защиты и реабилитации почв, растений, людей и животных весьма актуальны. Ограничение доз облучения на допустимом уровне (1 м-Зв/год и ниже), предусмотрено законом о радиационной безопасности населения [2-7]. Кроме того, каждая предотвращенная доза облучения в 1 м-Зв экономически эквивалентна сохранению одного года трудоспособной жизни человека.

Опыт реабилитационных мероприятий Брянской области позволяет взять его за основу в решении вопросов экологической защиты подобных регионов. Так, применение химических удобрений на больших сельскохозяйственных площадях улучшало промывку цезия-137 [4-6]. На кислых почвах эффективно вносились калийные удобрения после извести, при этом урожай очищался от цезия-137 в 15 раз [4-6]. В системе внесения удобрений учитывались поддержание и воспроизводство плодородия с запасом для нейтрализации радиоактивного загрязнения территорий [4-6, 8].

Дефицит удобрений при проведении реабилитационных мероприятий покрывается внесением только на небольших площадях повышенного радиоактивного загрязнения: например, в местах замкнутых понижений, где происходит концентрация цезия-137 в результате водной миграции. Там образуются радиоактивные цезиевые пятна, которые нейтрализуются при внесении повышенных доз минеральных удобрений с последующей промывкой [8].

Количество осадков, частота оттепелей зимой, заморозки весной и летом, температура воздуха, суточные колебания весеннего стока, толщина и плотность снежного покрова, кислотность воды и почв, скорость ветра и другое могут сильно повлиять на эффективность очистки почв от цезия-137 [8, 9].

Дефляция почв является наиболее опасной в теплые и засушливые периоды года (апрель и май) [10]. Вероятность получения большой дозы внешнего и внутреннего облучения в этот период особенно высока.

Ухудшение здоровья и сокращение продолжительности жизни от получаемых доз облучения происходят до настоящего времени, особенно там, где они превышают предельно допустимые показатели, и влияние их на здоровье населения изучено не до конца.

Цель исследований: экологическая защита радиоактивно загрязненных или находящихся в опасности загрязнения территорий

путем оросительных мелиораций, активного использования химических удобрений в сочетании с приемами интенсификации промывки почв и снижения поступления радионуклидов в растения, организмы животных и человека, миграционного движения вглубь почвы или к местам улавливания радионуклидов.

Снижение дозы внешнего облучения населения играет важную роль в уменьшении экологической опасности территорий, защите здоровья населения, продлении трудоспособной человеческой жизни. Главными задачами при дефиците водных ресурсов на землях населенных пунктов с небольшим количеством жителей, личных хозяйств, сельскохозяйственных угодий, средних и малых по площади являются: достижение от применения мелиоративных технологий нормативных показателей, опасных для здоровья внешнего и внутреннего облучения, 1 м-Зв/год и ниже; сохранение плодородия обедненных почв; создание условий, предотвращающих сокращение продолжительности жизни, приостанавливающих негативную миграцию радионуклидов в окружающую среду; повышение качества и объема растениеводческой и животноводческой продукции; включение мелиоративных мероприятий в целевые государственные реабилитационные программы, улучшающие качество жизни согласно новым, современным требованиям.

На землях в районах Брянской области в результате аварии на Чернобыльской атомной станции произошло радиационное загрязнение и перераспределение радиоактивных элементов (в основном цезия-137) в результате миграции с воздушными и водными потоками. Это вызвало необходимость производственной проверки рекомендуемых нами мелиоративных мероприятий для защиты подобных территорий и изменения их водохозяйственного, экологического значения.

Материалы и методы исследований.

Для проверки отбирались образцы почв и проводились полевые исследования в местах наиболее загрязненных районов Брянской области, особенно вблизи малых населенных пунктов. Там, где концентрация цезия могла достигать наивысших значений в результате особенностей миграции, нами особенно тщательно обследовались ложбины, балки, высохшие русла рек и каналов, опустошенные водохранилища, водосборы замкнутых понижений включая микропонижения площадью до 5 га.

В полевых условиях радиационный фон определялся приборами СРП-68-01, РКСБ-104-Белвар, ДКГ-03Д-«Грач» [11].

Выполнение поставленной задачи требовало специальной подготовки и экипировки (пробоотборники, контейнеры, ручные буры и др.), ознакомления с правилами и положениями о полевых исследованиях [11]. С полученными пробами в лаборатории гидравлики БГАУ изучалась миграция радионуклидов с фильтрационным потоком, главным образом – в слоях грунта, различных по механическому составу и радиоактивному загрязнению. Управление процессом выщелачивания цезия-137 проводилось при подаче воды с использованием химических удобрений и других способов интенсификации. Учитывались температурные условия, плотность, влажность и агрегатное состояние почв. Удельная радиоактивность пробы с помощью прибора РУБ-01П6 определялась после каждого промывного цикла. Перед этим выполнялись сушка, восстановление агрегатного состояния (дробление и пропуск через сито) и хранение в герметичной упаковке [11].

Многочисленные опыты, поставленные в радиометрической лаборатории, направлены на выявление эффективности промывки до нормативных показателей и точности полученных результатов.

Результаты и их обсуждение. На выщелачивание цезия сильно влияют природные факторы, изменяющие физические свойства почв, но их необходимо дополнять для закрепления получаемого эффекта, не допуская отката к прежнему состоянию. С этим могут справиться водохозяйственные мелиоративные мероприятия, помогая в скорейшем очищении радиоактивно загрязненных почв и снижении дозы внешнего облучения, и как следствие – в снижении накопления дозы внутреннего облучения.

Климатический фактор влияет на эффективность очистки и экономичность водохозяйственных мероприятий, так как в основном от него зависят затраты водных, энергетических и трудовых ресурсов.

Талые и внутриснежные воды в зимний и весенний периоды для вымыва цезия – наилучший вариант, а переменное замораживание и оттаивание почвы усиливают эффект выщелачивания за счет разрушения частиц грунтовых коллоидов [8, 9].

Верхний слой почвы, замерзая, задерживает углекислый газ, образующийся в ее нижних слоях, который начинает бурно высвобождаться в весенний период. Повышенное содержание CO_2 улучшает десорбирующую способность воды и образует активные ионы HCO_3^- и CO_3^{2-} , что способствует активному выщелачиванию цезия-137.

В зимне-весенний период процесс вымывания цезия-137 в полевом эксперименте происходил довольно интенсивно [8]. Фактически углекислый газ, появившийся после оттаивания замерзшей корочки на поверхности почвы, ускорил выщелачивание цезия.

Реабилитационные работы, проведенные агрономами, были малоэффективными без применения промывных мелиоративных мероприятий. Для повышения эффективности и сокращения срока достижения нормативных показателей загрязнения необходимо задаться целью создания экологической защиты для снижения уровней внешнего облучения и опасного развития внутреннего облучения.

Таким образом, на особенность наших исследований повлияла необходимость защиты здоровья и сохранения продолжительности жизни на законодательном уровне для людей, оставшихся и работающих на данных территориях.

При присутствии КСl в почвенном растворе цезий лучше всего десорбируется из средних и крупных фракций песка [4, 5, 8]. В легкосуглинистой почве наблюдается такая же картина: 183 Бк/кг, 10-й цикл (табл. 2).

В лабораторных условиях при промывке песчаной почвы методом полива, затоплением при начальной удельной активности 11916 Бк/кг, испытан хлористый калий, который вносили с 12-го цикла после обработки воды и почвы интенсификаторами (ультразвук и воздушный компрессор), 5 циклов подряд (7-11 циклы). Промывка в 13-м цикле, выполнявшаяся при внесенной дозе хлористого калия 259 кг/га в верхний почвенный слой толщиной 2 см, уменьшила удельную активность почвы на 205 Бк/кг, что было пересчитано по эквиваленту на индивидуальную предотвращенную дозу облучения 0,7 мЗв/год [8].

Подвижность цезия-137 в почве повышается от внесения аммонийных удобрений, а если доза превышает потребность растений, то происходит накопление цезия урожаем [4, 5].

В эксперименте растворенный в поливной воде аммоний эффективно воздействовал на радионуклиды, обеспечивая вымывание как из верхнего (159 Бк/кг, 11-й цикл), так и из нижележащего слоев образца почвы (табл. 2). Внесение же аммония гранулами не обеспечивало вымывания из верхнего слоя почвы, но цезий начинал вымываться из нижних, менее загрязненных слоев, – 129,4 Бк/кг, 12-й цикл (табл. 2) [8].

В лаборатории изучали влияние известности при выщелачивании цезия-137 из легкосуглинистой почвы с исходной удельной

радиоактивностью 4682 Бк/кг. Промывку почвы провели способом капельного орошения. Известь-пушонка в 10-м промывном цикле в количестве 4,55 г (доза – 1,7 т/га) способствовала снижению удельной радиоактивности почвы на 102 Бк/кг, что эквивалентно предотвращенной индивидуальной дозе облучения 0,349 мЗв/год, а для 1000 чел. – предотвращенной коллективной дозе облучения 0,349 чел. – Зв/год [8].

Предотвращенная доза облучения может стать экономически ощутимой при повышении уровня доходности на душу населения. Значительным эффект вымывания был при внесении известкового молока в разведенной пропорции с водой 1 : 10, доза 2,8 т/га. Такой способ является наиболее предпочтительным, так как улучшает коллоидную структуру почвы, фиксируя в ней цезий, направляя постепенное вымывание вглубь почвы, повышая защиту от внешнего облучения. Эффект можно усилить, сочетая внесение известковых и органических удобрений (торфа или навоза КРС) с определенным перерывом.

В лаборатории промывалась дерново-подзолистая легкосуглинистая почва при исходной удельной активности 2105 Бк/кг с использованием навоза КРС. Почву взяли в экологически опасной Чернобыльской зоне, а навоз был нерадиоактивным. Скорость фильтрации в экспериментах увеличивалась в 2-3 раза при внесении в почву навоза КРС в количестве 10% от массы сухой почвы. Средние значения скорости с навозом и без навоза составляли 0,0264 и 0,0108 см/мин соответственно [8].

Навоз КРС способствует значительному снижению удельных затрат воды на выщелачивание 1 Бк/кг. Возрастает защитная роль навоза в снижении дозы внешнего облучения, его фиксирующая способность с последующим эффективным вымыванием цезия. Количество воды 37,8 м³/га, потраченное с использованием навоза на вымывание 1 Бк/кг, намного меньше в сравнении с промывкой затопления чистой водой [8]. Нерадиоактивный навоз КРС делает выщелачивание цезия-137 целесообразным за счет предотвращенной дозы внешнего облучения. При этом повышается плодородие почв, снижается содержание цезия в единице урожая культур. Для этих же целей, но значительно реже и в меньших объемах может использоваться другой вид навоза – свиной или птичий.

Поступающие с сельскохозяйственных полей дренажные воды богаты различными питательными элементами и минералами, которые могут быть повторно внесены при промывке радиоактивных почв, делая замкнутый водооборот

экологически целесообразным. Азот, фосфор, калий, кальций, магний будут способствовать ускорению выщелачивания цезия-137 из радиоактивной почвы при комбинированном внесении с промывкой [8].

В лабораторных опытах рассматривали промывку дренажной водой из магистрального канала (МК) осушительной системы поселка Колодезский Новозыбковского района (экологическая зона отселения) при подаче дождеванием. Исследовалась легкосуглинистая и супесчаная почва, взятая в той же зоне, на способы выщелачивания цезия-137. За полив одного цикла с использованием воды МК из легкосуглинистой почвы вымылось из верхнего и в среднем из нижних слоев 118 Бк/кг и 67 Бк/кг соответственно (табл. 2). Следующий цикл при использовании только дистиллированной воды показал выщелачивание из верхнего и нижних слоев образца почвы 114 Бк/кг и 93 Бк/кг соответственно [8]. Так сказались на выщелачивании последствие удобрений – КСI в 10-м цикле и селитры в 11, 12 циклах (табл. 2) и воды МК.

В супесчаной почве в 10-м цикле выщелачивание составляло 187 Бк/кг, в следующих двух циклах – 373 Бк/кг и 240 Бк/кг в среднем по двум слоям при поливе водой из магистрального канала [8].

Показатели являются достаточными для скорейшего оздоровления территории и защиты сельскохозяйственных угодий.

В режиме активного использования орошения миграционная способность радионуклида цезия, несомненно, возрастет, поэтому важно использовать способы фиксации цезия-137 в перерывах между поливными циклами и периодами промывки, чтобы приостановить негативную миграцию и направить ее в нужном направлении [12-14]. Для этой цели хорошо подойдут цеолитовые фильтры, расположенные в местах концентрации радионуклидов. В итоге тщательного исследования различных конструкций таких фильтров нами получены удовлетворительные результаты для смеси гранулированного цеолита и мелкого щебня диаметром 2-5 мм в соотношении 1 к 1,5 (рис. 1) [8].

Съемные цеолитовые кассеты легко накапливают радионуклиды в поглотительных колодцах замкнутых понижений (рис. 2), а также быстро регенерируются в результате возрастающей десорбирующей способности при установлении промывного режима. Цеолитовые фильтры можно как устанавливать сверху вокруг скважины для перехвата поверхностного стока, так и заглублять в почву для фиксации там радионуклидов

Таблица 2. Вымыв цезия из легкосуглинистой почвы периодическими поливами при использовании воды МК

Table 2. Leaching cesium from light loamy soil by periodic watering when using MC water

№ цикла/ the cycle	C_c перв. слой Бк/кг/ C_c the first layer Bq / kg	t сут/ day	W литр/ liter	ΣW нараст. литр/ increase. liter	C_c вто- рой слой Бк/кг/ C_c the second layer Bq / kg	ΔC_c Бк/кг/ ΔC_c Bq / kg	$C_{\text{песок}}$ 3-ый слой Бк/кг/ C_{sand} 3-rd layer Bq / kg	C_{IV} 4-ый слой Бк/кг/ C_{IV} 4-rd layer Bq / kg	C_{V} 5-ой слой Бк/кг/ C_{V} 5-rd layer Bq / kg	Э Вымыв. / E washing %	Каче- ство воды/ Water quality
Начало / beginning	4234				4240		30,9	30,9	30,9		
1	4090	6	1,6	1,6	4130	144	41,1	44,6	40,8	3,4	дожд. / rain
2	4050	5	1,3	2,9	4028	40	76,4	45,9	54	4,3	дожд. / rain
3	4051	6	1,1	4,0	4029	+1	143,8	44,1	50,1	4,3	дожд. / rain
4	4005	6	1,6	5,6	4015	46	146,1	48,7	49,5	5,4	дожд. / rain
5	4006	6	1,6	7,2	4012	+1	165,9	48,3	69,3	5,4	дожд. / rain
6	3943	6	1,8	9,0	3892	63	152	48,3	48,7	6,9	снеговая / snow
7	3844	6	1,8	10,8	3874	103	144,8	49,3	55,8	9,2	снеговая / snow
8	3819	7	2,0	12,8	3874	25	142,8	55,8	59	9,8	снеговая / snow
9	3778	6	1,8	14,6	3882	41	140,2	61,4	59,1	10,8	снеговая / snow
10	3595	6	1,8	16,4	3804	183	149	73,4	75,1	15,1	дист. / distilled, KCl.
11	3436	7	1,8	18,2	3656	159	128	50,2	53,2	18,8	селитра / ammon.nitrate
12	3444	6	1,8	20,0	3213	+8	129,4	61,8	50,2	18,6	селитра / ammon.nitrate
13	3413	9	2,0	22,0	3157	31	122,8	62,4	44,9	19,4	дистил. / distilled
14	3295	7	2,0	24,0	3090	118	121,6	60,8	43,85	22,2	вода МК / MC water
15	3181	7	2,0	26,0	2997	114	122,9	62	60,6	24,9	вода дист. / distilled water
16	3013	8	2,2	28,2	2884	168	106,9	68,1	53,3	28,8	селитра / ammon.nitrate
Σ		104									

Примечание: В 10-м цикле один полив из 5-ти был теплой дистиллированной водой.

Note: In the 10th cycle, one watering out of 5 was with warm distilled water

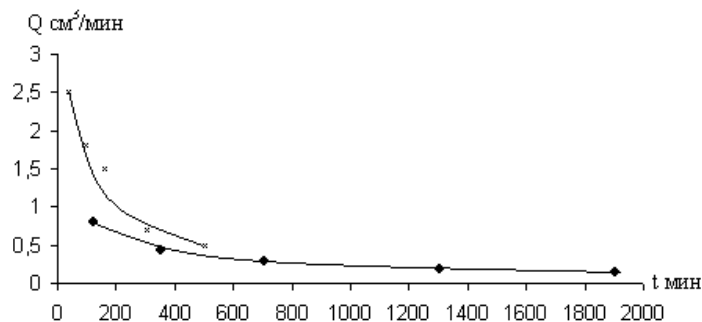


Рис. 1. Изменение скорости фильтрации воды через кассету во времени:

x – кассета из смеси цеолита со щебнем; ♦ – кассета из цеолита

Fig. 1. Change in the water filtration rate through the cassette over time

x – cassette made of a mixture of zeolite and crushed stone; ♦ – a zeolite cassette



Рис. 2. Схемы размещения колодцев-поглотителей с цеолитовыми фильтрами на водосборных площадях

Fig. 2. Schemes for the placement of wells-absorbers with zeolite filters in catchment areas

для последующего удаления путем замены касеты или промывки в нижележащие слои. Также цеолиты неплохо регенерируются при высушивании. Кроме того, цеолитовые фильтры отлично подойдут для перехвата радионуклидов на дне осушительных и нагорно-ловчих каналов, в устьях ложбин и собирателей, что способствует дополнительной защите территории.

Выводы

1. Решение проблем мелиорации радиоактивно загрязненных или находящихся

в опасности загрязнения территорий должно базироваться на использовании интенсификации орошения, химических удобрений в сочетании с установкой в замкнутых понижениях улавливающих цеолитовых конструкций, фиксации цезия в почвенных коллоидах при применении известкования и органических удобрений. Для надежности защиты цеолитовые фильтры также устанавливаются в осушительных и нагорно-ловчих каналах, собирателях в ложбинах. Вода из осушительного канала МК имеет наилучший показатель промывки (супесчаные почвы 373 Бк/кг в среднем по двум слоям).

2. Проведенные нами многочисленные опыты показали, что выщелачивание цезия-137 непосредственно зависит от скорости фильтрационного потока в загрязненном почвенном слое и легкости быстрого поглощения (фиксации и отдачи) воды почвой. При предварительном глубоком рыхлении и обработке интенсификаторами хлористый калий, аммиачная селитра в жидком виде, известь и навоз КРС, внесенные в верхний слой почвы 10 см с определенным перерывом экономически обоснованными дозами, дают хорошие результаты промывки.

3. Необходимо ускорить срок реабилитации загрязненных территорий до нормативных показателей, создать новые реабилитационные программы, включающие в себя мелиоративные мероприятия, учесть климатический фактор, условия для сохранения продолжительности трудоспособной жизни, качества растениеводческой и животноводческой продукции на законодательном уровне.

Список использованных источников

1. Методика оценки радиационных рисков на основе данных мониторинга радиационной обстановки: Рекомендации. Р 52.18.787-2013. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2014.
2. Черкасова Н.Г., Машура Ю.К., Овчинникова А.Е. Исследование условий накопления радионуклидов деревьями хвойных и лиственных пород в зонах потенциального радиационного загрязнения // *Journal of Agriculture and Environment*. 2024. № 9 (49).
3. Уткин А.А., Нода И.Б. Содержание и распределение радионуклидов в профиле светло-серой лесной почвы и растениях агроценозов // *Агрохимия*. 2024. № 7. С. 73-81. DOI: 10.31857/S0002188124070094. EDN: CFJKZO
4. Анненков Б.Н., Юдинцева Е.В. Основы сельскохозяйственной радиологии. М.: Агропромиздат, 1991.
5. Белоус Н.М., Шаповалов В.Ф. Продуктивность пашни и реабилитация песчаных почв // Брянск: БГСХА, 2006. EDN: SDPIWJ
6. Фесенко С.В., Прудников П.В., Емлютина Е.С., Елифанова И.Э. и др. Динамика содержания ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции Брянской области после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи // *Радиационная гигиена*. 2022. № 15 (4). С. 45-57. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-45-57>

References

1. "Recommendations R52.18.787-2013" ("Methodology for assessing radiation risks based on radiation monitoring data"), Obninsk, VNIIGMI – MCD, 2014.
2. Cherkasova N.G., Mashura Y.K., Ovchinnikova A.E. Investigation of the conditions of accumulation of radionuclides by coniferous and deciduous trees in areas of potential radiation contamination // *Journal of Agriculture and Environment*. 2024. №9 (49).
3. Utkin A.A., Noda I.B. The content and distribution of radionuclides in the profile of light gray forest soil and plants of agrocenoses // *Agrochemistry*. 2024. No. 7. P. 73-81. DOI: 10.31857/S0002188124070094. EDN: CFJKZO.
4. Annenkov B.N., Yudinseva E.V. Fundamentals of agricultural radiology // Moscow: Agropromizdat, 1991.
5. Belous N.M., Shapovalov V.F. Productivity of arable land and rehabilitation of sandy soils // Bryansk: BSCA. 2006. EDN: SDPIWJ
6. Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Emlyutina E.S., Epifanova I.E., Shubina O.A. Dynamics of ¹³⁷Cs content in agricultural products of the Bryansk region after the Chernobyl accident: grain, potatoes and vegetables. *Radiation hygiene*. 2022;15(4):45-57. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-45-57>

7. Сорокин Ф.Г., Шукин М.В., Содбоев Ц.Ц., Абелев Г.О. Распределение Cs-137 в цепи почва-растения-животное (крупный рогатый скот) в условиях радиоактивно загрязненных территорий Брянской области // Ветеринарный врач. 2025. № 2. С. 94-102.

8. Василенков С.В. Водохозяйственные реабилитационные мероприятия на радиоактивно загрязненных территориях: Монография. М.: Изд-во МГУП, 2009. 290 с. EDN: VQLMGD

9. Лепорский О.Р., Седов С.Н., Шоба С.А., Бганцов В.Н. Роль промораживания в разрушении первичных минералов подзолистых почв // Почвоведение. 1990. № 6. С. 112-116.

10. Трегубов П.С., Зверханский Н.В. Борьба с эрозией почв в Нечерноземье. Л.: Колос, Ленинградское отделение, 1981. 160 с.

11. Василенков С.В. Вода и цезий. Более ста лабораторных работ. М.: МГУП, 2010. 604 с. EDN: TVKWRF

12. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Варфоломеева К.В. Вертикальное распределение ¹³⁷Cs в дерново-подзолистой песчаной почве на лугах и в лесах Брянской области в 2015-2016 гг. // Радиационная гигиена. 2019. № 12 (3). С. 27-41. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-3-27-41>

13. Прохоров А.В. Моделирование миграции радионуклидов в почве // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013 № 3. С. 21-23. EDN: QCOKGV

14. Василенков С.В. Удельные затраты воды при промывке радиоактивно загрязненных почв // Природообустройство. 2023. № 4. С. 6-14. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-6-14. EDN: IYMOWW

Информация об авторе

Сергей Валерьевич Василенков, д-р техн. наук, доцент кафедры природообустройства и водопользования Брянский ГАУ; SPIN-код: 3228-6401, ID-787096; ORCID: 0009-0009-2027-394X; Scopus ID: 36645351000; vasilenkov_serгей@mail.ru

Критерии авторства / Criteria for authorship.

Василенков С.В. выполнил теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись, имеет на статью авторское право и несёт ответственность за плагиат.

Поступила в редакцию / Received 04.09.2025

Поступила после рецензирования / Received 30.03.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 01.04.2026

7. Sorokin F.G., Shchukin M.V., Sodboev C.C., Abelev G.O. Distribution of Cs-137 in the soil-plant-animal chain (cattle) in the conditions of radioactively contaminated territories of the Bryansk region // Veterinarian. 2025. No. 2. P. 94-102.

8. Vasilenkov S.V. Water management rehabilitation measures in radioactively contaminated territories // monograph – Moscow: MGUP Publishing House, 2009. 290 p. EDN: VQLMGD

9. Leporsky O.R., Sedov S.N., Shoba S.A., Bgantsov V.N. The role of freezing in the destruction of primary minerals in podzolic soils. 1990. No. 6. P. 112-116.

10. Tregubov P.S., Zverkhansky N.V. Combating soil erosion in the Non-Chernozem region. – L.: Kolos, Leningrad branch, 1981. 160 p.

11. Vasilenkov S.V. Water and cesium. More than a hundred laboratory works. Moscow: Moscow State University of Environmental Management, 2010. 604 p. EDN: TVKWRF

12. Ramzaev V.P., Barkovsky A.N., Varfolomeeva K.V. Vertical distribution of ¹³⁷Cs in sod-podzolic sandy soil in meadows and forests of the Bryansk region in 2015-2016. Radiation hygiene. 2019;12(3):27-41. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-3-27-41>

13. Prokhorov A.V. Modeling of radionuclide migration in soil / A.V. Prokhorov // Actual problems of humanities and natural sciences. 2013. No. 3. P. 21-23. EDN: QCOKGV

14. Vasilenkov S.V. Unit costs of water during washing of radioactively contaminated soils // Prirodoobustrojstvo. 2023. No. 4. P. 6-14. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-4-6-14. EDN: IYMOWW

Information about the author

Sergey V. Vasilenkov, DSs (Tech), Associate Professor of the Department of Environmental Management and Water Use; Bryansk State Agrarian University; SPIN code: 3228-6401, ID-787096; ORCID: 0009-0009-2027-394X; Scopus ID: 36645351000; vasilenkov_serгей@mail.ru

Vasilenkov S.V. performed theoretical research, on the basis of which he generalized and wrote a manuscript, he has a copyright for the article and he is responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

УДК 631.675: 551.583

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-24-30>

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕНДЕНЦИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ОБОСНОВАНИЕ ОРОСИТЕЛЬНЫХ НОРМ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ БУРУНДИ

Максимов С.А.¹, Головинов Е.Э.², Ичитегетсе И.^{3✉}^{1,2} ФГБНУ Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация¹ ORCID: 0000-0001-7359-2228, s.a.maksimov@mail.ru² ORCID: 0000-0002-7035-8046, golovinov@mail.ru³ ORCID: 0009-0004-5052-4803, citegetseinnocent@gmail.com

Аннотация. Как и во всех других регионах Африки, в Республике Бурунди изменение климата оказывает существенное влияние на орошаемое земледелие. Увеличивающаяся продолжительность и частота засушливых периодов, изменение температурного режима создают повышенные требования к обеспечению оптимальной влажности корнеобитаемого слоя почвы для сельскохозяйственных культур. Поэтому орошение в земледелии переходит из категории «желаемого» в категорию «обязательного», или «необходимого». Климатические изменения в Республике Бурунди диктуют необходимость перехода от традиционных методов ирригации к современным гибким, высокоточным ресурсосберегающим и эффективно управляемым методам в орошаемом земледелии: таким, как дождевание, капельное, подкоровое или комбинированное орошение, обеспечивающим расширенное воспроизводство плодородия почвы, устойчивые высокие урожаи, экономию всех вовлеченных ресурсов и минимизирующим ущерб, наносимый окружающей среде. Расхождения в данных об осадках имеют наиболее существенное практическое значение для обоснования режимов орошения. Систематическое занижение осадков реанализом приводит к завышению расчетных оросительных норм, что влечет за собой перерасход водных и энергетических ресурсов и риски переувлажнения почвы. В то же время повышение температуры и формирование более сурового температурного режима требуют дополнительного обоснования расчетной обеспеченности при определении проектных режимов орошения и накладывают повышенные требования к точности технологий орошения, оперативному управлению поливами. Цель исследований заключалась в научном обосновании дифференцированных режимов орошения кукурузы для трех характерных участков ландшафтной катены агромелиоративного региона Имбо Республики Бурунди с учетом типов почв, данных реанализа и изменения климата.

Ключевые слов: орошаемое земледелие, режим орошения, изменение климата, пространственная неоднородность температурных изменений

Формат цитирования: Оценка влияния тенденций изменения климата на обоснование оросительных норм в условиях Республики Бурунди. Природообустройство. 2026;Т.19(2):24-30. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-24-30>

Original article

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE TRENDS ON THE JUSTIFICATION OF IRRIGATION STANDARDS IN THE REPUBLIC OF BURUNDI

S.A. Maksimov¹, E.E. Golovinov², Icitegetse Innocent^{3✉}^{1,2} FGBNU Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov,

Russian Federation Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Российская Федерация

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov, Russian Federation¹ ORCID: 0000-0001-7359-2228, s.a.maksimov@mail.ru² ORCID: 0000-0002-7035-8046, golovinov@mail.ru³ ORCID: 0009-0004-5052-4803, citegetseinnocent@gmail.com

Abstract. As in all other regions of Africa, climate change has a significant impact on irrigated agriculture in the Republic of Burundi. The increasing duration and frequency of dry periods and the increase

in temperature conditions create increased requirements for ensuring optimal moisture content of the root soil layer for crops, and therefore irrigation in agriculture is moving from the category of “desirable” to the category of “mandatory” or “necessary”. Climatic changes in the Republic of Burundi dictate the need to switch from traditional irrigation methods to modern flexible, high-precision, resource-saving and efficiently managed methods in irrigated agriculture, such as sprinkling, drip, crown or combined irrigation, providing enhanced reproduction of soil fertility, sustained high yields, saving all resources involved and minimizing environmental damage. Discrepancies in precipitation data are of the most significant practical importance for the justification of irrigation regimes. Systematic underestimation of precipitation by reanalysis leads to an overestimation of estimated irrigation standards, which leads to overspending of water and energy resources and risks of waterlogging the soil. At the same time, an increase in temperature and the formation of a more severe temperature regime requires additional justification of estimated availability when determining design irrigation regimes and imposes increased requirements on the accuracy of irrigation technologies and operational irrigation management. The purpose of the conducted research. Scientific substantiation of differentiated corn irrigation regimes for three characteristic sites of the landscape catena of the Imbo agro-reclamation region of the Republic of Burundi, taking into account soil types, reanalysis data and climate change.

Keywords: irrigated agriculture, irrigation regime, climate change, spatial heterogeneity of temperature changes

Citation format: Maksimov S.A., Golovinov E.E., Icitegetse Innocent. Assessment of the impact of climate change trends on the justification of irrigation standards in the republic of Burundi. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):24-30. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-24-30>

Введение. В последние годы многие исследователи подтверждают тенденции изменения климата в различных регионах планеты. Глобальные исследования документируют повышение температуры, превышающее прогнозы климатических моделей в региональных очагах потепления, с антропогенно обусловленным потеплением, очевидным с начала XX в. [1, 2]. В своей работе М. Collins и др. подчеркивают появление климатических сигналов от экватора до полюсов, особо выделяя уязвимость тропических регионов [3].

На Африканском континенте изменение климата проявляется через ускоренное потепление со скоростью $0,3^{\circ}\text{C}$ за десятилетие, существенно превышающее глобальные средние значения. При этом температура в Восточной Африке повысилась на $1,1-1,4^{\circ}\text{C}$ со времен доиндустриальной эпохи [4]. Континент сталкивается с интенсификацией засух, наводнений и волн тепла, серьезно влияющих на продовольственную безопасность через снижение производства сельскохозяйственных культур [5].

Главной угрозой изменения климата для сельского хозяйства является его аридизация, что приводит к резкому обезвоживанию территорий и усилению дефицита водных ресурсов [6]. Следовательно, обеспеченность водными ресурсами является одним из ключевых факторов, определяющих возможности развития оросительных систем в Республике Бурунди. Обоснование режимов орошения требует достоверных климатических данных для расчета водопотребления

сельскохозяйственных культур [7]. Традиционно для этих целей используются данные метеорологических станций. Однако в условиях развивающихся стран сеть наблюдений характеризуется недостаточной пространственной плотностью и наличием пропусков в рядах данных. Альтернативой являются данные климатического реанализа: такие, как AgERA5, специально разработанные для агрометеорологических применений и обеспечивающие пространственно непрерывное покрытие территории [8].

Исследования посвящены выявлению изменений основных климатических параметров и оценке их влияния на принятие решений при назначении режимов полива в орошаемом земледелии в условиях Республики Бурунди.

Цель исследований: научное обоснование дифференцированных режимов орошения кукурузы для трех характерных участков ландшафтной catena агромелиоративного региона Имбо Республики Бурунди с учетом типов почв, данных реанализа и изменения климата.

Материалы и методы исследований. Исследования основаны на анализе климатических данных метеостанции Буджумбура ($3,32^{\circ}$ ю.ш., $29,32^{\circ}$ в.д., высота – 783 м) и данных реанализа AgERA5 за период 1991-2020 гг. Для анализа использовались среднемесячные значения температуры воздуха, относительной влажности воздуха и данные суммарных месячных осадков.

Температура воздуха. Приведенные на рисунке 1 сведения показывают, что средняя температура воздуха, по данным метеостанции,

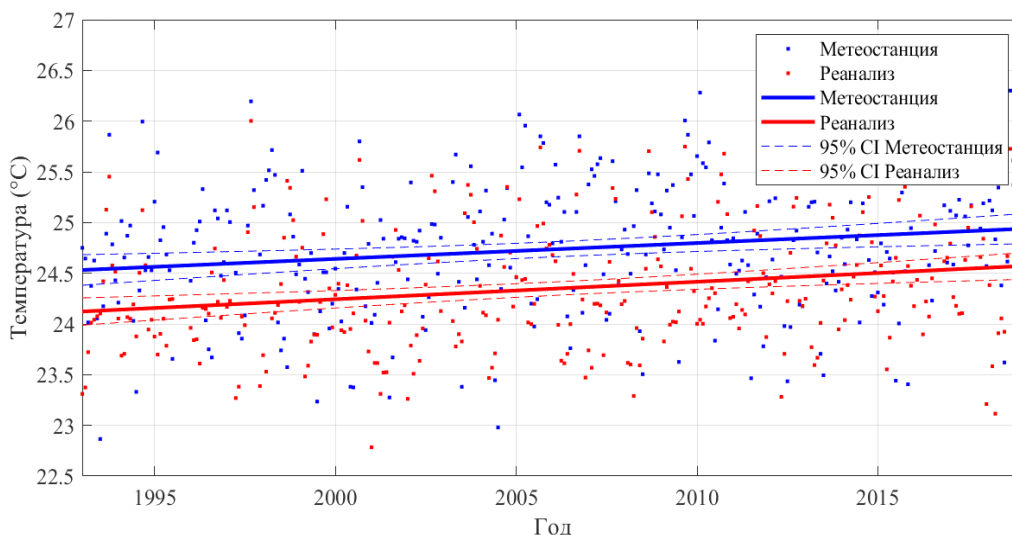


Рис. 1. Изменение температуры воздуха по данным метеостанции Бужумбура (3,32° ю.ш., 29,32° в.д., высота – 783 м) и данные реанализа AgERA5 за период 1991-2020 гг.

Fig. 1. Changes in air temperature according to the data of the Bujumbura weather station (3.32° S (southern latitude), 29.32° E (eastern longitude), altitude 783 m) and AgERA5 reanalysis data for the period 1991-2020

составляет около 24,7°C, тогда как реанализ демонстрирует систематически более низкие значения – около 24,2°C. Систематическое расхождение составляет приблизительно 0,5°C. Обе линии тренда демонстрируют слабую положительную тенденцию повышения температуры на 0,5-0,7°C за анализируемый период, что согласуется с региональными трендами потепления климата в тропической Африке (рис. 1). Доверительные интервалы обоих источников частично перекрываются, что свидетельствует о статистической согласованности данных.

Карта пространственного распределения изменения среднегодовой температуры демонстрирует выраженную неоднородность климатических изменений на территории Бурунди (рис. 2).

Анализ изменения среднегодовой температуры за период 1991-2020 гг. демонстрирует выраженную территориальную неоднородность с градиентом от 0,3 до 0,9°C. Минимальное потепление (+0,3-0,4°C) наблюдается вдоль западного побережья озера Танганьика благодаря его мощному терморегулирующему эффекту, тогда как центральное плато испытывает максимальное повышение температуры (+0,8-0,9°C) вследствие отсутствия крупных водных стабилизаторов климата и интенсивного антропогенного воздействия. Озеро Виктория оказывает косвенное смягчающее влияние на северо-восточные районы (+0,5-0,6°C) через региональную атмосферную циркуляцию и повышение влажности воздуха.

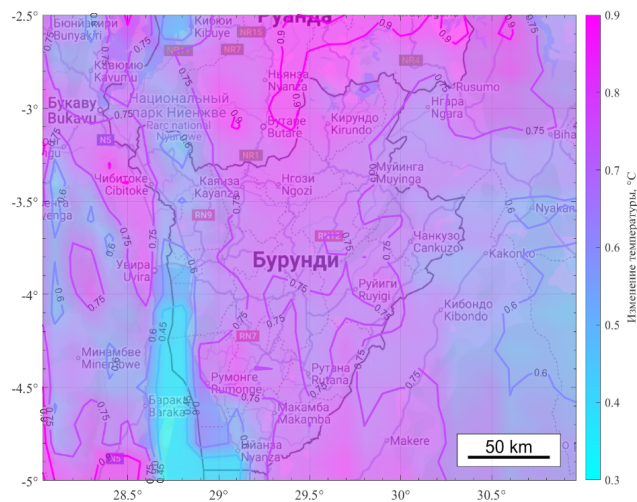


Рис. 2. Изменение температуры воздуха на территории Республики Бурунди по данным реанализа AgERA5 за период с 1991 по 2020 гг.

(на рисунке по оси X и Y показаны градусы географических координат рассматриваемой территории Республики Бурунди)

Fig. 2. Changes in air temperature in the territory of the Republic of Burundi according to the data of AgERA5 reanalysis for the period from 1991 to 2020 (the figure shows the degrees of geographical coordinates of the territory of the Republic of Burundi on the X and Y axis)

Относительная влажность воздуха. Среднее значение, по данным метеостанции, составляет около 71%, тогда как реанализ демонстрирует систематически более низкие значения – около 64% (рис. 3).

Линии тренда обоих источников практически горизонтальны, что указывает на отсутствие значимых изменений средней относительной влажности за период наблюдений.

Систематическое занижение влажности данными реанализа обусловлено особенностями модельных расчетов с пространственным усреднением, не учитывающим в полной мере влияния локальных источников влаги.

Суммарные месячные осадки. Оба источника данных демонстрируют значительное изменение количества суммарных месячных

осадков (с 52 до 67 мм по метеостанции Вужумбура, с 34 до 55 мм по реанализу AgERA5 за период 1991-2020 гг.) и высокую вариабельность с многочисленными экстремальными значениями, достигающими 180...200 мм. Обе линии тренда показывают тенденцию увеличения годовых осадков за период наблюдений. Недооценка реанализом экстремальных осадков связана с пространственным усреднением и особенностями параметризации конвективных процессов в численной модели (рис. 4).

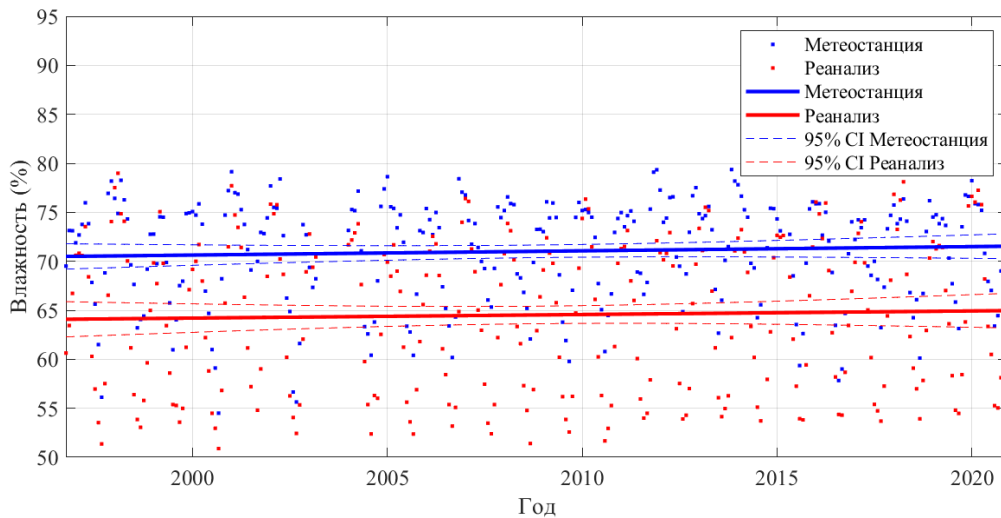


Рис. 3. Среднемесячная влажность воздуха по данным метеостанции Вужумбура (3,32° ю.ш., 29,32° в.д., высота – 783 м) и данных реанализа AgERA5 за период 1991-2020 гг.

Fig. 3. Average monthly air humidity according to the data of the Vujumbura weather station (3.32° southern latitude, 29.32° eastern longitude, altitude 783 m) and AgERA5 reanalysis data for the period 1991-2020

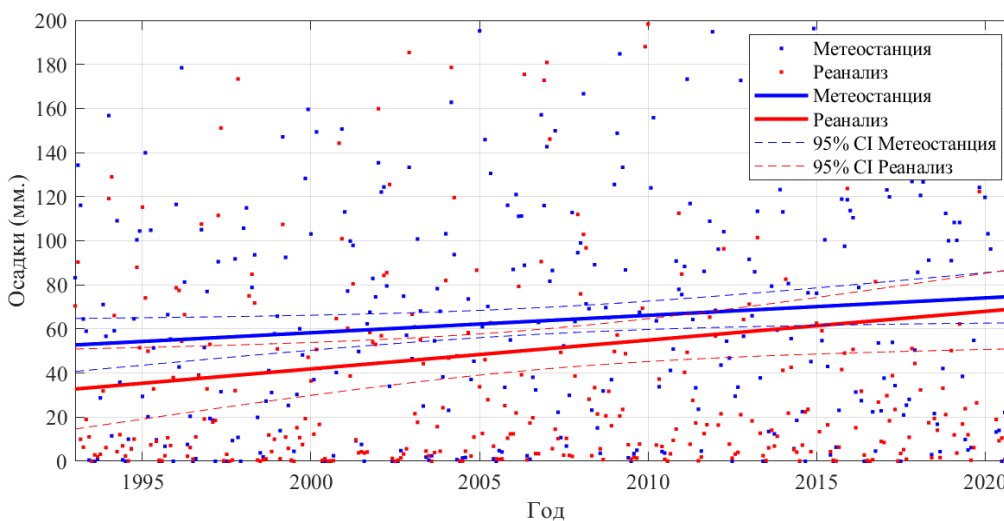


Рис. 4. Суммарные месячные осадки по данным метеостанции Вужумбура (3,32° ю.ш., 29,32° в.д., высота – 783 м) и данным реанализа AgERA5 за период 1991-2020 гг.

Fig. 4. Total monthly precipitation according to the Vujumbura weather station (3.32°S (southern latitude), 29.32° E (eastern longitude), altitude 783 m) and AgERA5 reanalysis data for the period 1991-2020

Результаты и их обсуждение. Выявленное повышение температуры на 0,3-0,5°C за период 1991-2020 гг. имеет прямые последствия для орошаемого земледелия, приводя к росту эвапотранспирации сельскохозяйственных культур и повышению водопотребления. Пространственная неоднородность температурных изменений требует дифференцированного подхода к планированию режимов орошения по агроклиматическим зонам. Западная равнина Имбо, являющаяся основным районом орошаемого земледелия страны, характеризуется максимальными темпами потепления.

Систематическое занижение относительной влажности на 7% имеет более существенное значение, поскольку она является критическим параметром, определяющим дефицит влажности воздуха. Занижение влажности приводит к завышению расчетной эвапотранспирации примерно на 8-10%, что является критичным для определения поливных норм, особенно в сухой сезон.

Наши исследования показывают, что температура воздуха, по данным метеостанции Буджумбура (3,32° ю.ш., 29,32° в.д., высота – 783 м) и данным реанализа AgERA5, за период 1991-2020 гг. изменилась почти на 1,5°C.

Карта пространственного распределения изменения среднегодовой температуры демонстрирует выраженную неоднородность климатических изменений на территории Бурунди. В целом по всей площади территории Бурунди за последние годы выявлена тенденция повышения среднегодовой температуры на 0,3-0,5°C за анализируемый период с выраженной пространственной неоднородностью. Западные низменные районы характеризуются максимальными темпами потепления, что требует учета при обосновании режимов орошения. В то же время суммарные месячные осадки, по данным метеостанции Буджумбура (3,32° ю.ш., 29,32° в.д., высота – 783 м) и данным реанализа AgERA5, за период 1991-2020 гг. увеличились на 5-7 мм.

Следует отметить, что в целом сопоставительный анализ данных реанализа AgERA5 и метеостанции Буджумбура за период 1991-2020 гг. выявил систематические расхождения по всем анализируемым климатическим параметрам. Реанализ систематически занижает температуру воздуха на 0,5°C, относительную влажность – на 7%, суммарные осадки – на 17-20% по сравнению с данными непосредственных наблюдений. Поскольку эффективные осадки, усваиваемые корнеобитаемым слоем почвы, напрямую вычитаются из потребности культур в воде при определении оросительной нормы,

расхождения в данных об осадках имеют наиболее существенное практическое значение для обоснования режимов орошения. Систематическое занижение осадков приводит к пропорциональному завышению расчетной оросительной нормы.

Применимость данных реанализа для обоснования режимов орошения существенно различается по агроклиматическим зонам Республики Бурунди. Для западной низменности, где расположена относительно плотная сеть метеостанций, приоритетным является использование данных непосредственных наблюдений. Данные реанализа целесообразно применять для заполнения пропусков в рядах наблюдений и пространственной интерполяции между метеостанциями.

Точность климатических данных имеет различную критичность в разные сезоны года. В сухой сезон, с июня по август, когда осадки минимальны, данные реанализа являются приемлемыми для практического применения. Влажные сезоны характеризуются максимальной изменчивостью осадков, и точность данных об осадках является критичной для определения эффективных осадков и оросительных норм.

Выводы

1. Как и во всех других регионах Африки, в Республике Бурунди изменение климата оказывает существенное влияние на орошаемое земледелие. Увеличивающаяся продолжительность и частота засушливых периодов, изменение температурного режима создают повышенные требования к обеспечению оптимальной влажности корнеобитаемого слоя почвы для сельскохозяйственных культур, поэтому орошение в земледелии переходит из категории «желаемого» в категорию «обязательного», или «необходимого».

2. Земледелие в Республике Бурунди, как основа продовольственной безопасности, становится менее предсказуемым ввиду нарушения циклов смены засушливого и влажного периодов, аридизации климата в засушливый период и непредсказуемости амплитуды и частоты осадков во влажный период. Как отмечают многие исследователи и показывают произведенные нами расчеты, за последние 20 лет изменчивость выпадения осадков увеличилась на 15-20%, а более суrowые засушливые периоды с ростом температуры воздуха и почвенного покрова, испаряемости делают невозможным получение питательных веществ для растений.

3. По сведениям из открытых источников, урожайность сельскохозяйственных культур

в среднем упала на 25-30%. Это обстоятельство усугубляется несовершенством традиционных технологий орошения и ирригационной инфраструктуры в Республике Бурунди, что в свою очередь требует существенных капиталовложений для их развития.

4. Климатические изменения в Республике Бурунди диктуют необходимость перехода от традиционных методов ирригации к современным гибким, высокоточным ресурсосберегающим и эффективно управляемым методам в орошаемом земледелии: таким, как дождевание, капельное, подкрановое или комбинированное орошение, обеспечивающим расширенное воспроизводство, плодородие почвы, устойчивые высокие урожаи, экономию всех вовлеченных

ресурсов и минимизирующим ущерб, наносимый окружающей среде.

5. Расхождения в данных об осадках имеют наиболее существенное практическое значение для обоснования режимов орошения. Систематическое занижение осадков реанализом приводит к завышению расчетных оросительных норм, что влечет за собой перерасход водных и энергетических ресурсов и риски переувлажнения почвы. В то же время повышение температуры и формирование более сурового температурного режима требуют дополнительного обоснования расчетной обеспеченности при определении проектных режимов орошения и предъявляют повышенные требования к точности технологий орошения и оперативному управлению поливами.

Список использованных источников

1. Daniel Chukwuma Nzereogu, Umoru Grema Baizan (2025). Recent Trends and Emerging Research in Climate Change: A Review with Focus on Nigeria and Sub-Saharan Africa. 12(10). <https://doi.org/10.51244/IJRSL.2025.1210000023>
2. Amir Agha Kouchak, Felicia Chiang, Laurie S. Huning, Charlotte A. Love, Iman Mallakpour, Omid Mazdiyasn, Hamed Moftakhari, Simon Michael Papalexio, Elisa Ragno, Mojtaba Sadegh. 2020. Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World. Annual Review Earth and Planetary Sciences. 48:519-548. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055228>
3. Collins, Matthew, Jonathan D. Beverley, Thomas J. Bracegirdle, Jennifer L. Catto, Michelle McCrystall, Andrea J. Dittus, Nicolas Freychet et al., 2024. Emerging signals of climate change from the equator to the poles: new insights into a warming world. Frontiers in Science, 2. <https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1340323>
4. Kew Sarah, Sjoukje Philip, Mathias Hauser, Mike Hobbins, Niko Wanders, Geert Jan van Oldenborgh, Karin van der Wiel et al. 2021. Impact of precipitation and increasing temperatures on drought trends in eastern Africa. Earth System Dynamics (1), 12:17-35. <https://doi.org/10.5194/esd-12-17-2021>
5. Koné, Sita A. Baldé, Pam Zahonogo and Safiétou Sanfo. 2024. A systematic review of recent estimations of climate change impact on agriculture and adaptation strategies perspectives in Africa. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change (2), 29. <https://doi.org/10.1007/s11027-024-10115-7>
6. Adeyeri, Oluwafemi E. 2025. Hydrology and Climate Change in Africa: Contemporary Challenges, and Future Resilience Pathways. Water 17. № 15:2247. <https://doi.org/10.3390/w17152247>
7. Нийонзима Нестор; Биоклиматическое обоснование необходимости орошения и осушения земель бассейна реки Русизи: Республика Бурунди: диссертация ... кандидата технических наук: 06.01.02 / Нийонзима Нестор; [Место защиты: Моск. гос. ун-т природообустройства]. Москва, 2013. 229 с.: ил.
8. Solangi G., Shah S., Alharbi R., Panhwar S., Keerio H., Kim T., Memon J. & Bughio A. (2022). Investigation of Irrigation Water Requirements for Major Crops Using CROPWAT Model Based on Climate Data. Water. <https://doi.org/10.3390/w14162578>
9. Copernicus Climate Change Service (2020): Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.6c68c9bb
10. Soulis K., Dosiadis E., Nikitakis E., Charalambopoulos I., Kairis O., Katsogiannou A., Gravani S. & Kalivas D. (2025). Assessing AgERA5 and MERRA-2 Global Climate

References

1. Daniel Chukwuma Nzereogu, Umoru Grema Baizan (2025). Recent Trends and Emerging Research in Climate Change: A Review with Focus on Nigeria and Sub-Saharan Africa., 12(10), <https://doi.org/10.51244/IJRSL.2025.1210000023>
2. Amir AghaKouchak, Felicia Chiang, Laurie S. Huning, Charlotte A. Love, Iman Mallakpour, Omid Mazdiyasn, Hamed Moftakhari, Simon Michael Papalexio, Elisa Ragno, Mojtaba Sadegh. 2020. Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World. Annual Review Earth and Planetary Sciences. 48:519-548. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055228>
3. Collins, Matthew, Jonathan D. Beverley, Thomas J. Bracegirdle, Jennifer L. Catto, Michelle McCrystall, Andrea J. Dittus, Nicolas Freychet et al., 2024. “Emerging signals of climate change from the equator to the poles: new insights into a warming world”, Frontiers in Science, 2. <https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1340323>
4. Kew, Sarah, Sjoukje Philip, Mathias Hauser, Mike Hobbins, Niko Wanders, Geert Jan van Oldenborgh, Karin van der Wiel et al., 2021. “Impact of precipitation and increasing temperatures on drought trends in eastern Africa”, Earth System Dynamics(1), 12:17-35. <https://doi.org/10.5194/esd-12-17-2021>
5. Koné, Sita A. Baldé, Pam Zahonogo, and Safiétou Sanfo, 2024. “A systematic review of recent estimations of climate change impact on agriculture and adaptation strategies perspectives in Africa”, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change(2), 29. <https://doi.org/10.1007/s11027-024-10115-7>
6. Adeyeri, Oluwafemi E. 2025. “Hydrology and Climate Change in Africa: Contemporary Challenges, and Future Resilience Pathways” Water 17, no. 15: 2247. <https://doi.org/10.3390/w17152247>
7. Niyonzima Nestor; Bioclimatic justification of the need for irrigation and drainage of lands in the Rusizi river basin: Republic of Burundi: dissertation... Candidate of Technical Sciences: 06.01.02 / Niyonzima Nestor; [Place of protection: Moscow State University of Environmental Management]. Moscow, 2013. 229 p.: ill.
8. Solangi G., Shah S., Alharbi R., Panhwar S., Keerio H., Kim T., Memon J., & Bughio A. (2022). Investigation of Irrigation Water Requirements for Major Crops Using CROPWAT Model Based on Climate Data. Water. <https://doi.org/10.3390/w14162578>
9. Copernicus Climate Change Service (2020): Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.6c68c9bb

Datasets for Small-Scale Agricultural Applications. Atmosphere. <https://doi.org/10.3390/atmos16030263>

11. Vanella D., Longo-Minnolo G., Belfiore O., Ramírez-Cuesta J., Pappalardo S., Consoli S., D'Urso G., Chirico G., Coppola A., Comegna A., Toscano A., Quarta R., Provenzan G., Ippolito M., Castagna A. & Gandolfi C. (2022). Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101182>

12. Rolle M., Tamea S. & Claps P. (2021). ERA5-based global assessment of irrigation requirement and validation. *PLoS ONE*, 16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250979>

10. Soulis K., Dosiadis E., Nikitakis E., Charalambopoulos I., Kairis O., Katsogiannou A., Gravani S., & Kalivas D. (2025). Assessing AgERA5 and MERRA-2 Global Climate Datasets for Small-Scale Agricultural Applications. Atmosphere. <https://doi.org/10.3390/atmos16030263>

11. Vanella D., Longo-Minnolo G., Belfiore O., Ramírez-Cuesta J., Pappalardo S., Consoli S., D'Urso G., Chirico G., Coppola A., Comegna A., Toscano A., Quarta R., Provenzano G., Ippolito M., Castagna A., & Gandolfi C. (2022). Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101182>

12. Rolle M., Tamea S., & Claps P. (2021). ERA5-based global assessment of irrigation requirement and validation. *PLoS ONE*, 16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250979>

Информация об авторах

Сергей Алексеевич Максимов, профессор, главный научный сотрудник, заведующий отделом мелиорации земель ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», SPIN-код: 1836-1054, Author ID: 190775, ORCID: 0000-0001-7359-2228, s.a.maksimov@mail.ru

Евгений Эдуардович Головинов, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией Автоматизации оперативного управления процессами при мелиорации земель ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», SPIN-код: 1513-1674, Author ID: 671002, ORCID: 0000-0002-7035-8046, golovinov@mail.ru

Инносент Ичитегетсе, аспирант, кафедра сельскохозяйственных мелиораций РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева, SPIN-код: 3352-4984, Author ID: 1273590, ORCID: 0009-0004-5052-4803, citegetseinnocent@gmail.com

Information about the authors

Sergey A. Maksimov, DSs (Tech), Associate Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory for Automation of Operational Process Management in Land Reclamation, Federal State Budgetary Scientific Institution "FNC VNIIGiM named after A.N. Kostyakov", SPIN code: 1836-1054, Author ID: 190775, ORCID: 0000-0001-7359-2228, s.a.maksimov@mail.ru

Evgeny E. Golovinov, CSs (Tech), Senior Researcher, Head of the Laboratory for Automation of Operational Process Management in Land Reclamation, Federal State Budgetary Scientific Institution "FNC VNIIGiM named after A.N. Kostyakov", SPIN code: 1513-1674, Author ID: 671002, ORCID: 0000-0002-7035-8046, golovinov@mail.ru

Innocent Icitetse, Post graduate student, Department of Agricultural Land Reclamation, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, SPIN code: 3352-4984, Author ID: 1273590, ORCID: 0009-0004-5052-4803, citegetseinnocent@gmail.com

Вклад авторов

С.А. Максимов – формулирование идеи исследования, научное руководство и редактирование рукописи

Е.Э. Головинов – обработка и анализ данных

Инносент Ичитегетсе – подготовка первоначального варианта рукописи и участие в редактировании текста

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию / Received 18.03.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Received 28.04.2026

Принята к публикации / Accepted 29.04.2026

Author Contributions

S.A. Maksimov – conception of the research idea, scientific supervision and the manuscript editing;

E.E. Golovinov – data processing and analysis;

Innocent Icitetse – preparation of the first draft of the manuscript and participation in the manuscript editing.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Оригинальная статья

УДК 631.6:624.131.276:614.849

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-31-38>



ВЫНУЖДЕННОЕ ЗАЖИГАНИЕ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ ОТ ВЫХЛОПНЫХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОТ

О.Н. Дидманидзе¹, А.В. Евграфов², А.С. Гузалов³, А.В. Куриленко⁴, Д.А. Москвичев⁵

^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; Москва, Российская Федерация

¹ didmanidze@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-2558-0585

² labpoliv@list.ru; ORCID: 0000-0002-2313-2191

³ aguzalov@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3526-4332

⁴ a.kurilenko@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-3661-1121

⁵ moskvichev@rgau-msha.ru; ORCID: 0009-0002-7082-4876

Аннотация. Цель исследований – оценить вероятность возникновения пожара на торфяной почве при тепловом воздействии выхлопных систем автомобилей в местах обслуживания сельскохозяйственной техники в полевых условиях. В статье приведены результаты экспериментальных исследований способности к вынужденному зажиганию торфяных почв на примере Тверской области при организации заправки сельскохозяйственной техники во время проведения полевых работ. Система отработавших газов автомобиля, расположенная под днищем, нагревается до высоких температур (300-800°C). В полевых условиях сельскохозяйственной техники заправка топливом происходит непосредственно на местах, что подвергает торфяную почву тепловому воздействию выхлопных систем топливозаправщиков в течение до 60 мин. Для проведения экспериментальных исследований пожароопасности при вынужденном зажигании торфяных почв сельскохозяйственных угодий были отобраны образцы в Тверской области на территории земель сельскохозяйственного назначения. Экспериментальные исследования показали, что при температуре нагревательного элемента 400°C время зажигания торфа составляет от 14 до 25 мин. Вероятность возникновения вынужденного зажигания торфяной почвы в режиме тления весьма высока. Для предотвращения пожаров необходимы дополнительные противопожарные меры – такие, как теплоизоляция поверхности торфяной почвы и проведение пескования в местах обслуживания техники.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-16-00081 (URL: <https://rscf.ru/project/24-16-00081/>).

Ключевые слова: торфяная почва, объемная плотность, вынужденное зажигание, выхлопная система, пожары, земли сельскохозяйственного назначения, топливо

Для цитирования: Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Гузалов А.С., Куриленко А.В., Москвичев Д.А. Вынужденное зажигание торфяной почвы от выхлопных систем автомобилей при проведении сельскохозяйственных работ. Природообустройство. 2026;Т.19(2):31-38. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-31-38>

Scientific article

FORCED IGNITION OF PEAT SOIL FROM VEHICLE EXHAUST SYSTEMS DURING AGRICULTURAL WORK

O.N. Didmanidze¹, A.V. Evgrafov², A.S. Guzalov³, A.V. Kurilenko⁴, D.A. Moskvichev⁵

^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Goryachkin Institute of Mechanics and Power Engineering; Moscow, Russian Federation

¹ didmanidze@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-2558-0585

² labpoliv@list.ru; ORCID: 0000-0002-2313-2191

³ aguzalov@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3526-4332

⁴ a.kurilenko@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-3661-1121

⁵ moskvichev@rgau-msha.ru; ORCID: 0009-0002-7082-4876

Abstract. This article presents the results of experimental studies on the potential for forced ignition of peat soils, using the Tver Region as an example, when refueling agricultural machinery during fieldwork. The vehicle's exhaust system, located under the vehicle's body, reaches high temperatures (300-800°C).

In the field, agricultural machinery is refueled directly on-site, exposing the peat soil to the heat of the exhaust systems of fuel trucks for up to 60 minutes. To conduct experimental studies of the fire hazard of forced ignition of peat soils on agricultural land, samples were collected from agricultural land in the Tver Region. Experimental studies showed that at a heating element temperature of 400°C, the ignition time for peat ranges from 14 to 25 minutes. The likelihood of forced ignition of peat soil in smoldering mode is very high. To prevent fires, additional fire safety measures are required, such as thermal insulation of the peat soil surface and sanding in areas where equipment is serviced.

The studies were supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 25-26-00132. (URL: <https://rscf.ru/project/24-16-00081/>).

Keywords: peat soil, bulk density, forced ignition, exhaust system, fires, agricultural land, fuel

For citation: Didmanidze O.N., Evgrafov A.V., Guzalov A.S., Kurilenko A.V., Moskvichev D.A. Forced ignition of peat soil from vehicle exhaust systems during agricultural work. *Prirodobustrojstvo*. 2026;19(2):31-38. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-31-38>

Введение. Организация заправки мобильными средствами включает в себя заправку различной техники поочередно, что занимает примерно 1 ч до опустошения топливной цистерны, а также наполнение цистерны топливом на полевым нефтескладе, переезд от нефтесклада к управляемым автомобилям и возвращение на нефтесклад для повторного наполнения цистерны. Каждая из этих операций связана с определенной затратой времени [1].

Возникновение торфяных пожаров от автомобильных двигателей и выхлопных систем – это частый случай, который особенно опасен ввиду массовости и кажущейся безобидности при выполнении полевых дозаправок, происходящих, как правило, на краю поля. Выхлопная труба, и особенно каталитический конвертер (в бензиновых двигателях), разогреваются до очень высоких температур – от 400 до 800°C и более. Для воспламенения сухой травы или торфяной пыли достаточно температуры около 350-400°C [2].

Для заправки самоходной сельскохозяйственной техники в полевых условиях могут использоваться механизированные средства (передвижные автозаправочные станции (АТЗ), автомобили-заправщики, автомобили-цистерны). Преимущество использования автомобилей-топливозаправщиков и механизированных средств заправки заключается в том, что по сравнению с применением ручных средств сроки заправки сокращаются в 2-3 раза [3]. Раскаленный металл выхлопной системы автомобиля – сравнительно такой же источник огня, как и непотушенный костер.

Самоходная сельскохозяйственная техника поочередно подъезжает к обслуживаемому звену (АТЗ), и в зависимости от емкости бака (и самой сельскохозяйственной техники) осуществляется процесс заправки [4]. В малых и средних хозяйствах чаще всего применяются автомобили

на базе УАЗ-330365, имеющие объем цистерны 3 м³. Данный объем за один раз может обслужить 3 трактора МТЗ-80/82, 2 трактора Т-150(К) и зерноуборочный комбайн NOVA 340, что в среднем по времени занимает интервал от 20 до 30 мин.

Заправка осуществляется следующим образом:

– автомобиль УАЗ-330365 подъезжает на край поля либо, при наличии, – на специальную подготовленную площадку;

– сельхозмашины заезжают поочередно.

Движение организуется так, чтобы исключить столкновения и помехи.

Несмотря на то, что двигатель заправляемой машины и двигатель топливозаправщика должны быть заглушены, температура остывания нагретых элементов снижается достаточно медленно. В некоторых случаях этим правилом пренебрегают, что может привести к возникновению пожароопасной ситуации.

Цель исследований: оценить вероятность возникновения пожара на торфяной почве при тепловом воздействии выхлопных систем автомобилей в местах обслуживания сельскохозяйственной техники в полевых условиях.

Материалы и методы исследований. Для проведения экспериментальных исследований пожароопасности при вынужденном зажигании торфяных почв сельскохозяйственных угодий были отобраны образцы в Тверской области на территории земель сельскохозяйственного назначения согласно методике [5] (рис. 1), определен их физико-химический состав (табл. 1).

Из данных характеристики торфа, приведенных в таблице, следует, что он обладает степенью разложения 33,4, зольностью 75,87% и невысоким содержанием углерода (21,54). Это говорит о том, что степень его пожароопасности является невысокой и воспламенение может произойти только при более высокой температуре [6, 7].

Таблица 1. Химический состав образцов торфа

Table 1. Chemical composition of peat samples

№	Гигроскопическая влажность, % / <i>Hygroscopic humidity, %</i>	Сера подвижная, млн ⁻¹ / <i>Mobile sulfur, mln⁻¹</i>	Массовая доля железа, млн ⁻¹ / <i>Mass fraction of iron, mln⁻¹</i>	Массовая доля зольности, % / <i>Mass fraction of ash content, %</i>	Общий (органический) углерод, % / <i>Total (organic) carbon, %</i>	Степень разложения, % / <i>Degradation rate, %</i>
	ГОСТ 5180 / <i>GOST 5180</i>	ГОСТ 26490 / <i>GOST 26490</i>	М МВИ-80-2008 / <i>M MVI-80-2008</i>	ГОСТ 27784-88 / <i>GOST 27784-88</i>	Метод сухого сжигания / <i>Dry incineration method</i>	ГОСТ 10650 / <i>GOST 10650</i>
Т	14,29	18,7	3188	75,87	21,54	33,4

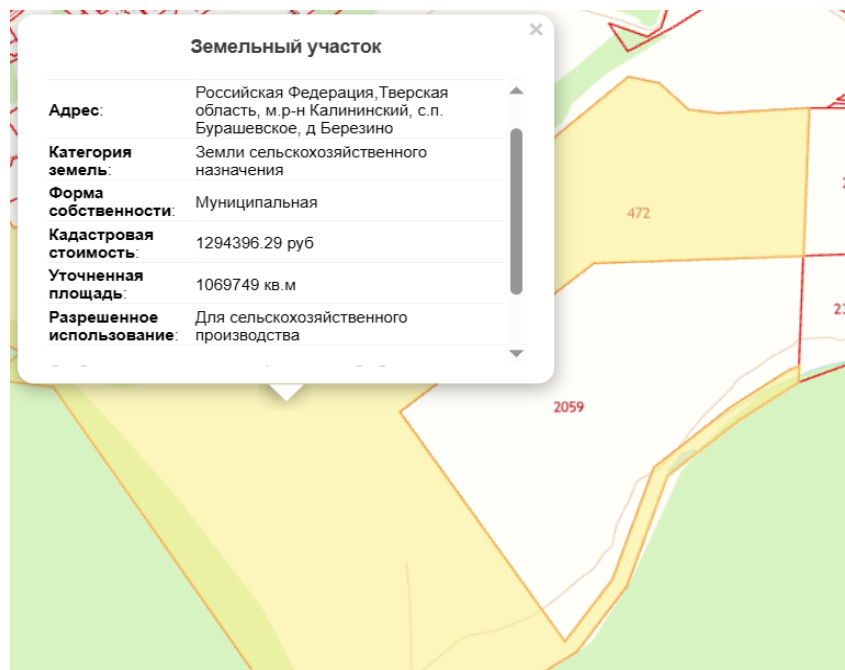


Рис. 1. Местоположение отобранных образцов торфа Тверской области

Fig1. Location of selected peat samples in the Tver region

Для проведения экспериментальных исследований возгорания отобранных образцов торфа от нагретых тел была применена следующая методика. В контейнер цилиндрической формы К30У, изготовленный из латунной сетки с ячейкой 0,8 мм и размером 30 × 30 мм, по рекомендации ВНИИПО, были установлены два полых медных цилиндра, верх которых закрыт латунной сеткой (рис. 2, 3). В контейнер загружался испытуемый материал.

Высота медных направляющих составляла 30 и 15 мм, что соответствует поверхности расположения образца торфа и его теплофизического центра при размещении торфяной почвы в контейнере [8]. Далее, после загрузки контейнера торфяным образцом, он помещался в лабораторную установку (рис. 4, 5). В ней заранее были размещены термодары на специальной платформе, которые оказывались внутри медных направляющих. В экспериментальной установке также располагались термодары рядом с контейнером

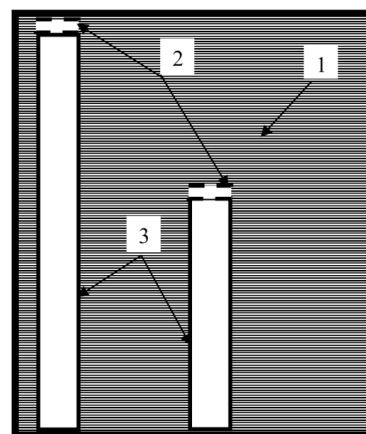


Рис. 2. Схема контейнера К30У:

1 – корпус контейнера цилиндрической формы размером 30 × 30 мм, выполненный из латунной сетки № 8; 2 – латунная сетка на медных полых цилиндрах; 3 – полые медные цилиндры

Fig. 2. Scheme of the K30U container where: 1 – cylindrical container body measuring 30 × 30 mm made of № 8 brass mesh; 2 – brass mesh on hollow copper cylinders; 3 – hollow copper cylinders

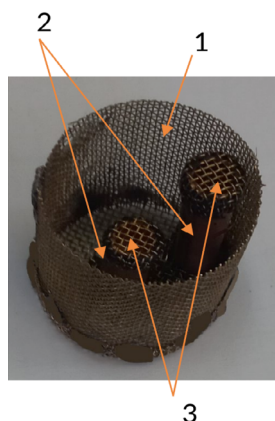


Рис. 3. Фотография контейнера К30У

Fig. 3. Photograph of the K30U container

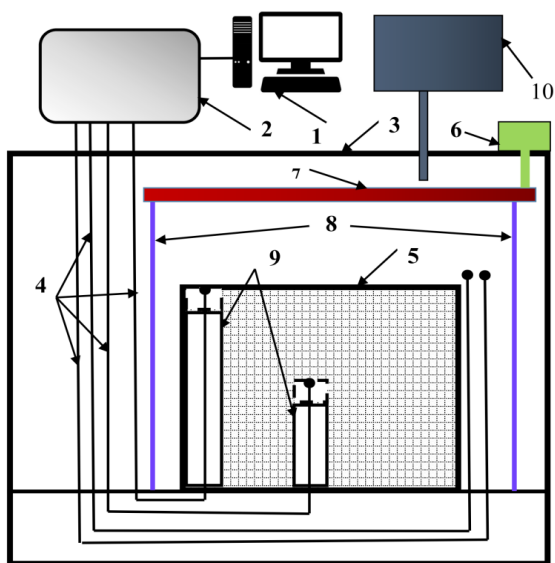


Рис. 4. Схема экспериментальной лабораторной установки:

1 – персональный компьютер;

- 2 – измеритель-регистратор на 4 канала OWEN, персональный компьютер с программным обеспечением OWEN; 3 – сушильный шкаф; 4 – термопары ДТКП-0.5-4 для измерения температуры торфяного образца в контейнере К30У и приземного слоя воздуха; 5 – контейнер К-30У; 6 – блок управления температурным режимом нагревательного элемента; 7 – нагревательный элемент; 8 – регулируемые стойки нагревательного элемента; 9 – медные полые цилиндры; 10 – 5-компонентный газоанализатор

Fig. 4. Schematic diagram of the experimental laboratory setup where: 1 – personal computer; 2-4-channel measuring recorder OWEN; personal computer with OWEN software; 3 – drying cabinet; 4 – thermocouples DTKP-0.5-4, for measuring the temperature of the peat sample in the K30U container and the surface air layer; 5 – container K-30U; 6 – control unit for the temperature mode of the heating element; 7 – heating element; 8 – adjustable racks of the heating element; 9 – copper hollow cylinders; 10 – five-component gas analyzer

для измерения температуры воздуха у поверхности образца торфяной почвы (приземный слой воздуха).

Для проведения экспериментальных исследований использовалось следующее оборудование: сушильный шкаф СНОЛ-3.5; термопары ДТКП-0.5-4; измеритель-регистратор 8 каналов OWEN; программное обеспечение OWEN; весы ACZET CY-513 (предел взвешивания – 510 г, точность – 0,001 г; контейнер из латунной сетки; 5-компонентный газоанализатор МЕТА АВТО-ТЕСТ-02.03П.

Эксперимент проводился по следующему алгоритму. Выставлялось расстояние Н от нагревательного элемента до поверхности контейнера К30У с образцом торфяной почвы, составлявшее 200, 150 и 100 мм; задавалась температура нагревательного элемента T_H 400°C; предварительно отобранные и высушенные образцы торфяной почвы загружались в контейнер К30У; весовым методом определялась объемная масса торфа в контейнере; контейнер с образцами загружался в экспериментальную установку после достижения нагревательного элемента заданной температуры, контролируемой блоком управления, где в процессе эксперимента каждую секунду снимались показания температуры с термопар, которые передавались через измеритель-регистратор на персональный компьютер и обрабатывались с помощью программного обеспечения OWEN; возникновение горения или тления торфяных образцов определялось по показаниям 5-компонентного газоанализатора (рис. 6, 7).

Каждый опыт проводился в 3-кратной повторности.

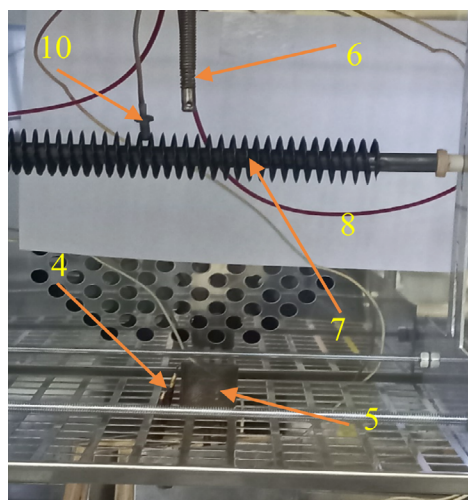


Рис. 5. Фотография внутренней компоновки элементов экспериментальной лабораторной установки

Fig. 5. Photograph of the internal layout of the experimental laboratory setup



Рис. 6. Показания газоанализатора при возникновении тления образца торфа

Fig. 6. Gas analyzer readings when a peat sample begins to smolder

Контейнер выдерживался в экспериментальной установке в течение 60 мин. Если за это время не происходило вынужденное загорание торфяной почвы в режиме горения или тления [10, 11], испытания останавливали, так как работа топливозаправщика по заправке сельскохозяйственной техники в полевых условиях составляет меньшее количество времени. В случае

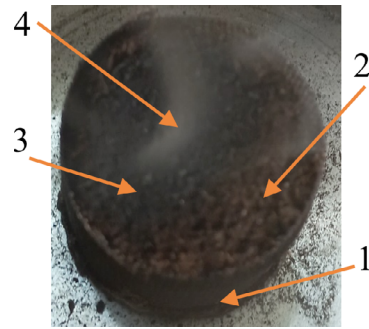


Рис. 7. Тление образца торфа:

1 – контейнер К30У; 2 – поверхность торфа; 3 – тление поверхности торфа; 4 – продукты тления

Fig. 7. Smoldering of a peat sample where: 1 – K30U container; 2 – peat surface; 3 – smoldering of the peat surface; 4 – smoldering products

их возникновения или отсутствия за выбранный интервал времени эксперимент прекращался.

Результаты и их обсуждение. Результаты экспериментальных исследований (табл. 2, рис. 8-10) показывают, что процесс возникновения

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований вынужденного загорания образцов торфа

Table 2. Results of experimental studies of forced ignition of peat samples

№	Н, мм	T_n , температура нагревательного элемента, °C T_n , temperature of the heating element, °C	T_z , температура загорания, °C T_n , temperature of the heating element, °C	ρ , Плотность, г/см ³ ρ , density, g/cm ³	τ , Время загорания, мин τ , ignition time, min	T_s , температура на поверхности торфа, °C T_w , temperature on the surface of peat, °C	Зажигание Ignition
1	200	400	200	0,7	25	177	Да
2	150	400	200	0,7	23	185	Да
3	100	400	200	0,7	14	198	Да

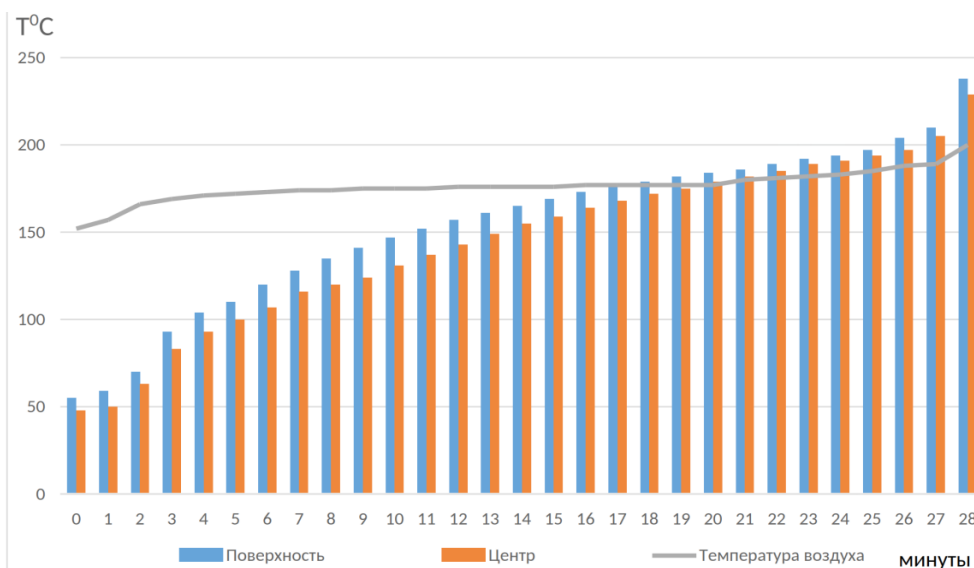


Рис. 8. Вынужденное загорание образца торфа при температуре нагревательного элемента 400°C и расстоянии 200 мм

Fig. 8. Forced ignition of peat sample at a heating element temperature of 400°C and a distance of 200 mm

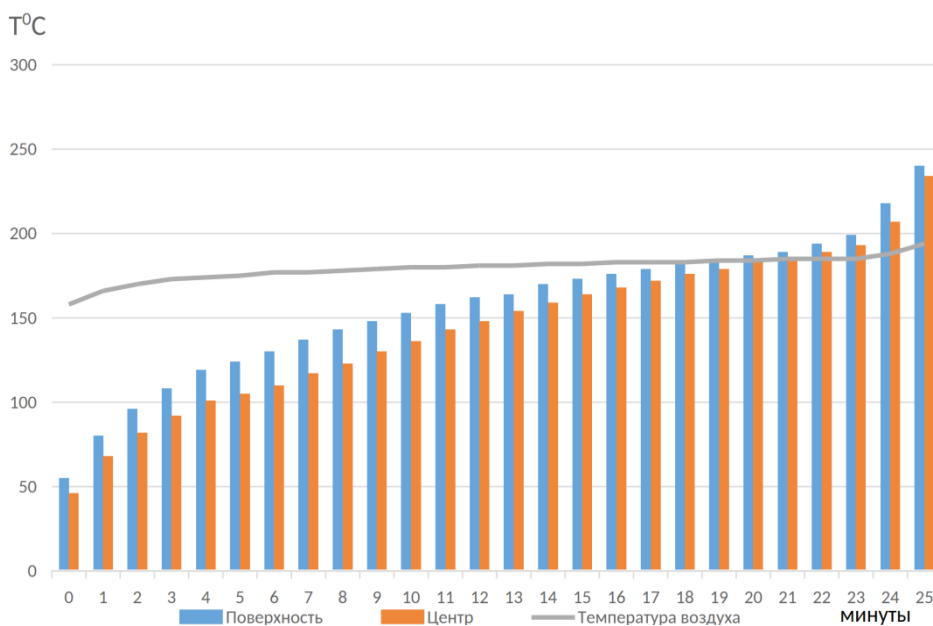


Рис. 9. Вынужденное зажигание образца торфа при температуре нагревательного элемента 400°C и расстоянии 150 мм

Fig. 9. Forced ignition of peat sample at a heating element temperature of 400°C and a distance of 150 mm

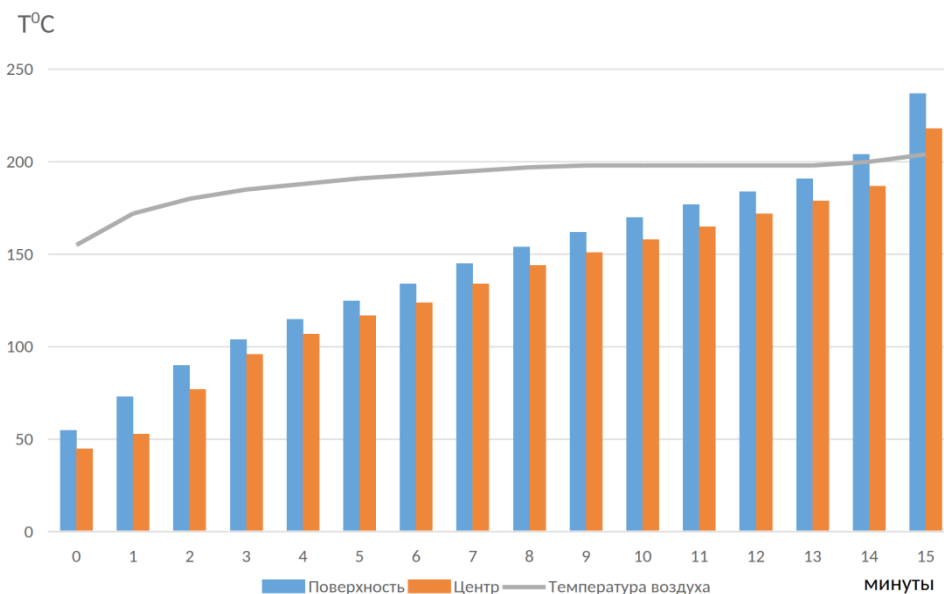


Рис. 10. Вынужденное зажигание образца торфа при температуре нагревательного элемента 400°C и расстоянии 100 мм

Fig. 10. Forced ignition of peat sample at a heating element temperature of 400°C and a distance of 100 mm

вынужденного зажигания происходил в режиме тления; переход в пламенное горение не зафиксирован на протяжении всего эксперимента.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показывают, что при заправке сельскохозяйственной техники в полевых условиях риск возникновения тления торфяной почвы от выхлопной системы топливозаправщика является высоким, причем время вынужденного зажигания при

торфе составляет от 14 до 25 мин в зависимости от расстояния от поверхности почвы до нагретых элементов. Следует отметить, что расстояние от глушителя топливозаправщика на базе автомобиля УАЗ-330365 до плоской поверхности составляет 200 мм. Это свидетельствует о высоком риске возникновения торфяного пожара с учетом того, что заправка нескольких единиц техники длится в течение 60 мин.

Выводы

1. Система отработавших газов автомобиля конструктивно располагается под его днищем и нагревается до высоких температур – в диапазоне от 300 до 800°C.

2. При проведении сельскохозяйственных работ в полевых условиях заправка техники топливом производится непосредственно на местах. При этом поверхность торфяной почвы подвергается тепловому воздействию выхлопных систем топливозаправщиков в течение до 60 мин.

3. В результате проведения экспериментальных исследований было установлено, что

время зажигания торфа составило от 14 до 25 мин при температуре нагревательного элемента, имитирующего глушитель автомобиля, 400°C.

4. Вероятность возникновения вынужденного зажигания торфяной почвы в режиме тления является очень высокой, что подтверждается исследованиями. Поэтому требуются дополнительные противопожарные мероприятия в местах обслуживания сельскохозяйственной техники в полевых условиях – такие, как дополнительная теплоизоляция поверхности торфяной почвы теплоизоляционными материалами и проведение пескования.

Список использованных источников

1. Нормы пожарной безопасности НПБ 111-98*. Автозаправочные станции. Требования пожарной безопасности: введ. приказом ГУПС МВД РФ от 23 марта 1998 г. № 25, с изм. и доп. от 2 февраля 1999 г., 8 ноября 2000 г., 20 июля 2001 г., 23 мая 2002 г.
2. Киселев Я.С., Хорошилов О.А., Демехин Ф.В. Физические модели горения в системе пожарной безопасности. Монография / МЧС России; Санкт-Петербургский государственный университет противопожарной службы. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. 347 с.
3. Пуляев Н.Н. Моделирование и эксплуатация топливозаправочных комплексов в АПК: Учебное пособие. М.: ООО УМЦ «Триада», 2016. 175 с. EDN: VRLFJY
4. Дидманидзе О.Н., Есеновский-Лашков Ю.К., Пильщиков В.Л. и др. Особенности конструкции специализированного подвижного состава: Учебное пособие. М.: Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, 2004. 53 с. EDN: RXLAFD
5. Рыбаков К.В., Дидманидзе О.Н., Карпекина Т.П., Пуляев Н.Н. Автозаправочные процессы и системы в полевых условиях: Учебное пособие. М.: УМЦ «ТРИАДА», 2004. 292 с.: ил.
6. ГОСТ Р 58595-2019. Почвы. Отбор проб: Национальный стандарт Российской Федерации: введ. 1 января 2020 г. Москва: Стандартинформ, 2019. 8 с.
7. Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Пуляев Н.Н., Гузалов А.С. Результаты исследований пожароопасности торфа в зависимости от степени его разложения на землях сельскохозяйственного назначения // Природообустройство. 2024. № 4. С. 26-33. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-26-33>
8. Experimental Studies on Peat Soils' Fire Hazard Based on Their Physical and Chemical Properties: The Vasilievsky Mokh Deposit Beneath the Tver Region Agricultural Lands / O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov, A.S. Guzalov [et al.] // Fire. 2025. Vol. 8, № 2. P. 68. DOI: 10.3390/fire8020068.
9. Evgrafov A., Guzalov A., Moskvichev D. Experimental studies of temperature-dynamic properties of peat soils in agricultural lands // E3S Web of Conferences: XI International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, Termez, Uzbekistan, 31 октября – 2 ноября 2024 г. Termez, Uzbekistan: EDP Sciences, 2025. P. 5003. DOI: 10.1051/e3sconf/202561305003.
10. Muraleedharan T. & Radojevic, Miroslav & Waugh, Allan & Caruana, Anthony. (2000). Emissions from the combustion of peat: An experimental study. Atmospheric Environment – ATMOS ENVIRON. 34. 3033-3035. 10.1016/S1352-2310(99)00512-9.
11. Hu Yuqi & Christensen, Eirik & Restuccia, Francesco & Rein, Guillermo. (2018). Transient gas and particle emissions from smouldering combustion of peat. Proceedings of the Combustion Institute. 37. 10.1016/j.proci.2018.06.008.

References

1. Fire safety standards NPB111-98* "Gas stations. Fire safety requirements" (introduced by Order of the Main Directorate of Fire Protection of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation dated March 23, 1998, No. 25) (with amendments and additions. dated February 2, 1999, November 8, 2000, July 20, 2001, May 23, 2002)
2. Kiselev Ya.S., Khoroshilov O.A., Demekhin F.V. Physical Models of Combustion in the Fire Safety System: Monograph / Ministry of Emergency Situations of Russia; St. Petersburg State University of Fire Service. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2009. 347 p.
3. Pulyayev N.N. Modeling and Operation of Fuel Refueling Complexes in the Agro-Industrial Complex. Textbook. Moscow: UMC Triada LLC, 2016. 175 p. EDN: VRLFJY
- 3 Features of the design of specialized rolling stock / O.N. Didmanidze Yu.K. Esenovskiy-Lashkov V.L. Pilshchikov [et al.]. Textbook. M.: Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin, 2004. 53 p. RXLAFD
4. Rybakov K.V., Didmanidze O.N., Karpekina T.P., and Pulyayev N.N. / Gas Station Processes and Systems in the Field. Textbook. // Moscow: UMC "TRIADA", 2004. 292 p.: ill.
5. GOST R58595-2019. Soils. Sampling: National Standard of the Russian Federation: date of introduction 2020-01-01. Moscow: Standartinform, 2019. 8 p.
6. Didmanidze O.N., Evgrafov A.V., Pulyayev N.N., Guzalov A.S. Results of studies of peat fire hazard depending on its degree of decomposition on agricultural lands. // Prirodobustroystvo. 2024. No. 4. P. 26-33. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-26-33>
7. Experimental Studies on Peat Soils' Fire Hazard Based on Their Physical and Chemical Properties: The Vasilievsky Mokh Deposit Beneath the Tver Region Agricultural Lands / O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov, A.S. Guzalov [et al.] // Fire. 2025. Vol. 8, No. 2. P. 68. DOI: 10.3390/fire8020068.
8. Evgrafov A. Experimental studies of temperature-dynamic properties of peat soils in agricultural lands / A. Evgrafov, A. Guzalov, D. Moskvichev // E3S Web of Conferences: XI International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, Termez, Uzbekistan, 31 октября – 02 2024 года. – Termez, Uzbekistan: EDP Sciences, 2025. P. 5003. DOI: 10.1051/e3sconf/202561305003.
10. Muraleedharan T. & Radojevic, Miroslav & Waugh, Allan & Caruana, Anthony. (2000). Emissions from the combustion of peat: An experimental study. Atmospheric Environment – ATMOS ENVIRON. 34. 3033-3035. 10.1016/S1352-2310(99)00512-9.
11. Hu, Yuqi & Christensen, Eirik & Restuccia, Francesco & Rein, Guillermo. (2018). Transient gas and particle emissions from smouldering combustion of peat. Proceedings of the Combustion Institute. 37. 10.1016/j.proci.2018.06.008.

Информация об авторах

Отари Назирович Дидманидзе, академик РАН, д-р техн. наук, профессор; ORCID: 0000-0003-2558-0585; AuthorID: 311972; didmanidze@rgau-msha.ru

Алексей Владимирович Евграфов, д-р техн. наук, доцент; ORCID: 0000-0002-2313-2191, AuthorID: 828739; labpoliv@list.ru

Артёмбек Сергеевич Гузалов, канд. техн. наук; ORCID: 0000-0003-3526-4332, AuthorID: 1036988; aguzalov@mail.ru

Алексей Викторович Куриленко, ассистент; ORCID: 0000-0003-3661-1121, AuthorID: 1099301; a.kurilenko@rgau-msha.ru

Москвичев Дмитрий Александрович, канд. техн. наук; ORCID: 0009-0002-7082-4876, AuthorID: 964662; moskvichev@rgau-msha.ru

Вклад авторов

О.Н. Дидманидзе – общее научное руководство исследованием, постановка проблемы и целей, разработка концепции эксперимента, привлечение финансирования (руководитель гранта РНФ № 24-16-00081), утверждение окончательного текста статьи.

А.В. Евграфов – разработка методологии экспериментальных исследований, координация проведения лабораторных испытаний, анализ полученных данных (температурные зависимости, время зажигания), подготовка первоначального текста рукописи, формулировка выводов, визуализация данных.

А.С. Гузалов – непосредственное проведение экспериментальных исследований (работа с установкой, контейнерами К30У), отбор образцов торфа в Тверской области, обработка первичных данных с газоанализатора и регистратора ОВЕН, участие в написании раздела «Материалы и методика».

А.В. Куриленко – определение физико-химических свойств образцов торфа (влажность, зольность, химический состав), работа с литературными источниками по пожароопасности свойств торфа, участие в анализе результатов и оформлении библиографического списка.

Д.А. Москвичев – техническая подготовка лабораторной установки, обеспечение работы измерительного оборудования, проведение статистической обработки результатов экспериментов, участие в визуализации данных и подготовке графических материалов.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию 03.02.2026

Поступила после рецензирования 19.03.2026

Принята к публикации 21.03.2026

Information about the authors

Otari N. Didmanidze, Academician of the Russian Academy of Sciences, DSs (Tech), Professor; ORCID: 0000-0003-2558-0585; authorid: 311972; didmanidze@rgau-msha.ru

Alexey V. Evgrafov, DSs (Tech), Associate Professor; ORCID: 0000-0002-2313-2191, authorid: 828739; labpoliv@list.ru

Artembek S. Guzalov, CSs (Tech); ORCID: 0000-0003-3526-4332, authorid: 1036988; aguzalov@mail.ru

Alexey V. Kurylenko, assistant; ORCID: 0000-0003-3661-1121, authorid: 1099301; a.kurilenko@rgau-msha.ru

Dmitry A. Moskvichev, CSs (Tech); ORCID: 0009-0002-7082-4876, authorid: 964662; moskvichev@rgau-msha.ru

Contribution of the authors

O.N. Didmanidze – general scientific management of the research, formulation of the problem and goals, development of the concept of the experiment, attraction of funding (head of the RSF No 24-16-00081 grant), approval of the final text of the article.

A.V. Evgrafov – development of the methodology of experimental research, coordination of laboratory tests, analysis of the data obtained (temperature dependencies, ignition time), preparation of the initial text of the manuscript, formulation of conclusions, data visualization.

A.S. Guzalov – direct conduct of experimental research (work with the installation, K30U containers), peat sampling in the Tver region, processing of primary data from the gas analyzer and the OWEN recorder, participation in the writing of the section “Materials and methods”.

A.V. Kurylenko – determination of the physical and chemical properties of peat samples (moisture, ash content, chemical composition), work with literature sources on the fire hazard of peat properties, participation in the analysis of the results and the design of the bibliography.

D.A. Moskvichev – technical preparation of the laboratory installation, ensuring the operation of measuring equipment, statistical processing of the results of experiments, participation in data visualization and preparation of graphic materials.

Оригинальная статья

УДК 631.6:626.823.91:666.972.1

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-39-47>



ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАНАЛОВ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

И.В. Белов¹, Х.А. Абдулмажидов^{2✉}, М.А. Карапетян³, С.К. Тойгамбаев⁴

^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация

^{3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; г. Москва, Российская Федерация

¹ <http://orcid.org/0000-0002-7562-514X>; iv.belov@rgau-msha.ru

² <http://orcid.org/0000-0002-7699-4799>; abdulmajidov@rgau-msha.ru

³ <http://orcid.org/0000-0002-6524-0561>; karapetyan.martik@yandex.ru

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-7649-6036>; kokibaewich@yandex.ru

Аннотация. Длительная эксплуатация оросительных каналов с защитными бетонными покрытиями сопровождается частичным или полным выходом из строя их конструкций и элементов. Такое состояние приводит к повышению фильтрации воды в каналах и, соответственно, к потере и снижению требуемых для мелиорируемых земель объемов воды. Цель исследований – изучение состояния, выявление дефектов бетонных покрытий оросительных каналов и определение технологий технического обслуживания и ремонта каналов. Разработка, определение и использование составов бетонных смесей с повышенной прочностью в определенной степени могут решить проблему обеспечения стойких против сползаний трещин и разрушений конструкций бетонных плит и соединительных стыков. Выявленные в результате исследований составы и пропорции бетонных смесей повышенной прочности на основе марки М400 в значительной степени позволяют обеспечивать прочность, а соответственно и долговечность конструкций защитных бетонных покрытий и стыков элементов оросительных каналов. В работе предложены основы технологий производства ремонтных и восстановительных работ с применением специальных машин, оборудования и разработанных бетонных смесей.

«Исследование выполнено в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.)»

Ключевые слова: защитные бетонные покрытия каналов, фильтрация воды в каналах, оросительные каналы, подбор состава бетонной смеси, техническое обслуживание и ремонт каналов, заделка швов каналов

Для цитирования: Белов И.В., Абдулмажидов Х.А., Карапетян М.А., Тойгамбаев С.К. Исследование состояния защитных конструкций каналов оросительных систем и их восстановление с применением оптимальных составов бетонных смесей. Природообустройство. 2026;Т.19(2):39-47. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-39-47>

Original article

STUDY OF THE STATE OF PROTECTIVE STRUCTURES OF IRRIGATION SYSTEM CANALS AND THEIR RESTORATION BY THE USE OF OPTIMAL COMPOSITIONS OF CONCRETE MIXTURES

I.V. Belov¹, Kh.A. Abdulmajidov^{2✉}, M.A. Karapetyan³, S.K. Toygambaev⁴

^{1,2} Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; Moscow, Russian Federation

^{3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Goryachkin Institute of Mechanics and Power Engineering; Moscow, Russian Federation

¹ <http://orcid.org/0000-0002-7562-514X>; iv.belov@rgau-msha.ru

² <http://orcid.org/0000-0002-7699-4799>; abdulmajidov@rgau-msha.ru

³ <http://orcid.org/0000-0002-6524-0561>; karapetyan.martik@yandex.ru

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-7649-6036>; kokibaewich@yandex.ru

Abstract. Long-term operation of irrigation canals with protective concrete coatings is accompanied by partial or complete failure of their structures and elements. This state of affairs leads to an increase

in water filtration in the canals and, accordingly, the loss and reduction of water volumes required for reclaimed land. The development, determination and use of concrete mixtures with increased strength to a certain extent can solve the problem of providing structures of concrete slabs and connecting joints that are resistant to creep, cracks and destruction. The compositions and proportions of heavy-duty concrete mixtures based on M400 grades revealed as a result of these studies to a large extent allow ensuring the strength, respectively, and durability of the structures of protective concrete coatings and joints of irrigation canal elements. The paper proposes the basics of technologies for the production of repair and restoration work using special machines, equipment and developed concrete mixtures.

The study was carried out as part of the project to create and develop the engineering center of the Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy (agreement No. 075-15-2025-543 dated June 16, 2025)

Keywords: protective concrete coatings of canals, water filtration in canals, irrigation canals, selection of concrete mix composition, maintenance and repair of canals, sealing of canals joints

Citation format: Belov I.V., Abdulmashidov Kh.A., Karapetyan M.A., Toygambaev S.K. Study of the state of protective structures of irrigation system canals and their restoration by applying optimal compositions of concrete mixtures. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(2):39-47. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-39-47>

Введение. В процессе формирования противотфильтрационных защитных покрытий на мелиоративных оросительных каналах используются такие материалы и конструктивные элементы, как монолитный бетон, сборные железобетонные плиты, полиэтиленовая стабилизированная пленка, защитные прокладки, асфальтобетон, каменно-щебеночные материалы.

Для выполнения монолитных бетонных облицовок применяется гидротехнический бетон, который должен удовлетворять требования ГО-СТА по таким характеристикам, как прочность, водонепроницаемость, морозостойкость, водно-коррозионная стойкость. Перечисленные требования обеспечиваются: использованием определенных видов высококачественных цементов и заполнителей, составов бетона, включающих в себя пластифицирующие воздухововлекающие и комплексные добавки; точным выполнением всех технологических процессов при строительстве облицовок.

Повышение морозостойкости и долговечности монолитных облицовок обеспечивается применением низкоалюминатных и сульфатостойких порландцементов с нормальной плотностью цементного теста не более 28% и с началом схватывания не ранее 1,5...2 ч.

Цель исследований: изучение состояния, выявление дефектов бетонных покрытий оросительных каналов и определение технологий проведения технического обслуживания и ремонта каналов.

Задачи исследований:

– изучение состояния бетонных покрытий оросительных каналов с выявлением дефектов,

сформированных при длительной эксплуатации мелиоративных систем;

– определение технологий проведения технического обслуживания и ремонтов оросительных каналов по выявленным дефектам;

– проведение лабораторных исследований по выбору наиболее прочного бетона в зависимости от качества и количества добавок.

Материалы и методы исследований.

Наличие в конструкциях бетонных покрытий оросительных каналов дефектов, трещин, разломов, смещений бетонных плит ведет к повышению фильтрации воды. Своевременная ликвидация перечисленных дефектов позволяет транспортировать требуемое количество воды от источника до орошаемых земель. Исследования оросительных каналов проводились на мелиоративных системах южных регионов. Методами исследований являлись осмотры, измерения, сравнения, расчеты и опыты [1-4]. В качестве базовых материалов для лабораторных исследований применены марки бетона М400. Несмотря на то, что нет полного соответствия, наиболее близкими по характеристикам к данной марке бетонов является класс бетона В30. Новизна исследований заключается в подборе пропорций различных добавок к представленным бетонам с целью повышения их прочности. Кроме того, в работе предлагается разработанная авторами технология производства ремонтных работ. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории строительных материалов Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Прочность бетонных кубиков с размерами 10 × 10 × 10 см, сформированных

на основе рекомендаций по результатам выявления оптимальных составов, определялась с помощью тест-прессов ТП-1-500 и ТП-1-1000.

Результаты и их обсуждение. Основные исследования по выявлению состояния бетонных покрытий оросительных каналов проводились визуально. Кроме того, применялись измерительные инструменты для оценки величин трещин на бетонных конструкциях, сползания бетонных плит и разрушения бетонных стыков.

Потери объемов воды в канале на фильтрацию при отсутствии других видов потерь можно определить как разность расхода воды в начале и конце канала. Соответственно

$$V = Q_1 - Q_2, \quad (1)$$

где Q_1 – расход воды в канале у головного водозабора, м³/ч; Q_2 – расход воды на конечном сечении исследуемого участка канала, м³/ч. В свою очередь, расход воды в канале определяется как произведение площади поперечного сечения потока воды на его скорость. Большинство мелиоративных оросительных каналов в поперечном сечении имеют форму трапеции. В итоге формула (1) примет вид:

$$V = S_1 \cdot v_1 - S_2 \cdot v_2, \quad (2)$$

где S_1, v_1 и S_2, v_2 – площади поперечного сечения воды и ее скорость в начале и в конце канала соответственно. Скорость потока воды можно легко определить. Площадь поперечного сечения воды в канале можно определить, исходя из интегрального выражения для определения площади криволинейной трапеции:

$$S = \int_a^b f(x) dx. \quad (3)$$

Объем воды на рассматриваемом участке будет составлять:

$$V = \int_0^H S(l) dl, \quad (4)$$

где l – длина канала; $S(l)$ – площадь поперечного сечения потока воды на длине l .

Недостатки на защитных бетонных покрытиях каналов, не требующие применения специальных инструментов, машин, оборудования и материалов, могут быть ликвидированы в результате операций по уходу с применением разработанных в настоящих исследованиях пропорций бетонов с добавлением специальных компонентов. Это позволит уменьшить потери воды на фильтрацию в исследуемых каналах.

Возникающие в процессе длительной эксплуатации мелиоративных каналов дефекты по степени сложности ликвидации можно подразделить на три категории: к первой категории относятся легко устраняемые дефекты; ко второй категории – требующие применения специальных ручных инструментов; к третьей категории – требующие применения специальных машин, оборудования и материалов. Соответственно все

перечисленные дефекты защитных покрытий оросительных каналов устраняются в результате проведения первого и второго технического обслуживания (ТО-1, ТО-2) и капитального ремонта. Так, к номенклатуре работ, относящихся к операциям по уходу, относятся: скашивание и удаление из русла канала травянистой растительности; удаление наносов, заиления и мусора со дна и откосов каналов.

К операциям ТО-1 можно отнести: удаление разрушенных конструкций стыков плит; заделку швов специальными бетонными смесями; восстановление поверхности бетонных плит општукатуриванием.

К ТО-2 можно отнести: точечный демонтаж смещенных бетонных плит; подготовку и уплотнение грунтовой подосновы для обратного монтажа плит; ремонт шлюза регулятора; бетонирование разрушенных бетонных участков дна и откосов канала; восстановление упоров на дне для бетонных плит, устанавливаемых на откосах, препятствующих их сползанию вниз; восстановление защитных элементов каналов, вышедших из строя в результате аварий. На операциях по выполнению ТО-2 могут быть применены специальные машины и оборудование – такие, как автомобильные краны, передвижная ремонтная установка, автобетоносмесители, ручной вспомогательный инструмент, одноковшовые пневмоколесные экскаваторы. Кроме того, в процессе проведения ТО-2 для заделки швов и восстановления бетонных плит планируется использовать сформированные в рамках представленной работы составы бетонных смесей.

Работы по обслуживанию каналов проводятся силами сотрудников мелиоводхоза с использованием автомобильного крана, вспомогательного экскаватора и технологического оборудования. При проведении точечного обслуживания и восстановления вышедшего из строя или сместившегося элемента покрытия канала – плиты – предварительно обеспечивается требуемый уровень воды в канале, позволяющий производить работы. Производится отсоединение элемента от соседних конструкций. Удаление плиты из русла канала осуществляется с помощью автомобильного крана. Далее производится заполнение грунтом и щебнем пустот под плитой до требуемого уровня, затем грунт на откосе уплотняется с помощью виброплиты. Установка новой бетонной плиты на откос вместо разрушенного также осуществляется с помощью автомобильного крана.

Капитальный ремонт в отличие от ТО-2, предусматривающий точечное восстановление

элементов мелиоративной системы, призван полностью восстановить защитные бетонные покрытия оросительных каналов с применением различных машин, оборудования и материалов.

При экспериментальном подборе оптимального состава крупных заполнителей бетонной смеси (щебня, гравия из плотных пород) с наибольшей плотностью учитывают требования ГОСТ 10268-80 и 10260-82, которые предусматривают максимальную фракцию крупного заполнителя не более 1/3 толщины облицовки. Также в соответствии со стандартом крупный заполнитель (до 20 мм) разделяют на две фракции: 5...10 мм (что должно составлять 35...45%) и 10...20 мм (55...65%). При крупности до 40 мм его разделяют на три фракции: 5...10 мм (25...30%); 10...20 мм (20...30%); 20...40 мм (40...55%). Применение гравийно-песчаной смеси или гравия допускается после их разделения на фракции [5-10]. Нарушение целостности откосов каналов, выполненных из бетонных плит, в процессе длительной эксплуатации представлено на рисунке 1.

С учетом того, что в процессе эксплуатации мелиоративных систем защитные бетонные покрытия находятся в воде с меняющимися в зависимости от сезона морозными условиями, в процессе приготовления бетонной смеси в ее состав вводятся добавки поверхностно-активных веществ, предназначенных для пластификации, а также для обеспечения требуемых показателей морозостойкости, плотности и трещиностойкости бетона. В основном химические добавки в бетонной смеси способствуют снижению

расхода цемента и улучшают ее свойства [11-13]. Рекомендуемые значения количества химических добавок в бетон в процентах от массы вяжущего вещества для пластифицирующих и пластифицирующих воздухововлекающих добавок находятся в пределах от 0,1 до 0,8; для воздухововлекающих и газообразующих – от 0,005 до 0,03; для ускорителей твердения и ингибиторов коррозии стали – от 0,5 до 3. Например, использование суперпластификатора С-3 в количестве от 0,2 до 1% от массы цемента позволяет получать литые самоуплотняющиеся бетонные смеси, которые не требуют вибрации. При этом снижение содержания воды позволяет получать бетоны повышенной прочности, не изменяя подвижности смеси.

Основное назначение пластифицирующих или пластифицирующих воздухововлекающих добавок заключается в снижении начального содержания воды, уменьшении расхода цемента, удобоукладываемости и однородности смеси, в повышении водонепроницаемости, морозостойкости, трещиностойкости, прочности бетона. Все перечисленные свойства бетонов необходимы для их применения в водохозяйственном строительстве [14, 15].

Отдельное введение воздухововлекающих добавок в бетон позволяет улучшать однородность, связность и удобоукладываемость бетонной смеси, повышать морозостойкость, трещиностойкость и водонепроницаемость бетонов с маркой по морозостойкости F150 и выше.

Ускорители твердения цемента, помимо своего основного назначения, служат также для



а)



б)

Рис. 1. Нарушение целостности откосов каналов, выполненных из бетонных плит:

- а) соединения бетонных плит, требующих ремонта швов;
- б) размыв грунта на граничном участке канала с бетонным покрытием

Fig. 1. Violation of the integrity of the slopes of channels made of concrete slabs:

- a) joints of concrete slabs that require repair of joints;
- b) erosion of soil on the border section of the canal with concrete cover

нейтрализации замедляющего действия поверхностно-активных веществ на процесс его гидратации и повышения плотности бетона, а также для ускорения твердения бетона при снижении положительной температуры.

Противоморозные добавки применяются совместно с пластифицирующими воздухововлекающими добавками для сохранения жидкой фазы бетона при отрицательной температуре окружающей среды. Некоторые рекомендуемые индивидуальные и комплексные добавки с учетом условий производства работ и твердения бетона представлены в таблице 1.

Определенную добавку из числа представленных добавок в настоящей работе выбирали на основании экспериментальных исследований по определению значений прочности кубиков на тест-прессах, а также с учетом технико-экономического сравнения возможных вариантов и наличия достаточных запасов.

На основании ГОСТ бетонная смесь, применяемая для монолитных бетонных, железобетонных и бетонооплечных облицовок каналов, должна быть: однородной по составу; иметь водоцементное отношение (В: Ц) 0,5...0,55; обеспечивать максимальную плотность и однородность за счет своей подвижности; иметь показатели подвижности и жесткости в момент усадки, соответствующие заданным; иметь 3...5% объема вовлеченного воздуха.

Применение пластифицирующих добавок позволяет также снижать на 2...4% меньше воды при одной и той же подвижности по сравнению с бетоном без добавок, что снижает расход цемента до 10% на 1 м³ бетона.

Работы по определению прочности предлагаемых пропорций бетонов на основе марки М400 проводились в лаборатории строительных материалов Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова (рис. 2). В качестве дополнительных компонентов использовались сульфоферритные добавки и суперпластификатор АСЕ430. В зависимости от их количества определялась прочность бетона.

Для приготовления бетонных кубиков марки М400 в процессе исследований применялись смеси компонентов следующего состава: портландцемент – 1500 г; песок – 3270 г; щебень – 3762 г; сульфоферритная добавка – 75 г; вода – 705 мл. В рамках однофакторного эксперимента целевая функция – прочность бетона – определялась в зависимости от количества суперпластификатора АСЕ430 в диапазоне рекомендуемых значений от 0,5 до 2,0% с шагом 0,5%.

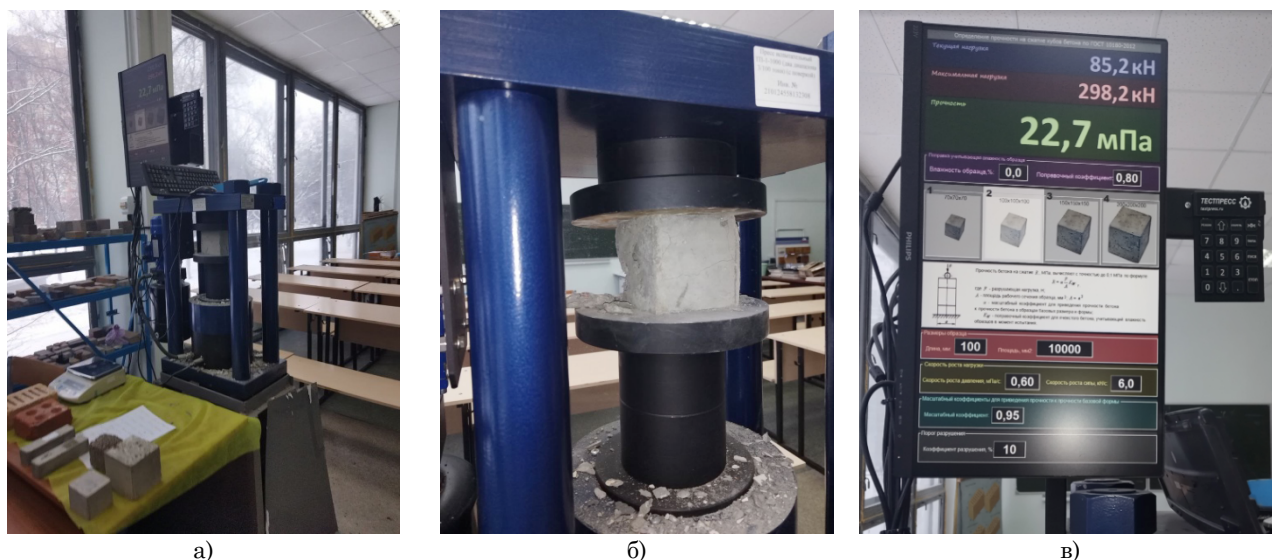
В таблице 2 представлены результаты проведенных экспериментов в рамках однофакторного эксперимента по определению зависимости прочности бетона марки М400 с содержанием 25 г сульфоферритной составляющей от количества, добавленного в него, в последовательных опытах, суперпластификатора BASF MasterGlenium АСЕ430 в пределах от 0 до 2,0% с шагом 0,5%. Для получения более точного результата по прочности по каждому предложенному составу с добавленными компонентами было сформировано и исследовано по 3 кубика.

Несмотря на невысокие значения коэффициентов детерминации $R^2 = 0,0392$ для линейной и $R^2 = 0,1346$ для полиномиальной, которые показывают, насколько близко изменение случайной

Таблица 1. Рекомендуемые индивидуальные и комплексные добавки с учетом условий производства работ и твердения бетона

Table 1. Recommended individual and complex additives taking into account the conditions of work and concrete hardening

Конструкция и условия твердения бетона / <i>Construction and conditions of concrete hardening</i>	Индивидуальные и комплексные добавки / <i>Individual and complex additives</i>
Монолитная (обычные, летние) / <i>Monolithic (regular, summer)</i>	сульфитно-дрожжевая бражка, пластификатор адипиновый щелочной, водорастворимые полимеры / <i>sulphite-yeast mash, alkaline adipine plasticizer, water-soluble polymers</i>
Монолитная (сухой жаркий климат) / <i>Monolithic (dry hot climate)</i>	гидрофобизирующая добавка, сульфитно-дрожжевая бражка с другими видами добавок, водорастворимые полимеры с поверхностно-активными добавками / <i>hydrophobic additive, sulphite-yeast mash with other types of additives, water-soluble polymers with surfactants</i>
Монолитная (зимние) / <i>Monolithic (winter)</i>	пластификатор адипиновый щелочной с другими добавками / <i>adipine alkaline plasticizer with other additives</i>
Сборная (тепловая обработка) / <i>Prefabricated (heat treatment)</i>	пластификатор адипиновый щелочной, водорастворимые полимеры, водорастворимые полимеры с поверхностно-активными добавками / <i>adipine alkaline plasticizer, water-soluble polymers, water-soluble polymers with surfactants</i>



а)

б)

в)

Рис. 2. Определение прочности предлагаемого бетона:

а) подготовка образцов к исследованию на тест-прессе; б) испытание бетонного кубика; в) показания прочности образца бетона

Fig. 2. Determination of the strength of the proposed concrete:

а) preparation of samples for study on a test press; б) concrete cube testing; в) concrete sample strength readings

Таблица 2. Результаты однофакторного эксперимента по определению прочности бетона марки М400 в зависимости от количества добавки АСЕ430

Table 2. Results of a one-factor experiment to determine the strength of M400 concrete depending on the amount of ACE430 additive

Исследуемый бетон М400, содержащий сульфферритную составляющую (СФ) с добавленным количеством пластификатора АСЕ430, в % от массы цемента / Tested concrete M400 containing sulfiferritic component (SF) with added amount of plasticizer ACE430, % of cement weight	Прочность P_1 , МПа, (максимальная нагрузка, кН) / Strength P_1 , MPa, (maximum load, kN)	Прочность P_2 , МПа, (максимальная нагрузка, кН) / Strength P_2 , MPa, (maximum load, kN)	Прочность P_3 , МПа, (максимальная нагрузка, кН) / Strength P_3 , MPa, (maximum load, kN)	П средн. МПа, (максимальная нагрузка, кН) / Strength average, MPa, (maximum load, kN)
М400 (СФ) +0,0%	22,7 (298,2)	25,0 (328,7)	24,3 (319,4)	24,0 (315,4)
М400 (СФ) +0,5%	29,8 (397,5)	28,4 (373,5)	29,0 (381,9)	29,0 (384,3)
М400 (СФ) +1,0%	24,5 (322,6)	23,8 (313,0)	24,1 (317,3)	24,1 (317,6)
М400 (СФ) +1,5%	24,5 (322,8)	25,2 (331,3)	25,3 (332,8)	25,0 (328,9)
М400 (СФ) +2,0%	24,8 (326,7)	24,6 (323,3)	24,9 (328,0)	24,7 (326,0)

величины к строгой линейной или нелинейной зависимости, наиболее адекватно исследуемый процесс описывается полиномиальной аппроксимацией (рис. 3) с уравнением регрессии $y = -1,3714x^2 + 2,2229x + 25,194$. Некоторое выбывание второй точки кривой зависимости может вызвать сомнения, однако трехкратная повторность проведения опытов подтверждает значения с достоверностью.

Результаты экспериментальных исследований показали, что в процессе формирования бетонных кубиков произошло увеличение их линейных размеров, величина которых находится в пределах 3-5 мм над стенками форм. Данная характеристика бетона, полученная добавлением

сульфоферритной смеси, подтверждается. Однако по представленным зависимостям можно сделать выводы о том, что в данных конкретных условиях прочность бетона с добавлением суперпластификатора BASF MasterGlenium ACE430 от 0,5 до 2,0% по 5 исследуемым точкам меняется. Обработка полученных экспериментальных данных показывает (табл. 2), что наибольшее значение прочности исследуемого бетона величиной 29 МПа наблюдается при добавлении в него 0,5% пластификатора АСЕ430, что составляет большее значение прочности на 16% по сравнению с ближайшим меньшим значением. Ближайшее меньшее значение прочности бетонных образцов величиной 25 МПа наблюдается при добавлении

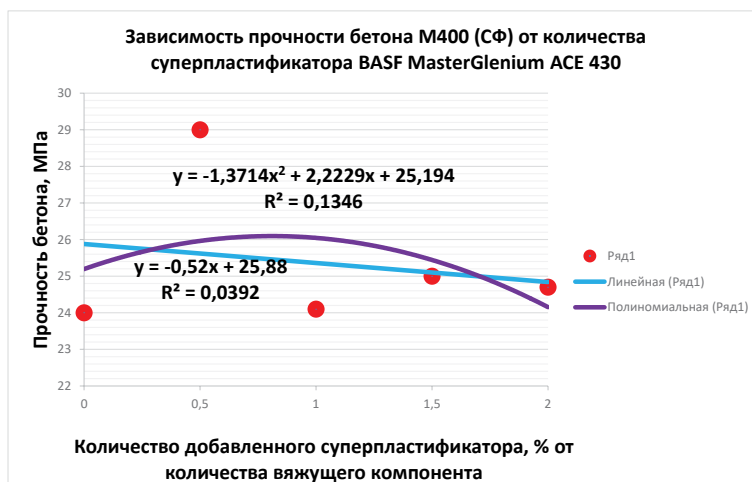


Рис. 3. Зависимость прочности бетона марки М400 (СФ) с 1% сульфферритной добавки от количества суперпластификатора BASF MasterGlenium ACE430 от 0 до 2%

Fig. 3. Dependence of the strength of M400 (SF) concrete with 1% sulfoferrite additive on the amount of BASF MasterGlenium ACE430 superplasticizer from 0 to 2%

1,5% АСЕ430. При добавлении в бетонную смесь 1; 1,5 и 2% пластификатора АСЕ430 прочность бетона после его полного затвердения находилась в пределах от 24 до 25 МПа. Впрочем, в опытах при отсутствии данной добавки прочность кубиков была также на уровне 24 МПа. Применение марки бетона М400 с добавлением предлагаемых компонентов, увеличивающих его прочность, с экономической точки зрения является целесообразным по сравнению с более дорогостоящими марками М500 и М600.

Армированное монолитное бетонное покрытие формируют на средних и крупных каналах с неоднородным грунтом по глубине и на участках в полувыемке и полунасыпи. Бетон в этом случае укладывают после установки арматурной сетки или стальной арматуры периодического профиля диаметром 5...12 мм (расстояние между стержнями – 15...30 см. Для армирования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений без предварительного напряжения применяют стержневую горячекатаную гладкую и периодического профиля арматуру и обыкновенную холоднотянутую арматурную проволоку периодического профиля. Для закладных деталей и соединительных накладок применяют прокатную углеродную сталь [5].

Сборные железобетонные покрытия каналов позволяют повысить темпы строительства, способствуют максимальной механизации строительства и обеспечивают необходимую прочность облицовки. В качестве конструктивных элементов сборных железобетонных покрытий применяют железобетонные плиты, а в качестве сборного защитного покрытия – предварительно напряженные железобетонные плиты НПК размером

$6 \times 1 \times 0,06$; $6 \times 1,5 \times 0,06$; $6 \times 2 \times 0,06$ м, сборные железобетонные плиты с выпуском арматуры размером $3 \times 2 \times 0,1$ м [5].

Плиты НПК и ПК применяются для строительства каналов с глубиной воды до 3 м при максимальной высоте волны 0,5 м, толщине льда 0,5 м, а конструкции ПКУ – соответственно 3...5 м, не более чем, и 0,8 м.

Для изготовления сборных железобетонных плит используют тяжелые бетоны, удовлетворяющие требованиям проекта по прочности, водонепроницаемости, морозостойкости, водо-коррозионной стойкости.

Для предварительно напряженных конструкций применяют проектные марки бетона по прочности на сжатие не менее М400 для конструкций со стержневой арматурой и не менее М500 для конструкций с высокопрочной арматурной проволокой, а для бетонов сборных железобетонных конструкций – низко- и среднеалюминатный портландцемент марок М500 и М600.

Выводы

1. Длительная эксплуатация мелиоративных оросительных каналов с защитными бетонными покрытиями сопровождается появлением трещин под действием нагрузок от воды, промерзанием, температурным воздействием, постепенным разрушением бетонным элементов, что ведет к увеличению потерь воды на фильтрацию, к ухудшению функционирования мелиоративной системы в целом.

2. Представлен общий способ расчета потерь воды на фильтрацию в мелиоративных оросительных каналах, заключающийся в разности Q_1 – расхода воды в канале у головного

водозабора, $\text{м}^3/\text{ч}$ и Q_2 – расхода воды на конечном сечении исследуемого участка канала, $\text{м}^3/\text{ч}$.

3. В рамках работы рассмотрены существующие способы восстановления бетонных покрытий оросительных каналов, а также предложена последовательность технического обслуживания и ремонта защитных конструкций. В качестве бетонной смеси для проведения ТО и ремонта участков бетонных покрытий каналов по результатам исследований рекомендуется применять бетон марки М40 с добавлением 1% сульфоферритной добавки и 0,5% суперпластификатора АСЕ430.

4. Проведены лабораторные исследования по определению прочности наиболее распространенных бетонов марки М400 в зависимости от количества сульфоферритных добавок и суперпластификатора АСЕ430. Анализ результатов

исследований, проведенных с использованием лабораторных тест-прессов ТП-1-1000, показывает, что повышение прочности бетонов марки М400 (с содержанием 1% сульфоферритной добавки при заданных условиях) достигается при добавлении в исследуемый состав бетонной смеси суперпластификатора АСЕ430 в количестве 0,5% от массы вяжущего компонента. Повышение прочности бетонных образцов при этом составляет 16%.

5. Обеспечение ухода за защитными антифильтрационными покрытиями мелиоративных осушительных каналов, своевременное проведение технического обслуживания позволяют значительно снизить потери воды на фильтрацию и увеличить продолжительность эксплуатации элементов оросительной системы до капитального ремонта.

Список использованных источников

1. Баев О.А., Талалаева В.Ф. Конструктивно-технологические решения для создания и восстановления покрытий оросительных каналов // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 2. С. 177-191. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-2-177-191.
2. Косиченко Ю.М., Гарбуз А.Ю. Гидравлическая модель водопроницаемости бетонной облицовки при длительной эксплуатации канала // Природобустройство. 2018. № 4. С. 30-40. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-4-30-40. EDN: YMBOGT
3. Абдразаков Ф.К., Рукавишников А.А. Исключение непроизводительных потерь водных ресурсов из оросительной сети за счет использования инновационных облицовочных материалов // Аграрный научный журнал. 2019. № 10. С. 91-94. DOI: 10.28983/asj. y2019i10pp91-94. EDN: MFHBHE
4. Давиденко В.М., Штильман И.Е., Давиденко В.М., Коротких И.Е. Некоторые вопросы ремонта глубоких поврежденных бетона с оголением арматуры на железобетонных конструкциях ГТС // Гидротехника. 2021. № 3 (64). С. 85-88. EDN: APSTIW
5. Абдулмажидов Х.А., Балабанов В.И., Мареева О.В. и др. Дефекты бетонных покрытий мелиоративных оросительных каналов и методы их ремонта // Природобустройство. 2025. № 5. С. 63-70. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-63-70>
6. Карапетян М.А., Тойгамбаев С.К., Абдулмажидов Х.А. Исследование состояния мелиоративных осушительных каналов, их восстановление и очистка // Природобустройство. 2025. № 3. С. 38-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-3-38-44. EDN: QMJMDE
7. Васильева Е.В., Федоров В.М., Чибинев Н.Н. Одежда каналов мелиоративных систем из бетона на местных заполнителях с построением математической модели // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2022. № (67). С. 513-525. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-58.
8. Семененко С.Я., Арьков Д.П., Марченко С.С. и др. Способ реконструкции деформационных швов противотрационных бетонных и железобетонных облицовок гидротехнических сооружений // Мелиорация и водное хозяйство. 2017. № 1. С. 31-35. EDN: YHRGCN
9. Абдразаков Ф.К., Рукавишников А.А. Оценка перспективы использования бетонного полотна в качестве облицовочного материала оросительных каналов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее

References

1. Baev O.A. Structural and technological solutions for the creation and restoration of irrigation canal coatings / O.A. Baev, V.F. Talalaeva // Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2022. Vol. 12, No. 2. P. 177-191. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-2-177-191.
2. Kosichenko Yu.M. Hydraulic model of water permeability of concrete lining during long-term operation of the canal / Yu.M. Kosichenko A.Yu. Garbuz // Prirodoobustrojstvo. 2018. No. 4. P. 30-40. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-4-30-40. EDN: YMBOGT
3. Abdrazakov F.K. Elimination of unproductive losses of water resources from the irrigation network through the use of innovative facing materials / F.K. Abdrazakov, A.A. Rukavishnikov // Agrarian scientific journal. 2019. No. 10. P. 91-94. DOI: 10.28983/asj. y2019i10pp91-94. EDN: MFHBHE
4. Davidenko V.M. Some issues of repairing deep damage to concrete with exposed reinforcement on reinforced concrete structures of hydraulic structures / V.M. Davidenko, V.B. Shtilman, I.E. Korotkikh // Hydraulic engineering. 2021. No. 3(64). P. 85-88.
5. Defects of concrete pavements of melioration irrigation canals and methods of their repair / Kh.A. Abdulmazhidov, V.I. Balabanov, O.V. Mareeva [et al.] // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 5. P. 63-70. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-63-70>
6. Karapetyan M.A. Study of the state of melioration drainage canals, their restoration and cleaning / M.A. Karapetyan, S.K. Toygambaev, H.A. Abdulmazhidov // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 3. P. 38-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-3-38-44. EDN: QMJMDE
7. Vasilyeva E.V., Fedorov V.M., Chibinev N.N. Lining of canals of melioration systems with concrete on local fillers and construction of a mathematical model // News of the Lower Volga Agrarian University Complex: Science and Higher Professional Education. 2022. No. 3(67). P. 513-525. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-58.
8. Semenenko D.P. Arkov, S.S. Marchenko [et al.] Method for reconstructing expansion joints of anti-seepage concrete and reinforced concrete linings of hydraulic structures // Land Reclamation and Water Management. 2017. No. 1. P. 31-35. EDN: YHRGCN
9. Abdrazakov F.K., Rukavishnikov A.A. Assessment of the prospects for using concrete sheeting as a lining material for irrigation canals // News

профессиональное образование. 2020. № (60). С. 327-339. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-32.

10. Семенов С.Я., Новиков А.Е. Показатели мелиоративного состояния орошаемых земель Волгоградской области // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 1 (69). С. 114-123. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-01-11. EDN: MPWUNX

11. Жарницкий В.Я., Смирнов А.П., Андреев Е.В. Экспериментально-теоретическое обоснование метода оценки трещиностойкости и расстояния между усадочными швами бетонных облицовок водохозяйственных каналов // Природообустройство. 2022. № 2. С. 3-68. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-63-68. EDN: PQSHNN

12. Гарбуз А.Ю., Талалаева В.Ф. Технология ремонта бетонных облицовок каналов битумно-полимерной мастикой // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11, № 3. С. 299-313. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-299-313.

13. Абдулмажидов Х.А., Бенин Д.М., Балабанов В.И. и др. Разработка рабочего органа каналоочистителя для удаления наносов с закрепленного дна канала // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38, № 12. С. 66-70. DOI: 10.53859/02352451_2024_38_12_66.

14. Васильева Е.В., Федоров В.М. Элементы из бетона на некондиционных заполнителях для проводящей сети мелиоративных систем // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 4 (72). С. 487-500. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-49.

15. Метлицкий В.С., Ардаков А.А. Ресурсосберегающие конструкции противозероэрозийной защиты мелиоративных систем // Мелиорация и водное хозяйство. 2022. № 4. С. 2-4. DOI: 10.32962/0235-2524-2022-4-2-4. EDN: TTWTJZ

Информация об авторах

Игорь Викторович Белов, аспирант кафедры сельскохозяйственного строительства; AuthorID: 1176793; iv.belov@rgau-msha.ru

Хамзат Арсланбекович Абдулмажидов, д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры сельскохозяйственного строительства; Web of Science ResearcherID AAE-5817-2022; Scopus Author ID: 57224176106; AuthorID: 756348; abdulmajidov@rgau-msha.ru

Мартик Аршалуйсович Карапетян, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования; ResearcherID Web of ScienceADQ-5014-2022; Scopus ID: 57222131481; РИНЦ AuthorID: 780469; karapetyan.martik@yandex.ru

Серик Кокибаевич Тойгамбаев, д-р техн. наук, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования; ResearcherID Web of ScienceJRY-8643-2023; Scopus ID: 57221221969; РИНЦ AuthorID: 753942; kokibaewich@yandex.ru

Вклад авторов

И.В. Белов – выполнил экспериментальную часть, на основании которых провели обобщение и написали черновик рукописи.

Х.А. Абдулмажидов – руководил исследованием, разработал методологию исследования, выполнил обработку экспериментальных данных и сформулировал общие выводы по работе.

М.А. Карапетян – сформулировал общую концепцию исследования и доработал окончательный вариант рукописи.

С.К. Тойгамбаев – занимался обоснованием темы исследования, обзором источников литературы, верификацией данных, создание черновика данных и оформление.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interest

Поступила в редакцию / Received 15.02.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Received 25.03.2026

Принята к публикации / Accepted 28.03.2026

of the Nizhnevolszhsy Agrarian University Complex: Science and Higher Professional Education. 2020. No. 4 (60). P. 327-339. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-32.

10. Semenenko S.Ya., Novikov A.E. Indicators of the melioration state of irrigated lands in the Volgograd region // News of the Nizhnevolszhsy Agrarian University Complex: Science and Higher Professional Education. – 2023. – No. 1 (69). – P. 114-123. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-01-11.

11. Zharnitsky V.Ya., Smirnov A.P., Andreev E.V. Experimental and theoretical substantiation of the method for assessing crack resistance and the distance between shrinkage joints of concrete linings of water management canals // Prirodoobustrojstvo. 2022. No. 2. P. 63-68. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-63-68. EDN: PQSHNN

12. Garbuz A.Yu., Talalaeva V.F. Technology of repairing concrete canal linings with bitumen-polymer mastic // Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2021. Vol. 11, No. 3. P. 299-313. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-3-299-313.

13. Development of a working element of a channel cleaner for removing sediment from a fixed canal bottom / Kh.A. Abdulmashidov, D.M. Benin, V.I. Balabanov [et al.] // Achievements of science and technology of the agro-industrial complex. 2024. Vol. 38, No. 12. – P. 66-70. DOI: 10.53859/02352451_2024_38_12_66.

14. Vasilyeva E.V. Elements made of concrete on substandard fillers for the conductive network of melioration systems // News of the Nizhnevolszhsy Agrarian University Complex: Science and Higher Professional Education. 2023. No. 4(72). P. 487-500. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-49

15. Metlitsky V.S., Ardakov A.A. Resource-saving structures of anti-erosion protection of melioration systems // Land reclamation and water management. 2022. No. 4. P. 2-4. DOI: 10.32962/0235-2524-2022-4-2-4. EDN: TTWTJZ

Information about the authors

Igor V. Belov, post graduate student of the Department of Agricultural Construction; AuthorID: 1176793; iv.belov@rgau-msha.ru

Khamzat A. Abdulmashidov, DSs (Eng), associate professor, Associate Professor of the Department of Agricultural Construction; Web of Science ResearcherID AAE-5817-2022; Scopus Author ID: 57224176106; AuthorID: 756348; abdulmajidov@rgau-msha.ru

Martik A. Karapetyan, DSs (Eng), professor, professor of the department of technical service of machinery and equipment; ResearcherID Web of scienceadq-5014-2022; Scopus ID: 57222131481; RSCI authorid: 780469; karapetyan.martik@yandex.ru

Serik K. Toygambayev, DSs (Eng), Professor of the Department of Technical Service of Machinery and Equipment; ResearcherID Web of ScienceJRY-8643-2023; Scopus ID: 57221221969; RSCI AuthorID: 753942; kokibaewich@yandex.ru

Contribution of the authors

I.V. Belov – performed the experimental part, on the basis of which we made a generalization and wrote a draft of the manuscript

Kh.A. Abdulmashidov – supervised the study, developed the research methodology, performed the processing of experimental data and formed general conclusions on the work

M.A. Karapetyan – formulated the general concept of the study and finalized the final version of the manuscript

S.K. Toygambayev – was engaged in the substantiation of the research topic, review of literature sources, data verification, creation of a draft of data and design

Оригинальная статья

УДК 631.67: 551.5:633.15

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-48-54>

ВЛИЯНИЕ ОРОШЕНИЯ НА ЭВАПОТРАНСПИРАЦИЮ И ПРОДУКТИВНОСТЬ КУКУРУЗЫ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Р.В. Калиниченко^{1✉}, А.Е. Беденко²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»; г. Москва, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга»; поселок Радужный, Коломенский городской округ, Московская область, Российская Федерация

¹ kalinichenko_rv@esoil.ru ORCID ID: 0000-0003-3136-8468

² timbothdoom@gmail.com ORCID ID: 0009-0005-7522-0395

Аннотация. Цель работы – на основе комплексного анализа спутниковых данных (MODIS, Sentinel-2) и наземных метеорологических наблюдений количественно оценить влияние орошения на динамику эвапотранспирации, состояние вегетации и финальную урожайность кукурузы в условиях Тихорецкого района. Исследования проводились на двух производственных участках кукурузы: орошаемом (75 га) и богарном (95 га). Анализ охватывал период с 16 апреля по 31 октября 2025 г. Оценка водопотребления выполнялась по спутниковому продукту MOD16A2 (MODIS), позволяющему определить суммарную эвапотранспирацию (ЕТ) с восьмидневной дискретностью. Динамика состояния посевов анализировалась по индексу NDVI на основе данных Sentinel-2. Обработка временных рядов выполнялась в платформе Google Earth Engine, пространственный анализ – в среде QGIS. Метеорологическая информация о количестве осадков получена из архива метеостанции Тихорецк (Rp5). За исследуемый период суммарное количество осадков составило 335,6 мм. Суммарная эвапотранспирация на богарном участке составила 291,0 мм, тогда как на орошаемом – 363,0 мм, что на 72 мм выше. Среднесезонное значение NDVI на орошаемом поле достигло 0,617 и превысило показатель богарного участка (0,351) на 75,7%. Фактическая урожайность на богаре составила 11,3 ц/га, тогда как расчетная урожайность на орошении – 19,86 ц/га, что соответствует прибавке 8,56 ц/га. Искусственное орошение обеспечило дополнительное эффективное водопотребление и позволило сохранить фотосинтетическую активность растений в условиях засушливого сезона, что привело к повышению урожайности кукурузы на 75,7%. Использование спутниковых данных и геоинформационных платформ подтвердило высокую эффективность для мониторинга водного баланса и оценки агрономической эффективности поливов.

Ключевые слова: орошение, эвапотранспирация, кукуруза, MODIS, Sentinel-2, NDVI, Google Earth Engine, водный стресс, урожайность

Для цитирования: Калиниченко Р.В., Беденко А.Е. Влияние орошения на эвапотранспирацию и продуктивность кукурузы по данным дистанционного зондирования земли. Природообустройство. 2026;Т.19(2):48-54. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-48-54>

Original article

THE EFFECT OF IRRIGATION ON THE EVAPOTRANSPIRATION AND PRODUCTIVITY OF CORN ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA

R.V. Kalinichenko^{1✉}, A.E. Bedenko²

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center “V.V. Dokuchaev Soil Institute”, Moscow, Russian Federation

² Federal State Budgetary Scientific Institution All-Russian Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply “Raduga”; Raduzhny Village, Kolomna City District, Moscow Region, Russian Federation

¹ kalinichenko_rv@esoil.ru ORCID ID: 0000-0003-3136-8468

² timbothdoom@gmail.com ORCID ID: 0009-0005-7522-0395

Abstract. The objective of the study was to quantitatively assess the impact of irrigation on evapotranspiration dynamics, vegetation condition, and final maize yield in the Tikhoretsk district using an integrated analysis of satellite data (MODIS, Sentinel-2) and ground-based meteorological observations. **Methods.** The study was conducted on two production maize fields: an irrigated field (75 ha) and a rainfed field (95 ha).

The analysis covered the period from April 16 to October 31, 2025. Water consumption was assessed using the MOD16A2 (MODIS) satellite product, which provides estimates of total evapotranspiration (ET) with an 8-day temporal resolution. Crop condition dynamics were analyzed using the NDVI vegetation index derived from Sentinel-2 data. Time-series processing was performed on the Google Earth Engine platform, while spatial analysis was carried out in the QGIS environment. Meteorological data on precipitation were obtained from the Tikhoretsk weather station archive (Rp5). **Results.** During the study period, total precipitation amounted to 335.6 mm. The cumulative evapotranspiration on the rainfed field was 291.0 mm, whereas on the irrigated field it reached 363.0 mm, which is 72 mm higher. The seasonal mean NDVI on the irrigated field reached 0.617 and exceeded the rainfed field value (0.351) by 75.7%. The actual yield on the rainfed field was 11.3 centners per hectare, while the estimated yield for the irrigated field reached 19.86 centners per hectare, corresponding to an increase of 8.56 centners per hectare. **Conclusion.** Irrigation provided additional effective water consumption and maintained the photosynthetic activity of plants under drought conditions, resulting in a 75.7% increase in maize yield. The use of satellite data and geospatial platforms proved to be an effective tool for monitoring the water balance and assessing the agronomic efficiency of irrigation.

Keywords: corn, irrigation, evapotranspiration, MODIS, Sentinel-2, NDVI, Google Earth Engine, water stress, yield

For citation: Kalinichenko R.V., Bedenko A.E. The effect of irrigation on the evapotranspiration and productivity of corn according to remote sensing data. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):48-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-48-54>

Введение. Кукуруза является одной из ключевых зерновых культур, определяющих продовольственную безопасность и экспортный потенциал агропромышленного комплекса юга России [1]. Однако высокая продуктивность данной культуры напрямую коррелирует с режимом влагообеспеченности, особенно в критические фазы органогенеза [2]. В условиях глобального изменения климата и участвовавших волн почвенной засухи в центрально-черноземных регионах традиционное богарное земледелие становится высокорискованным [3]. Дефицит доступной влаги в период цветения и налива зерна приводит к преждевременному завершению вегетации и существенным потерям урожая [4]. В этой связи внедрение систем искусственного орошения рассматривается как основной фактор стабилизации производства зерна в степных зонах [5].

Современные исследования подтверждают, что эвапотранспирация (ЕТ) является интегральным показателем жизнедеятельности агрофитотенноза, отражающим как физическое испарение почвы, так и интенсивность транспирации растений [6]. Традиционные методы оценки ЕТ, основанные на лизиметрических данных или расчетах по формуле Пенмана-Монтейта, ограничены точечным характером измерений [7]. Решением данной проблемы является использование продуктов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – таких, как MOD16A2, позволяющих проводить мониторинг водного баланса на обширных территориях с высокой временной дискретностью [8].

Ряд авторов отмечает, что использование спутниковых данных спектрорадиометра MODIS в сочетании с высокодетальными снимками Sentinel-2 позволяет не только оценивать водопотребление, но и диагностировать состояние биомассы через вегетационные индексы – в частности, NDVI [9, 10]. Корреляция между накопленной суммой эвапотранспирации и продуктивностью культур доказана во множестве агроклиматических зон, что позволяет использовать данные ДЗЗ для прогнозирования урожайности [11]. Однако для условий Краснодарского края количественные оценки эффективности поливных норм на основе алгоритмов MOD16 требуют дополнительной верификации.

Применение геоинформационных платформ – таких, как Google Earth Engine, радикально упростило обработку временных рядов данных, исключая ошибки, связанные с атмосферными помехами [12, 13]. Интеграция методов ДЗЗ и наземных метеорологических данных (Rp5) позволяет формировать цифровые двойники полей для оперативного управления поливами [14, 15]. Несмотря на имеющиеся наработки, вопрос сопоставимости динамики ЕТ и темпов деградации фотосинтетической активности на богаре и орошении в условиях жесткого термического стресса остается актуальным [16].

Цель исследований: на основе комплексного анализа спутниковых данных (MODIS, Sentinel-2) и наземных метеорологических наблюдений количественно оценить влияние орошения на динамику эвапотранспирации, состояние

вегетации и финальную урожайность кукурузы в условиях Тихорецкого района.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать метеорологические условия и структуру водного баланса в течение вегетационного периода 2025 г.

2. Провести сравнительный анализ динамики суммарной эвапотранспирации на орошаемом и богарном участках по данным MOD16A2.

3. Оценить реакцию посевов на водный стресс через мониторинг вегетационного индекса NDVI (Sentinel-2).

4. Установить взаимосвязь накопленного водопотребления и продуктивности культуры, определив экономическую и агрономическую эффективность полива.

Материалы и методы исследований.

Исследования проводились в Тихорецком районе на двух производственных участках с кукурузой на зерно в 2025 г. Участки расположены близко: орошаемый участок площадью 75 га (номер поля в ЕФГИС ЗСН: 03654-1042) и богарный участок площадью 95 га (номер поля в ЕФГИС ЗСН: 03654-1122).

Временной интервал анализа охватывал период с 16 апреля по 31 октября, что соответствует полному технологическому циклу возделывания культуры в хозяйстве. Метеорологическое обеспечение исследований базировалось на данных метеостанции Тихорецк (архив Rp5), на основе которых рассчитывался приходный элемент водного баланса (атмосферные осадки).

Центральным методом оценки водопотребления стал анализ суммарной эвапотранспирации (ET) по данным спутникового продукта MOD16A2.061 (спектрорадиометр MODIS). Данный инструмент позволяет количественно оценить объем влаги, расходуемой на транспирацию растениями и физическое испарение с поверхности почвы.

Обработка спутниковой информации выполнялась в платформе Google Earth Engine. Продукт MODIS генерирует накопленные значения ET за 8-дневные циклы, что позволило детально восстановить динамику водопотребления в течение всего сезона. Для получения физических значений в миллиметрах к исходным данным применялся коэффициент масштабирования 0.1. Итоговый показатель сезонного испарения рассчитывался как сумма всех 8-дневных интервалов. Этот метод позволил выявить точные моменты возникновения водного дефицита и оценить реальную эффективность поданной поливной воды.

Для контроля реакции посевов на водный режим и оценки динамики накопления биомассы использовался индекс вегетации NDVI, рассчитанный по данным спутников Sentinel-2. Благодаря высокому пространственному разрешению (10 м на пиксель) данный метод позволил детально отслеживать фотосинтетическую активность растений.

Учет фактической урожайности на богарном участке (контроль) производился методом прямого комбайнирования 29 августа, что было обусловлено преждевременным завершением вегетации культуры вследствие жесткого водного стресса.

Прогнозная урожайность для орошаемого массива рассчитывалась на основе установленных статистических зависимостей между накопленной суммой эвапотранспирации, значениями индекса NDVI и фактическим выходом зерна с контрольного участка. Математическая обработка данных выполнена с использованием аналитического инструментария Google Earth Engine и методов пространственного анализа в среде QGIS.

Результаты и их обсуждение. Анализ условий вегетации сельскохозяйственного сезона 2025 г. показал значительную неоднородность в обеспеченности посевов кукурузы доступной влагой. На основе данных наземной метеостанции (архив Rp5) установлено, что суммарное количество осадков за исследуемый период (с 16 апреля по 31 октября) составило 335,6 мм. Несмотря на то, что данный объем близок к среднесезонным значениям, его распределение во времени было неравномерным, что создало предпосылки для возникновения водного дефицита в критические фазы развития культуры.

Сравнительный анализ суммарной эвапотранспирации (ET), рассчитанной на основе спутниковых данных MODIS (061/MOD16A2), позволил количественно оценить вклад орошения в водный баланс посевов. Основные показатели приведены в таблице 1.

Суммарное испарение (291,0 мм) оказалось существенно ниже объема выпавших осадков (335,6 мм). Это указывает на низкий коэффициент использования естественной влаги по причине угнетения растений и потерь на поверхностный сток.

На орошаемом массиве зафиксировано превышение ET над уровнем осадков на 27,4 мм, что свидетельствует о вовлечении в водный баланс поливной воды. Однако определяющим показателем эффективности орошения является разница в суммарном испарении между участками,

Таблица 1. Сравнительные показатели водного баланса опытных участков
Table 1. Comparative indicators of the water balance of the experimental plots

Показатель / Indicator	Контроль (Богара) / Control (Bogara)	Орошаемый участок / Irrigated plot	Разница / Эффект / Difference / Effect
Σ Осадков (по данным Rp5), мм / Σ Precipitation (according to Rp5 data), mm	335,6		–
Суммарная эвапотранспирация (ЕТ), мм / Total evapotranspiration (ET), mm	291,0	363,0	+72,0 мм (+24,7%)
Разница между ЕТ и Σ осадков, мм / Difference between ET and precipitation Σ , mm	-44,6	+27,4	

которая составила 72,0 мм (720 м³/га). Именно этот дополнительный объем влаги обеспечил поддержание транспирационного потока в критические фазы развития культуры. Динамика эвапотранспирации показана на рисунке 1.

Анализ хода кривых показывает, что до середины июля показатели испарения на обоих участках были сопоставимы. Однако начиная со второй декады августа наблюдается резкое расхождение: богарный участок 03654-1122 вошел в состояние водного стресса, что привело к снижению ЕТ, в то время как на участке 03654-1042 за счет полива поддерживался высокий уровень транспирации.

Реакция посевов на изменение водного режима была зафиксирована с помощью индекса вегетации NDVI. Для обеспечения достоверности данных временные ряды были очищены от атмосферных помех методом статистической фильтрации выбросов (рис. 2).

На графике отчетливо прослеживается деградация фотосинтетической активности на богарном участке в августе, в то время как орошаемый участок сохранял высокие значения индекса до начала сентября. Среднесезонный индекс NDVI для орошаемого поля составил 0,617, что на 75,7% выше показателя богары (0,351).

Пространственное распределение биомассы в период максимального развития вегетативной массы наглядно представлено на рисунке 3.

Высокая детализация снимков Sentinel-2 (10 м/пикс) позволила выявить однородность посевов на орошении и зафиксировать угнетение растительности на богарном поле.

Взаимосвязь накопленной биомассы и конечной урожайности была подтверждена методом прямого комбайнирования. Фактическая урожайность на богарном участке составила 11,3 ц/га. Использование метода экстраполяции через интегральные показатели NDVI позволило

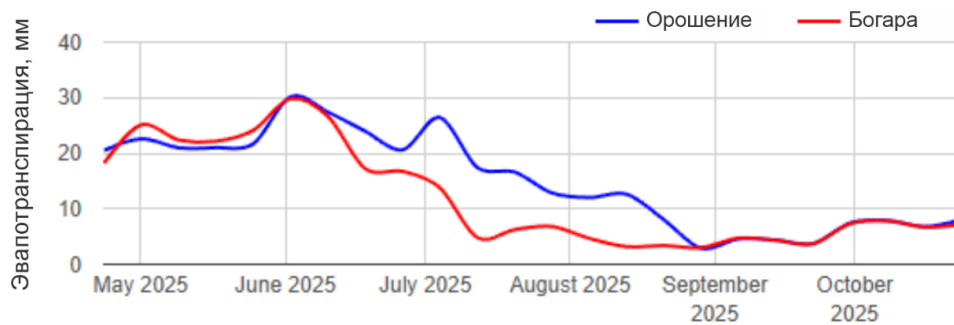


Рис. 1. Динамика эвапотранспирации
Fig. 1. Evapotranspiration dynamics

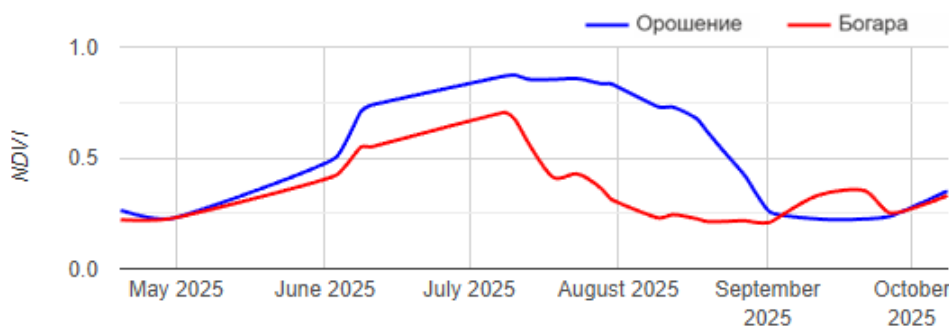


Рис. 2. Динамика вегетации
Fig. 2. Vegetation dynamics

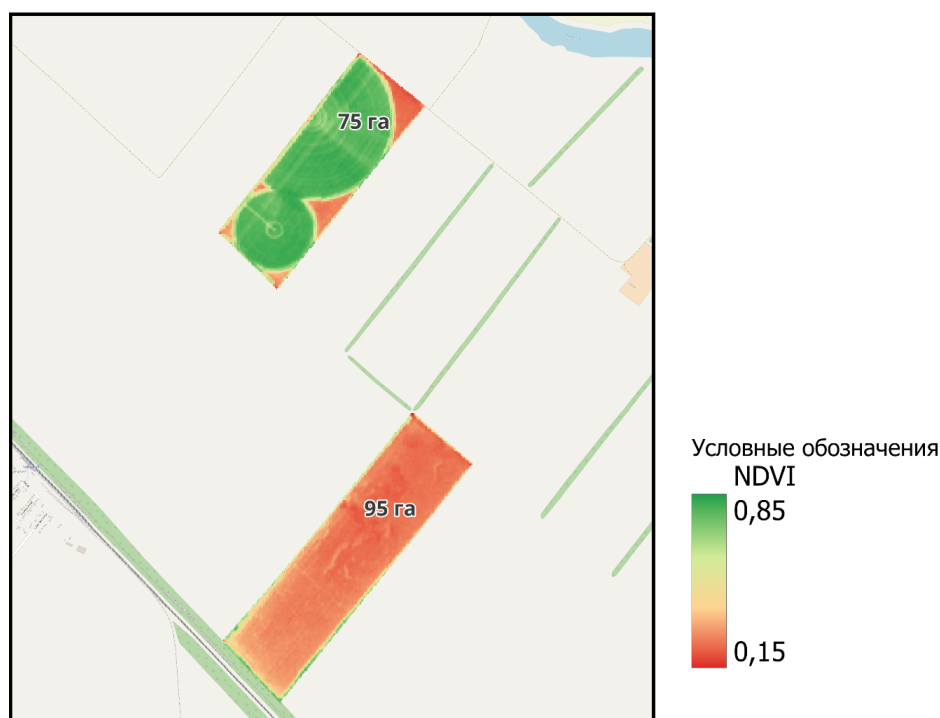


Рис. 3. Распределение индекса NDVI на исследуемых участках в период максимального развития вегетативной массы, июль-август 2025 г. (визуализация построена на основе композита снимков Sentinel-2 L2A за период с 15 июля по 15 августа 2025 г.)

Fig. 3. Distribution of the NDVI index in the study areas during the period of maximum development of vegetative mass (July–August 2025). The visualization is based on a composite of Sentinel-2 L2A images for the period from 15.07 to 15.08.2025

рассчитать прогнозную урожайность для орошаемого массива, которая составила 19,86 ц/га.

Таким образом, дополнительные 72,0 мм (720 м³/га) эффективного водопотребления, зафиксированные по данным MODIS на орошаемом участке, обеспечили прибавку урожая в размере 8,56 ц/га (или 75,7% к контролю). Это соответствует высокому уровню окупаемости орошения: на каждые 100 м³ дополнительно испаренной влаги получено 1,19 ц зерна кукурузы.

Искусственное орошение позволило преодолеть засушливые условия сезона 2025 г., обеспечив почти двукратный прирост продуктивности. Это доказывает, что своевременная подача воды в критические фазы развития кукурузы не просто компенсирует дефицит осадков, а радикально повышает коэффициент использования всех факторов роста (включая естественные осадки и солнечную радиацию), предотвращая преждевременную деградацию фотосинтетического аппарата

Выводы

Проведенные исследования подтверждают определяющую роль искусственного орошения в обеспечении стабильной продуктивности кукурузы в условиях юга России.

Анализ метеорологических условий сезона 2025 г. показал, что даже при формальном соответствии суммарных осадков среднесезонным нормам их крайне неравномерное распределение во времени создает критические риски для богарного земледелия.

Дефицит влаги во второй половине лета сократил срок вегетационного периода на целый месяц на контрольном участке. В то же время на орошаемом массиве за счет дополнительной подачи воды удалось продлить период активного фотосинтеза до плановых сроков уборки в октябре.

Сравнительная оценка водного баланса на основе данных MOD16A2 позволила количественно обосновать преимущество полива. Установлено, что суммарная эвапотранспирация на орошении составила 363 мм, что на 72 мм (720 м³/га) выше показателей контрольного участка.

В то время как на богарном поле значительная часть осадков не была усвоена, на опытном участке орошение позволило не только полностью использовать ресурс осадков, но и создать дополнительный транспирационный поток. Это предотвратило преждевременное старение посевов и обеспечило рост урожайности на 75,7%

относительно контроля. Итоговые данные подтверждают, что в засушливые периоды 2025 г. орошение явилось решающим фактором сохранения фотосинтетического потенциала кукурузы

Таким образом, в засушливых регионах орошение выступает в качестве стратегического инструмента стабилизации агробизнеса,

Список использованных источников

1. Ториков В.Е., Дронов А.В., Ториков В.В. и др. Ценность кукурузы, сорговых культур и их урожайность в зависимости от приемов выращивания // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 5 (75). С. 15-22. EDN: HPWMEH
2. Адамень Ф.Ф., Коковихин С.В., Сташкина А.Ф. Эффективность применения искусственного увлажнения с учетом метеорологических факторов при выращивании основных сельскохозяйственных культур в условиях Северного Причерноморья // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2023. № 33 (196). С. 34-43. EDN: ESFBTW
3. Чернявская С.А., Савченко ГИ., Данильченко Д.С. Анализ развития отрасли растениеводства в Краснодарском крае, Крыму, Астраханской области // Журнал прикладных исследований. 2025. № 6. С. 49-56
4. Гарманова Е.А., Айвазян Н.С., Ляховецкий А.М. Анализ использования земельных угодий в Краснодарском крае // Вестник науки. 2025. Т. 1, № 5 (86). С. 60-82. EDN: ELTTEY
5. Гумбаров А.Д., Долобешкин Е.В., Пасниченко П.Г., Карадаян Л.И. Эффективность применения комплексных мелиораций в условиях Краснодарского края // Дневник науки. 2019. № 3. С. 28-28
6. Jahangir M.H., Arast M. Remote sensing products for predicting actual evapotranspiration and water stress footprints under different land cover // Journal of Cleaner Production. 2020. T. 266. P. 121818
7. Degano M.F., Rivas R.E., Carmona F., Niclòs R., Sánchez J.M. Evaluation of the MOD16A2 evapotranspiration product in an agricultural area of Argentina, the Pampas region // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2021. T. 24, № 2. С. 319-328
8. Ronco E., Borgogno Mondino E.C. Aligning Evapotranspiration from MOD16A2. 061 Product to Ground Estimates in Piemonte (NW Italy): an analysis of temporal and spatial biases // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. T. 48. С. 201-206
9. Bhaga T.D., Dub T., Shekede M.D., Shoko C. Investigating the effectiveness of Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI satellite data in monitoring the effects of drought on surface water resources in the Western Cape Province, South Africa // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2023. T. 32. С. 101037
10. Ma H. et al. Satellite canopy water content from Sentinel-2, Landsat-8 and MODIS: Principle, algorithm and assessment // Remote Sensing of Environment. 2025. T. 326. С. 11480
11. Huang J. et al. Remotely sensed high-resolution soil moisture and evapotranspiration: Bridging the gap between science and society // Water Resources Research. 2025. T. 61, № 5. С. e2024WR037929
12. Kaur H., Tyagi S., Mehta M., Singh D. Time series (2001/2002-2021) analysis of Earth observation data using Google Earth Engine (GEE) for detecting changes in land use land cover (LULC) with specific reference to forest cover in East Godavari Region, Andhra Pradesh, India // Journal of Earth System Science. 2023. T. 132, № 2. С. 86

позволяющего реализовать биологический потенциал культуры. Использование данных ДЗЗ и платформы Google Earth Engine доказало свою состоятельность как надежного инструмента для оперативного мониторинга и ретроспективного анализа эффективности водопользования в крупнотоварном производстве.

References

1. Torikov V.E., Dronov A.V., Torikov V.V., Osipov A.A., Lantsev V.V. The value of corn, sorghum crops and their yield depending on the methods of cultivation. 2019. № . 5 (75). P. 15-22. EDN: HPWMEH
2. Adamen F.F., Kokovikhin S.V., Stashkina A.F. Effectiveness of usage of artificial humidification taking into account meteorological factors in the cultivation of basic agricultural crops in the conditions of the Northern Black Sea region // Izvestiya of agricultural science of Tavrida. 2023. № . 33 (196). P. 34-43. EDN: ESFBTW
3. Chernyavskaya S.A., Savchenko G.I., Danilchenko D.S. Analysis of the development of the plant industry in the Krasnodar territory, Crimea, Astrakhan region // Journal of applied studies. 2025. № . 6. P. 49-56.
4. Garmanova E.A., Ayvazyan N.S., Lyakhovetsky A.M. Analysis of the use of land estates in the Krasnodar territory // Vestnik of science. 2025. V. 1. № . 5 (86). P. 60-82. EDN: ELTTEY
5. Gumberov A.D., Dolobeshkin E.V., Pasnichenko P.G., Karadayan L.I. Effectiveness of the application of complex land reclamation in the conditions of the Krasnodar territory // Science Diary. 2019. № . 3. P. 28-28.
6. Jahangir M.H., Arast M. Remote sensing products for predicting actual evapotranspiration and water stress footprints under different land cover // Journal of Cleaner Production. 2020. M. 266. P. 121818.
7. Degano M.F. Rivas R.E., Carmona F., Niclòs R., Sánchez J.M. Evaluation of the MOD16A2 evapotranspiration product in an agricultural area of Argentina, the Pampas region // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2021. V. 24. № . 2. P. 319-328.
8. Ronco E., Borgogno Mondino E.C. Aligning Evapotranspiration from MOD16A2. 061 Product to Ground Estimates in Piemonte (NW Italy): an analysis of temporal and spatial biases // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. V. 48. P. 201-206.
9. Bhaga T.D., Dube T., Shekede M.D., Shoko C. Investigating the effectiveness of Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI satellite data in monitoring the effects of drought on surface water resources in the Western Cape Province, South Africa // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2023. V. 32. P. 101037.
10. Ma H. et al. Satellite canopy water content from Sentinel-2, Landsat-8 and MODIS: Principle, algorithm and assessment // Remote Sensing of Environment. 2025. V. 326. P. 114801.
11. Huang J. et al. Remotely sensed high-resolution soil moisture and evapotranspiration: Bridging the gap between science and society // Water Resources Research. 2025. V. 61. № . 5. P. e2024WR037929.
12. Kaur H., Tyagi S., Mehta M., Singh D. Time series (2001/2002-2021) analysis of Earth observation data using Google Earth Engine (GEE) for detecting changes in land use land cover (LULC) with specific reference to forest cover in East Godavari Region, Andhra Pradesh, India // Journal of Earth System Science. 2023. V. 132. № . 2. P. 86.

13. Feng S., Li W., Xu J., Liang T., Ma X., Wang W., Yu H. Land use/land cover mapping based on GEE for the monitoring of changes in ecosystem types in the upper Yellow River basin over the Tibetan Plateau // *Remote Sensing*. 2022. Т. 14, № 21. С. 5361

14. Леус Н.А., Кумпилов Р.А. Метеорологические космические системы России и мира: экономический эффект // *Экономика космоса*. 2025. Т. 4, № 14. С. 3-15

15. Ермолаева О.С., Зейлигер А.М., Буравчиков Д.А. Идентификация орошаемых агроценозов по данным дистанционного зондирования земли с применением методов машинного обучения // *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса*. 2024. Т. 11. С. 178; EDN: JVLRVK

16. Зейлигер А.М., Доброхотов А.В., Ермолаева О.С., Котов Я.С. Сегментирование потока суточного суммарного испарения орошаемого производственного посева сои по модели METRIC и данным Landsat-8 // *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса*. 2025. Т. 22, № 2. С. 99-119. EDN: QQHEXZ

Информация об авторах

Роман Владимирович Калинин, канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник ФБНУ «Федеральный исследовательский центр "Почвенный институт им. В.В. Докучаева"»; ORCID ID: 0000-0003-3136-8468; SPIN-код автора: 2750-7629; Web of Science Researcher ID: MDS-9046-2025; Scopus Author ID: 572106369508; kalinichenko_rv@esoil.ru

Алексей Евгеньевич Беденко, младший научный сотрудник ФБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения "Радуга"»; ORCID ID: 0009-0005-7522-0395; SPIN-код автора: 4065-2762; Web of Science Researcher ID: PLC-5413-2026; timbothdoom@gmail.com

Вклад авторов

Р.В. Калинин – разработка концепции исследований, формулировка целей и задач работы, организация полевых наблюдений, сбор и первичная обработка наземных метеорологических данных, участие в интерпретации результатов и подготовке разделов «Введение» и «Материалы и методы исследований». А.Е. Беденко – обработка спутниковых данных MODIS и Sentinel-2 в среде Google Earth Engine и QGIS, расчет эвапотранспирации и индекса NDVI, статистическая обработка временных рядов, формирование прогнозной урожайности, подготовка разделов «Результаты и их обсуждение» и «Выводы», визуализация данных (графики, карты, рисунки).

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received 13.01.2026

Поступила после рецензирования / Received 23.02.2026

Принята к публикации / Accepted 25.02.2026

13. Feng S., Li W., Xu J., Liang T., Ma X., Wang W., Yu H. Land use/land cover mapping based on GEE for the monitoring of changes in ecosystem types in the upper Yellow River basin over the Tibetan Plateau // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. № 21. P. 5361.

14. Leus N.A., Kumpilov R.A. Meteorological Space Systems of Russia and the World: Economic Effect. // *The economy of space*. 2025. V. 4. № 14. P. 3-15.

15. Ermolaeva O.S., Zeiliger A.M., Buravchikov D.A. Identification of irrigated agroecosystems based on remote sensing of the earth using machine learning methods. // *Modern problems of remote sensing of the earth from space*. 2024. V. 11. P. 178. EDN: JVLRVK

16. Zeiliger A.M., Dobrokhotov A.V., Ermolaeva O.S., Kотов Ya.S. Segmentation of the flow of daily total evaporation of irrigated industrial sowing of soybeans according to the METRIC model and Landsat-8 data. // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2025. V. 22. № 2. P. 99-119. EDN: QQHEXZ

About the authors

Roman V. Kalinichenko, CSs (Agro), senior researcher of the Federal Research Center "Soil Institute named after V.V. Dokuchaev"; ORCID ID: 0000-0003-3136-8468; Author's SPIN-code: 2750-7629; Web of Science Researcher ID: MDS-9046-2025; Scopus Author ID: 572106369508; kalinichenko_rv@esoil.ru

Alexey E. Bedenko, Junior Researcher, FBNU All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply Systems "Raduga"; ORCID ID: 0009-0005-7522-0395; Author's SPIN-code: 4065-2762; Web of Science Researcher ID: PLC-5413-2026; timbothdoom@gmail.com

Contribution of the authors

R.V. Kalinichenko – development of the research concept, formulation of goals and objectives of the work, organization of field observations, collection and primary processing of ground-based meteorological data, participation in the interpretation of the results and preparation of the sections "Introduction" and "Materials and methods".

A.E.: Bedenko – processing of MODIS and Sentinel-2 satellite data in the Google Earth Engine and QGIS environment, calculation of evapotranspiration and NDVI index, statistical processing of time series, formation of predicted yields, preparation of the sections "Results and discussion" and "Conclusion", data visualization (graphs, maps, figures).

Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 626/627:621.22:542.45

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-55-63>



ТЕХНОЛОГИЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВОЛН В ВИДЕ ЖИДКОГО ВОЗДУХА, ЛЬДА И ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ

В.В. Миронов¹, Ю.А. Иванюшин²✉, И.Ю. Шалагин³, А.А. Кадысева⁴

^{1,2,3} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет»; г. Тюмень, Российская Федерация

⁴ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; г. Москва, Российская Федерация

¹ vvmironov@list.ru; ORCID: 0000-0001-8939-850X

² ivanjushinja@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-4470-6967

³ shalaginij@tyuiu.ru

⁴ kadyseva@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8703-5684

Аннотация. Цель исследований – разработка технологии аккумулирования возобновляемой энергии морских волн в виде сжиженного воздуха, льда и горячей воды. Тип исследований – теоретико-прикладной; использовались аналитические зависимости и численное моделирование предложенной схемы преобразования энергии. Предлагается модульная система на основе сильфонного насоса-компрессора, который приводится в действие бум с полиспастом (позволяет удвоить ход рабочего органа), реагирующим на движение волн. Полученная пневматическая энергия последовательно преобразуется в тепло (горячая вода), холод (лед) и механическую работу для сжижения воздуха. Выполнен гипотетический расчет по аналитическим зависимостям для высоты волн от 0,2 до 1,0 м при глубине погружения компрессора 30 м и периоде волны 4 с. Результаты исследований свидетельствуют о том, что модульная установка способна генерировать до 80 л/ч горячей воды, 14 кг/ч льда и около 7,5 кг/ч сжиженного воздуха (при высоте морской волны, равной 1 м). Одними из преимуществ являются его модульность, экологичность и возможность тригенерации. В результате исследований сделан вывод о том, что технология позволяет в локальном масштабе обеспечивать объекты некапитального строительства коммунальными и энергетическими ресурсами: тепловой энергией (горячая вода), холодом (лед), а также получать сжиженный воздух для хранения энергии. Механическая мощность второго детандера может быть преобразована в электричество. Решение является эффективным в зонах с неразвитой инфраструктурой (удаленных или изолированных территорий) при высоте волн от 0,2 м.

Ключевые слова: насос-компрессор, энергия морских волн, генерация, электрогенератор, возобновляемая энергия, сжатый воздух, системы жизнеобеспечения

Формат цитирования: Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Шалагин И.Ю., Кадысева А.А. Технология аккумулирования энергии морских волн в виде жидкого воздуха, льда и горячей воды. Природообустройство. 2026;Т.19(2):55-63. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-55-63>

Original article

TECHNOLOGY FOR ACCUMULATING THE ENERGY OF SEA WAVES IN THE FORM OF LIQUID AIR, ICE AND HOT WATER

V.V. Mironov¹, Yu.A. Ivanyushin^{2✉}, I.Yu. Shalagin³, A.A. Kadyseva⁴^{1,2,3}“Tyumen Industrial University”; Tyumen, Russian Federation⁴Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev”; Russian Federation¹vvmironov@list.ru; ORCID: 0000-0001-8939-850X²ivanjushinja@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-4470-6967³shalaginij@tyuiu.ru⁴kadyseva@mail.ru; ORCID: 0000-0001-8703-5684

Abstract. The aim of the research is to develop a technology for accumulating renewable energy from sea waves in the form of liquefied air, ice and hot water. **Methodology.** The type of research is theoretical and applied. Analytical dependencies and numerical simulation of the proposed energy conversion scheme were used. A modular system is proposed, based on a bellows pump-compressor driven by a buoy with a pulley system (which doubles the stroke of the working element) that responds to wave motion. The resulting pneumatic energy is successively converted into: heat (hot water), cold (ice), mechanical work for air liquefaction. A hypothetical calculation was performed using analytical dependencies for wave heights ranging from 0,2 to 1,0 m, with a compressor submersion depth of 30 m and a wave period of 4 sec. **Results.** The modular unit is capable of generating up to 80 l/h of hot water, 14 kg/h of ice, and approximately 7,5 kg/h of liquefied air (at a sea wave height of 1 m). One of the key advantages is its modularity, environmental friendliness, and the ability to perform trigeneration. **Conclusion.** The technology enables the local provision of utility and energy resources for non-capital construction facilities: thermal energy (hot water), cold (ice), as well as the production of liquefied air for energy storage. The mechanical power of the second expander can be converted into electricity. This solution is effective in areas with underdeveloped infrastructure (remote or isolated territories) at wave heights of 2 m and above.

Keywords: pump-compressor, wave energy, generation, electric generator, renewable energy, compressed air, life support systems

Format of citation: Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Shalagin I.Yu., Kadyseva A.A. Technology for accumulating the energy of sea waves in the form of liquid air, ice and hot water. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):55-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-55-63>

Введение. В мировом энергетическом балансе имеется тенденция к увеличению доли возобновляемых источников (ВИЭ). При этом для обеспечения беспрепятственного освоения ВИЭ требуются не только повышение конкурентоспособности, но и обеспечение надежности систем, и создание защитных систем охраны окружающей среды. Серьезным препятствием для большего применения различных видов ВИЭ являются высокие начальные инвестиционные затраты. Кроме того, до сих пор имеет место низкий начальный уровень доверия со стороны инвесторов, правительств и потребителей. Применение технологий на основе ВИЭ становится обоснованным в локальном масштабе, там, где нет возможностей для расширения зон централизованного энергоснабжения, поскольку имеют место удаленность и малые нагрузки населенных пунктов. В существующих условиях можно наблюдать мировой тренд относительно децентрализации энергетики [1-4]. Например, все большее количество потребителей заинтересованы

в установке оборудования для нужд теплоснабжения в границах рассматриваемых объектов [5].

Кроме того, наметилась тенденция при формировании локальных энергосистем их создания на основе модульных компонентов. Это дает возможность относительно легкого наращивания мощностей систем и повышения их производительности [4, 6].

По различным оценкам, глобальный энергетический потенциал морских волн может достигать 32 тыс. ТВт·ч/год (до 16 тыс. ТВт·ч/год с учетом направления волн) [7, 8]. Суммарная протяженность мировой береговой линии составляет около 800 тыс. км. При этом в 2% этой протяженности плотность волнового течения составляет более 30 кВт/м, что дает предполагаемый глобальный технический потенциал волнового течения около 500 ГВт электроэнергии (с эффективностью преобразования 40%).

Эффективные с точки зрения технико-экономических параметров места размещения объектов преобразования волновой энергии можно

найти по всему миру [7, 9]. В то же время фактические волновые режимы значительно различаются в разных регионах мира [8, 9].

С другой стороны, проблема аккумуляции энергии сейчас является одной из ключевых для всей мировой энергетики. Ведется поиск решений по хранению энергии малых мощностей и простых с инженерной точки зрения. Например, в строительстве новых гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) ежегодно вкладывается около 7...10 млрд долл. США [10].

В противовес ГАЭС в мире ведутся разработка и строительство накопителей энергии на сжатом воздухе [11, 12]. Так, сегодня Китайская Народная Республика ускоряет разработку проектов по хранению энергии на сжатом воздухе (CAES). В конце сентября 2022 г. уже запущена система хранения энергии на сжатом воздухе. К 2030 г. КНР планирует хранить до 1/4 избыточной энергии в виде сжатого воздуха [13].

С использованием различных инновационных технологий из энергии морских волн можно получить электрическую, тепловую, механическую энергию [14] для перекрытия потребностей различных отраслей народного хозяйства. Внедрение схем тригенерации энергии [15-17] из различных возобновляемых источников является распространенным способом повышения эффективности разрабатываемых технологий.

В статье предлагается использовать возобновляемую энергию морских волн высокой обеспеченности и повторяемости для автономного жизнеобеспечения объектов капитального и некапитального строительства – в частности, для получения горячей воды и льда (как источника холода), а также для хранения энергии в виде сжатого сжиженного воздуха.

Цель исследований: разработка технологии аккумуляции возобновляемой энергии морских волн в виде сжиженного воздуха, льда и горячей воды.

Материалы и методы исследований. Технические решения, разработанные коллективом авторов (Тюменский индустриальный университет, ООО «ЭЛЕКТРОРАМ»), позволяют преобразовывать энергию морских волн в пневматическую мощность. Из полученной пневматической мощности с использованием известных технологий можно генерировать тепло, холод или электрическую энергию для жизнеобеспечения объектов капитального и некапитального строительства в прибрежной зоне морских акваторий, в том числе сельскохозяйственных сооружений. Одно из разработанных авторами технических решений представляет собой сальфонный

насос-компрессор (патент РФ № 2817577) [14], приводимый в работу бумом с положительной плавуучестью, способным подстраиваться под изменяющийся уровень морской акватории под действием приливно-отливных или нагонных ветровых явлений. Схема насоса-компрессора представлена на рисунке 1.

Сальфонный насос-компрессор содержит всасывающий и нагнетательный клапаны, рабочую камеру, образованную соединенными между собой сальфонными элементами, закрытыми с одной стороны подвижной стенкой, а с другой стороны – неподвижным днищем. Сальфонные элементы снабжены кольцами жесткости для предотвращения их деформации под действием гидростатического давления воды на глубине установки рабочей камеры. К неподвижному днищу внутри рабочей камеры крепится твердый цилиндр. Цилиндр является поршнем воздушного компрессора. К неподвижному днищу рабочей камеры крепится плунжер водяного насоса высокого давления, входящий в корпус водяного насоса, прикрепленный к подвижной стенке рабочей камеры. Всасывающий и нагнетательный клапаны воздушного компрессора размещены на подвижной стенке рабочей камеры. Водяной насос позволяет получать гидравлическую энергию высокого давления – например, для питания обратноточеских установок для опреснения морской воды или питания систем капельного орошения сельскохозяйственных предприятий. Принцип действия сальфонного насоса-компрессора изложен в работах [14, 18].

Техническое решение способствует использованию возобновляемой энергии морских волн для параллельной генерации гидравлической и пневматической энергии, что позволяет исключить загрязнение окружающей среды парниковыми газами. Полученную гидравлическую энергию морской воды с высоким давлением можно использовать в обратноточеских установках для опреснения морской воды, преобразовывать в тепловую энергию и энергию холода в теплообменниках и детандерных установках.

Привод насоса-компрессора от энергии морских волн осуществляется согласно другому техническому решению (патент РФ № 2813520). Подробное описание работы изобретения представлено в описании патента [19].

При волнении поверхности акватории буй совершает возвратно-поступательные движения вверх и вниз. При движении буя вверх происходит перемещение вверх намотанных на барабан тросов на высоту морской волны. За счет блока, жестко связанного с донным фиксатором,

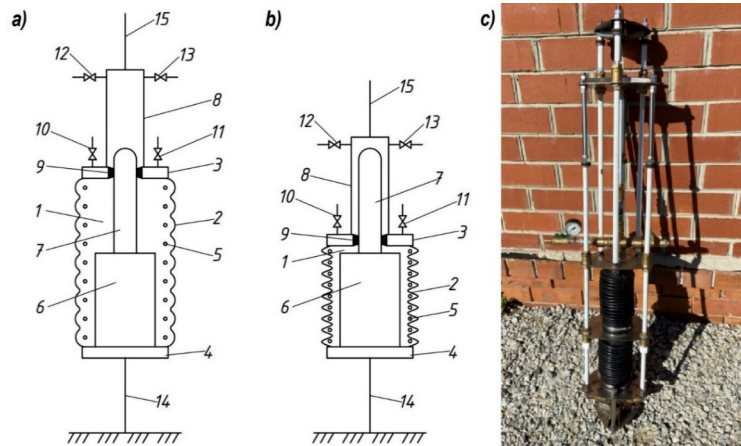


Рис. 1. Схема сифонного насоса-компрессора и общий вид прототипа:

а) положение на гребне волны; б) положение во впадине волны; с) общий вид прототипа сифонного насоса-компрессора (1 – рабочая камера; 2 – сифонные элементы из эластичного теплоизоляционного материала с низкой теплопроводностью; 3 – подвижная стенка рабочей камеры; 4 – неподвижное днище рабочей камеры; 5 – кольца жесткости; 6 – твердый или жидкий цилиндр, являющийся поршнем воздушного компрессора и уменьшающий образование мертвого объема в рабочей камере компрессора; 7 – плунжер водяного насоса; 8 – корпус водяного насоса; 9 – уплотнение плунжера водяного насоса; 10 – всасывающий клапан воздушного компрессора; 11 – нагнетательный клапан воздушного компрессора; 12 – всасывающий клапан водяного насоса; 13 – нагнетательный клапан водяного насоса; 14 – трос, соединяющий неподвижное днище рабочей камеры с дном акватории моря; 15 – трос, соединяющий корпус водяного насоса с плавучим буюм, снимающим энергию морских волн)

Fig. 1. Scheme of the nickname-compressor pump and the general type of prototype

а) position on the crest of the wave; б) the situation in the hollow of the wave; с) the general view of the prototype of the bellows-compressor pump: 1 – working chamber; 2 – bellows elements made of elastic heat-insulating material with low thermal conductivity; 3 – mobile wall of the working chamber; 4 – a fixed bottom of the working chamber; 5 – stiffeners; 6 – a solid or liquid cylinder, which is a piston of the air compressor and reducing the formation of a dead volume in the compressor working chamber; 7 – water pump plunger; 8 – water pump body; 9 – compaction of the plunger of the water pump; 10 – absorption valve of the air compressor; 11 – the injection valve of the air compressor; 12 – absorption valve of the water pump; 13 – the injection valve of the water pump; 14 – cable connecting the motionless bottom of the working chamber with the bottom of the sea; 15 – cable connecting the body of a water pump to a floating buoy that relieves the energy of sea waves

вертикальное перемещение рабочего органа насоса-компрессора будет в 2 раза больше высоты морской волны, что обеспечивает повышение производительности насоса-компрессора.

Представленное решение способно работать при малой высоте волны – от 0,2 м. Принципиальная схема преобразования и аккумуляции возобновляемой энергии морских волн в полезную мощность представлена на рисунке 2.

Рассмотрим работу энергетической станции, состоящей из плавучих модулей, работающих на энергии морских волн высокой обеспеченности и повторяемости на примере одного плавучего модуля. Генератор пневматической энергии (сифонный компрессор) погружен на глубину H , м, ниже поверхности морской акватории. Тогда избыточное давление p , Па, на глубине H составит:

$$p = \rho g H, \quad (1)$$

где ρ – плотность морской воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Сила гидростатического давления, F , Н, на верхнюю стенку воздушной камеры сифонного компрессора –

$$F = p\omega = p \frac{\pi D^2}{4}, \quad (2)$$

где ω – площадь, м², сечения круглой верхней стенки рабочей камеры диаметром D , м.

Погружение бую под уровень моря, компенсирующее его вес h_1 , м, –

$$h_1 = \frac{G}{\rho g \omega_1}, \quad (3)$$

где G – вес бую, Н; ω_1 – площадь поверхности бую, м².

Выталкивающая сила F_1 , Н, действующая на буй, при его погружении под уровень акватории –

$$F_1 = \rho g \omega_1 h_b, \quad (4)$$

где h_b – заданное рабочее погружение бую, м.

При работе полиспаста выталкивающая сила, действующая на буй, должна быть в 2 раза

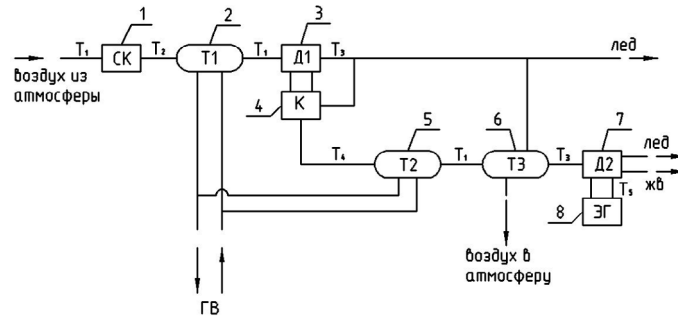


Рис. 2. Схема аккумулирования энергии морских волн в виде сжиженного воздуха, льда и горячей воды:

1 – сифонный компрессор; 2 – первый теплообменник для получения горячей воды; 3 – первый детандер для получения льда; 4 – компрессор с приводом от первого детандера; 5 – второй теплообменник для получения горячей воды; 6 – третий теплообменник для охлаждения воздуха перед сжижением; 7 – второй детандер для сжижения воздуха; 8 – электрогенератор с приводом от второго детандера

Fig. 2. Scheme of energy storage of sea waves in the form of liquefied air, ice and hot water

1 – bellows compressor; 2 – the first heat exchanger for hot water production; 3 – the first expander for ice production; 4 – compressor driven by the first expander; 5 – the second heat exchanger for hot water production; 6 – a third heat exchanger for cooling the air before liquefaction; 7 – a second expander for air liquefaction; 8 – an electric generator driven by a second expander

больше силы гидростатического давления на верхнюю стенку воздушной камеры сифонного компрессора. Тогда полная высота буя h_p , м, составит:

$$h_p = h_1 + h_b + h_3, \quad (5)$$

где h_3 – высота запаса, не менее 0,05 м.

Максимальная выталкивающая сила F_2 , Н, на величину которой должно рассчитываться крепление к донной поверхности акватории (вакуумный анкер), –

$$F_2 = \rho g \omega_1 h_p. \quad (6)$$

Ход рабочего органа сифонного компрессора h_n , м, при установке его на плавучий модуль с полиспастом, зависящий от высоты волны h , –

$$h_n = 2(h - h_b). \quad (7)$$

Массовая производительность сифонного компрессора по воздуху m , кг/ч, –

$$m = \frac{\frac{p_a}{RT_1} \cdot \omega h_n \cdot 3600}{t}, \quad (8)$$

где R – газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·°К); T_1 – абсолютная температура наружного воздуха, °К; p_a – атмосферное давление, Па; t – период морской волны, с.

Мощность адиабатного (идеального) сжатия воздуха в сифонном компрессоре N_c , Вт [20], –

$$N_c = \frac{k}{k-1} RT_1 \left(\left(\frac{p+p_a}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{m}{3600}, \quad (9)$$

где $k = 1,4$ – показатель адиабаты (показатель Пуассона).

Абсолютная температура воздуха T_2 , °К, после адиабатного сжатия в сифонном компрессоре –

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p+p_a}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (10)$$

Теоретическая массовая производительность по горячей воде m_v в первом теплообменнике после сифонного компрессора при нагреве воды T_H до 60°C (333°К) и охлаждении воздуха до температуры T_1 , кг/ч, –

$$m_v = \frac{c_p m (T_2 - T_1)}{c_v (T_1 - T_1)}, \quad (11)$$

где c_p – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°К); c_v – теплоемкость воды, Дж/(кг·°К).

Мощность адиабатного расширения воздуха N_p , Вт, в первом детандере, охлажденного в теплообменнике водой до температуры T_1 , –

$$N_p = \frac{k}{k-1} RT_1 \left(1 - \left(\frac{p_a}{p+p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \frac{m}{3600}. \quad (12)$$

Абсолютная температура воздуха T_3 , °К, после расширения в первом детандере –

$$T_3 = T_1 \left(\frac{p_a}{p+p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (13)$$

Мощность адиабатного (идеального) сжатия воздуха N_k , Вт, в компрессоре на одном валу с первым детандером –

$$N_k = \frac{k}{k-1} RT_3 \left(\left(\frac{p_k+p_a}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{m_x}{3600}, \quad (14)$$

где p_k – избыточное давление воздуха на выходе из компрессора; m_x – массовый часовой расход отобранного после первого детандера воздуха.

Массовый часовой расход охлажденного в первом детандере воздуха выбирается таким образом, чтобы мощность сжатия воздуха в компрессоре на одном валу с детандером N_k не превышала мощности расширения воздуха N_p в первом детандере.

Абсолютная температура воздуха T_4 , °К, после адиабатного сжатия в компрессоре на одном валу с первым детандером –

$$T_4 = T_3 \left(\frac{p_k + p_a}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (15)$$

Массовая производительность первого детандера по льду m_l , кг/ч, при охлаждении льда до температуры $T_{л} = -3^{\circ}\text{C}$ (270°К) с учетом отбора части воздуха компрессором и воздушным теплообменником перед вторым детандером для охлаждения воздуха в процессе сжижения во втором детандере –

$$m_l = \frac{c_p (m - 2m_x)(T_1 - T_3)}{q + c_v (T_1 - T_0) + c_E(T_0 - T)}, \quad (16)$$

где c_l – теплоемкость льда, Дж/(кг·°К); q – скрытая теплота плавления льда, Дж/кг; $T_0 = 273^{\circ}\text{K}$ – температура смены агрегатного состояния (перехода воды из жидкого в твердое состояние).

Теоретическая массовая производительность по горячей воде m_{v2} , кг/ч, во втором теплообменнике после компрессора с приводом от первого детандера при нагреве воды до температуры $T_H = 60^{\circ}\text{C}$ (333°К) и охлаждении воздуха до температуры T_1 –

$$m_{v2} = \frac{c_p m_x (T_4 - T_1)}{c_v (T_1 - T_1)}. \quad (17)$$

В третьем теплообменнике воздух с массовым расходом m_x охлаждается до температуры T_3 для последующего сжижения во втором детандере. Температура воздуха после второго детандера T_5 , °К, ниже температуры сжижения воздуха при атмосферном давлении:

$$T_5 = T_3 \left(\frac{p_a}{p_k + p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (18)$$

Мощность расширения воздуха N_{p2} , кВт, во втором детандере может быть использована для привода электрогенератора, установленного на валу второго детандера:

$$N_k = \frac{k}{k-1} RT_3 \left(1 - \left(\frac{p_a}{p_k + p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \frac{m_x \cdot 10^{-3}}{3600}. \quad (19)$$

Массовый расход сжиженного воздуха m_y , кг/ч, после второго детандера –

$$m_y = \frac{c_p m_x (T_3 - T_5)}{r + c_p (T_3 - T_5) + c_a (T_K - T_5)}, \quad (20)$$

где r – скрытая теплота сжижения воздуха, Дж/кг; c_a – теплоемкость сжиженного воздуха, Дж/(кг·°К); T_K – температура кипения воздуха, °К.

После второго детандера не весь массовый расход воздуха m_x превращается в сжиженный воздух m_y . Дополнительное получение льда из охлажденного воздуха после второго детандера m^2 можно рассчитать по формуле:

$$m_2 = \frac{c_p (m_x - m_y)(T_3 - T_5)}{q + c_v (T_1 - T_0) + c_E(T_0 - T)}. \quad (21)$$

Результаты и их обсуждение. По приведенным выше аналитическим зависимостям был выполнен гипотетический расчет преобразования энергии морских волн по схеме, изображенной на рисунке 3, в диапазоне изменения высоты волн h от 0,2 до 1,0 м в теоретическую полезную мощность для получения жидкого воздуха, льда и горячей воды. Сильфонный компрессор помещен на глубину $H = 30$ м под поверхность акватории моря. Период морской волны принят равным $t = 4$ сек. Площадь поверхности плавучего буя $\omega_b = 16$ м². Высота плавучего буя $h_p = 0,2$ м. Диаметр поршня сильфонного компрессора $D = 0,25$ м. Графические зависимости для мощности, полученные в результате гипотетического расчета, представлены на рисунках 3, 4.

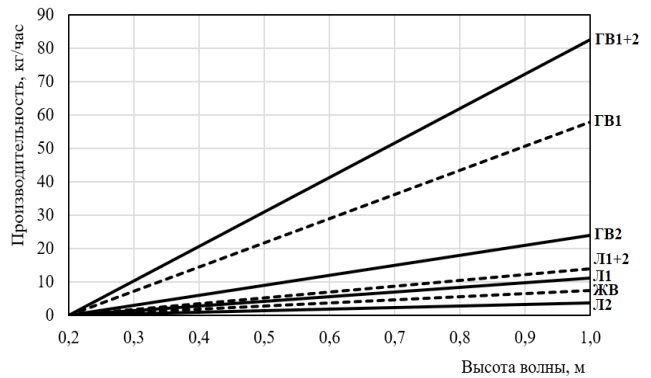


Рис. 3. Производительность по горячей воде, льду и сжиженному воздуху в зависимости от высоты волны:

- ГВ1 – горячая вода в первом теплообменнике;
- ГВ2 – горячая вода во втором теплообменнике;
- ГВ1+2 – суммарная производительность по горячей воде;
- Л1 – лед после первого детандера;
- Л2 – лед после второго детандера;
- Л1+2 – суммарная производительность по льду;
- ЖВ – производительность по жидкому воздуху

Fig. 3. Hot water, ice and liquefied air capacity depending on the wave height

- HW1 – hot water in the first heat exchanger,
- HWB2 – hot water in the second heat exchanger,
- HW1+2 – total hot water capacity;
- I – ice after the first expander,
- I2 – ice after the second expander,
- I1+2 – total ice capacity, LB – liquid air capacity

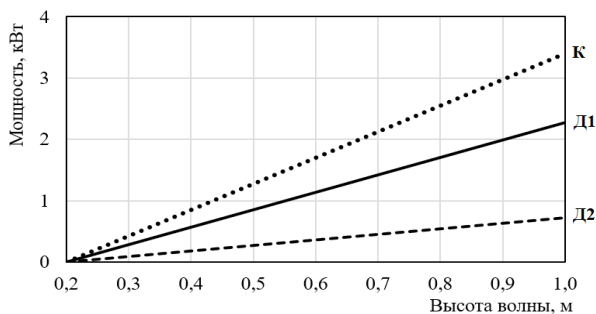


Рис. 4. Теоретическая мощность сжатия воздуха в сильфонном компрессоре и расширения в детандерах

в зависимости от высоты волны:

К – мощность адиабатного сжатия воздуха в сильфонном компрессоре;

D1 – мощность адиабатного расширения охлажденного воздуха в первом детандере;

D2 – мощность адиабатного расширения охлажденного воздуха во втором детандере

Fig. 4. Theoretical power of air compression in the bellows compressor and expansion in expanders depending on the wave height

K – is the power of adiabatic air compression in a bellows compressor; E1 – is the power of adiabatic expansion of cooled air in the first expander;

E2 – is the power of adiabatic expansion of cooled air in the second expander

Список использованных источников

1. Найденко А.А. Возобновляемая энергия океана // Технологическая независимость и конкурентоспособность Союзного государства, стран СНГ, ЕАЭС и ШОС: Сборник статей VI Международной НПК «Минские научные чтения-2023» (БГТУ, Минск, 6-8 декабря 2023 г.). Минск, 2023. Т. 3. С. 218-223.

2. Nsafon B.E.K., Owolabi A.B., Butu H.M., Roh J.W., Suh D., Huh J. Optimization and sustainability analysis of PV/wind/diesel hybrid energy system for decentralized energy generation // Energy Strategy Reviews. 2020. Vol. 32. P. 100570. DOI: 10.1016/j.esr.2020.100570. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X20301231> (дата обращения: 20.06.2025).

3. Robertson B., Bekker J., Buckham B. Renewable integration for remote communities: Comparative allowable cost analyses for hydro, solar and wave energy // Applied Energy. 2020. Vol. 264. P. 114677. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114677. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920301896> (дата обращения: 20.06.2025).

4. Львович Я.Е. Особенности использования возобновляемых источников энергии для распределенной генерации малой энергетики // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений: Сборник научных трудов 4-й Всероссийской НПК (ЮЗГУ, 22 ноября 2022 г.). Курск, 2022. С. 316-319.

5. Белоглазова Т.Н., Елькина А.И. Эффективность газоиспользующих теплогенераторов для индивидуального и децентрализованного теплоснабжения // Construction and Geotechnics. 2020. Т. 11, № 1. С. 80-91. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.08. URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/717/468> (дата обращения: 20.06.2025).

6. Преображенский Ю.П., Коновалов В.М. О методах создания рекомендательных систем // Вестник Воронежского

Выводы

Проведенные исследования, а также выполненный гипотетический расчет производительности модульной энергетической установки по жидкому воздуху, льду и горячей воде показали, что:

– разработанные технические решения по использованию энергии морских волн высокой обеспеченности и повторяемости могут применяться для автономного жизнеобеспечения объектов некапитального строительства в прибрежной зоне морских акваторий;

– снимаемая с вала второго детандера механическая мощность при использовании электрогенераторов позволит дополнительно к тепловой и энергии холода получать также электрическую энергию;

– данное техническое решение способно стать решением в локальном масштабе задачи обеспечения коммунальными и энергетическими ресурсами потребителей в зоне неразвитой инженерной инфраструктуры.

References

1. Naidenko A.A. Renewable Ocean Energy / A.A. Naidenko // Technological independence and competitiveness of the Union State, the CIS countries, the EAEU and the SCO: coll. art. VI VI international scientific-research conference “Minsk Scientific Readings – 2023”. (BSTU, Minsk: December 6-8, 2023). Minsk, 2023. Vol. 3. Pp. 218-223.

2. Nsafon B.E.K., Owolabi A.B., Butu H.M., Roh J.W., Suh D., Huh J. Optimization and sustainability analysis of PV/wind/diesel hybrid energy system for decentralized energy generation // Energy Strategy Reviews. 2020. Vol. 32. P. 100570. DOI: 10.1016/j.esr.2020.100570 [Electronic resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X20301231> (accessed 20.06.25).

3. Robertson B., Bekker J., Buckham B. Renewable integration for remote communities: Comparative allowable cost analyses for hydro, solar and wave energy // Applied Energy. 2020. Vol. 264. P. 114677. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114677 [Electronic resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920301896> (accessed 20.06.25).

4. Lvovich Ya.E. Features of using renewable energy sources for distributed generation of small-scale energy / Ya.E. Lvovich // Innovative methods for designing building structures of buildings and structures: collection of scientific papers of the 4th All-Russian Scientific and Practical Conference (SWSU, November 22, 2022). Kursk, 2022. З. 316-319.

5. Beloglazova T.N. Efficiency of gas-fired heat generators for individual and decentralized heat supply / T.N. Beloglazova, A.I. Elkina // Construction and Geotechnics. 2020. Vol. 11, No. 1. P. 80-91. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.08 [Electronic resource] <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/717/468> (accessed 06.20.25).

6. Preobrazhensky Yu.P. On methods of creating recommender systems / Yu.P. Preobrazhensky, V.M. Kononov

института высоких технологий. 2019. № 4 (31). С. 75-79. EDN: ОНЕКТК

7. Guo B.A., Ringwood J.V. A review of wave energy technology from a research and commercial perspective // IET Renewable Power Generation. 2021. Vol. 15, Iss. 14. P. 3065-3090. DOI: 10.1049/rpg.12302. URL: <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/rpg.12302> (дата обращения: 20.06.2025).

8. Khan M.Z.A., Khan H.A., Aziz M. Harvesting energy from ocean: technologies and perspectives // Energies. 2022. Vol. 15 (9). P. 3456. DOI: 10.3390/en15093456. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/9/3456> (дата обращения: 20.06.2025).

9. Satymov R., Bogdanov D., Dadashi M., Lavidas G., Breyer C. Techno-economic assessment of global and regional wave energy resource potentials and profiles in hourly resolution // Applied Energy. 2024. Vol. 364. P. 123119. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123119. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924005026> (дата обращения: 20.06.2025).

10. Технологии хранения энергии: в ожидании прорыва. URL: <https://peretok.ru/opinion/17406/> (дата обращения: 20.06.2025).

11. Bazdar E., Sameti M., Nasiri F., Haghight F. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 167. P. 112701. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112701. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122005901> (дата обращения: 20.06.2025).

12. Rabi A.M., Radulovic J., Buick J.M. Comprehensive Review of Compressed Air Energy Storage (CAES) Technologies // Thermo. 2024. Vol. 3 (1). Pp. 104-126. DOI: 10.3390/thermo3010008. URL: <https://www.mdpi.com/2673-7264/3/1/8> (дата обращения: 20.06.2025).

13. Китай запускает крупнейший завод в мире по хранению энергии на сжатом воздухе. URL: <https://habr.com/ru/companies/first/articles/692740/> (дата обращения: 20.06.2025).

14. Сильфонный насос-компрессор: Патент на изобретение № 2817577 С1 Российская Федерация, МПК F04B19/06 F03B13/18. № 2023118940: заявл. 17.07.2023; Опубл. 16.04.2024 / В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, Д.В. Миронов, Д.А. Суглобов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ).

15. Safari M., Sohani A., Sayyaadi H. A higher performance optimum design for a tri-generation system by taking the advantage of water-energy nexus // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 284. P. 124704, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124704 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262034748X> (дата обращения: 20.06.2025).

16. Ahmad Z., Shukla A.K., Singh V., Sharma M., Kumar P. Thermodynamic analysis of solar powered trigeneration arrangement for cooling, power and drinking water generation // Songklanakarin Journal of Science & Technology. 2022. Vol. 44 (6). Pp. 1419-1426. DOI: 10.14456/sjst-psu.2022.184. URL: <https://sjst.psu.ac.th/article.php?art=2954> (дата обращения: 20.06.2025).

17. Jahangiri M., Karimi Shahmarvandi F., Alayi R. Renewable energy-based systems on a residential scale in southern coastal areas of Iran: trigeneration of heat, power, and hydrogen // Journal of Renewable Energy and Environment. 2021. Vol. 8 (4). Pp. 67-76. DOI: 10.30501/jree.2021.261980.1170. URL: https://www.jree.ir/article_135328.html (дата обращения: 20.06.2025).

18. Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Суглобов Д.А. и др. Получение холода с использованием гидравлической энергии // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 1 (58). С. 157-165. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_157.

19. Способ очистки воды от соли и загрязнений: Патент на изобретение № 2813520 С1 Российская Федерация, МПК

// Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies. 2019. No. 4 (31). P. 75-79. EDN: ОНЕКТК

7. Guo B.A., Ringwood J.V. A review of wave energy technology from a research and commercial perspective // IET Renewable Power Generation. 2021. Vol. 15, iss. 14. P. 3065-3090. DOI: 10.1049/rpg.12302 [Electronic resource] <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/rpg.12302> (accessed 20.06.25).

8. Khan M.Z.A., Khan H.A., Aziz M. Harvesting energy from ocean: technologies and perspectives // Energies. 2022. Vol. 15 (9). P. 3456. DOI: 10.3390/en15093456 [Electronic resource] <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/9/3456> (accessed 20.06.25).

9. Satymov R., Bogdanov D., Dadashi M., Lavidas G., Breyer C. Techno-economic assessment of global and regional wave energy resource potentials and profiles in hourly resolution // Applied Energy. 2024. Vol. 364. P. 123119. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123119 [Electronic resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924005026> (accessed 20.06.25).

10. Energy storage technologies: waiting for a breakthrough: website [Electronic resource] <https://peretok.ru/opinion/17406/> (accessed 20.06.25).

11. Bazdar E., Sameti M., Nasiri F., Haghight F. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 167. P. 112701. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112701 [Electronic resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122005901> (accessed 20.06.25).

12. Rabi A.M., Radulovic J., Buick J.M. Comprehensive Review of Compressed Air Energy Storage (CAES) Technologies // Thermo. 2024. Vol. 3 (1). P. 104-126. DOI: 10.3390/thermo3010008 [Electronic resource] <https://www.mdpi.com/2673-7264/3/1/8> (accessed 20.06.25).

13. China launches the world's largest compressed air energy storage plant: website [Electronic resource] <https://habr.com/ru/companies/first/articles/692740/> (accessed 06.20.25).

14. Patent for invention No. 2817577 C1 Russian Federation, IPC F04B19/06 F03B13/18. Bellows pump-compressor: No. 2023118940: appl. 17/07/2023; published 16/04/2024 / V.V. Mironov Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov, D.A. Suglobov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tyumen Industrial University" (TIU).

15. Safari M., Sohani A., Sayyaadi H. A higher performance optimum design for a tri-generation system by taking the advantage of water-energy nexus // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 284. P. 124704, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124704 [Electronic resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262034748X> (accessed 20.06.25).

16. Ahmad Z., Shukla A.K., Singh V., Sharma M., Kumar P. Thermodynamic analysis of solar powered trigeneration arrangement for cooling, power and drinking water generation // Songklanakarin Journal of Science & Technology. 2022. Vol. 44 (6). P. 1419-1426. DOI: 10.14456/sjst-psu.2022.184 [Electronic resource] <https://sjst.psu.ac.th/article.php?art=2954> (accessed 20.06.25).

17. Jahangiri M., Karimi Shahmarvandi F., Alayi R. Renewable energy-based systems on a residential scale in southern coastal areas of Iran: trigeneration of heat, power, and hydrogen // Journal of Renewable Energy and Environment. 2021. Vol. 8 (4). P. 67-76. DOI: 10.30501/jree.2021.261980.1170 [Electronic resource] https://www.jree.ir/article_135328.html (accessed 20.06.25).

18. Mironov V.V. Getting cold using hydraulic energy / V.V. Mironov Yu.A. Ivanyushin, D.A. Suglobov [and others] // Regional architecture and engineering, 2024. No. 1 (58), P. 157-165. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_157.

C02F 1/44, F03B13/14. № 2023113267: заявл. 22.05.2023; Опубликовано 12.02.2024 / В.В. Миронов, Ю.А. Иванюшин, Д.В. Миронов, Д.А. Суглобов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ЭЛЕКТРОРАМ».

20. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 416 с.

Информация об авторах

Виктор Владимирович Миронов, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры инженерных систем и сооружений; ORCID: 0000-0001-8939-850X; Scopus 57196778368; РИНЦ ID384652; WOS Research ID AAH-6967-2019; vvmironov@list.ru

Юрий Андреевич Иванюшин, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений; ORCID: 0000-0002-4470-6967; Scopus 56199460900; РИНЦ ID758082; WOS Research ID V-9425-2019; ivanjushinja@tyuiu.ru

Игорь Юрьевич Шалагин, канд. техн. наук, доцент кафедры инженерных систем и сооружений; Scopus 56951226600; РИНЦ ID758535; shalaginij@tyuiu.ru

Анастасия Александровна Кадысева, д-р биол. наук, доцент, профессор кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций; ORCID: 0000-0001-8703-5684; Scopus 57214243999; РИНЦ ID698088; WOS Research ID M-6451-2016; kadyseva@mail.ru

Критерии авторства

Все авторы совместно выполнили теоретические и численные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи.

Конфликт интересов / Criteria of authorship

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received 23.06.2025

Поступила после рецензирования / Received 18.03.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 06.04.2026

19. Patent for invention No. 2813520 C1 Russian Federation, IPC C02F 1/44, F03B13/14. Method for purifying water from salt and contaminants: No. 2023113267: appl. 22/05/2023: published 12/02/2024 / V.V. Mironov Yu.A. Ivanyushin, D.V. Mironov, D.A. Suglobov; applicant Limited Liability Company "ELEKT-RORAM".

20. Cherkasskij V.M. Pumps, fans, compressors / V.M. Cherkasskij. – М.: Energoatomizdat. – 2-е ed., revised and add., 1984. – 416 p.

Information about the authors

Victor V. Mironov, DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Engineering Systems and Structures; ORCID: 0000-0001-8939-850X; Scopus 57196778368; РИНЦ ID384652; WOS Research ID AAH-6967-2019; vvmironov@list.ru

Yuriy A. Ivanyushin, CSc (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Systems and Structures; ORCID: 0000-0002-4470-6967; Scopus 56199460900; РИНЦ ID758082; WOS Research ID V-9425-2019; ivanjushinja@tyuiu.ru

Igor Yu. Shalagin, CSc (Eng), Associate Professor of the Department of Engineering Systems and Structures; Scopus 56951226600; РИНЦ ID758535; shalaginij@tyuiu.ru

Anastasia A. Kadyseva, DSc (Biol), Associate Professor, Professor of the Department of Agricultural Water Supply, Water Disposal, Pumps and Pumping Stations; ORCID: 0000-0001-8703-5684; Scopus 57214243999; РИНЦ ID698088; WOS Research ID M-6451-2016; kadyseva@mail.ru

Authorship criteria

All authors jointly performed theoretical and numerical studies, on the basis of which they summarized and wrote a manuscript. All authors equally participated in the writing of the article.

Оригинальная статья

УДК 631.67:631.347:621.65

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-64-71>



ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБОРОТОВ НАСОСОВ НА ПОДКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЯХ

Д.А. Колганов^{1✉}, М.Г. Загоруйко², Н.Ф. Рыжко³, С.Н. Рыжко⁴

¹ Саратовский государственный университет генетики, биотехнологий и инженерии имени Н.И. Вавилова; г. Саратов, Российская Федерация

² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Российская Федерация

^{3,4} Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации; г. Энгельс-23, Саратовская область, Российская Федерация

¹ dmi.kolg@mail.ru; ORCID: 0000-0001-9217-8989

² zagorujko.misha2013@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-7826-3773

³ ryzhonf@bk.ru; ORCID: 0009-0006-6352-8832

⁴ twgldes@gmail.ru; ORCID: 0009-0002-6499-8378

Аннотация. В статье указывается, что энергозатраты подкачивающих насосных станций, обеспечивающих полив, зачастую превышают оптимальные значения, и это негативно сказывается на эффективности орошения. Несмотря на реконструкцию орошаемых участков в мелиоративном комплексе страны, отмечается существенное разнообразие их технического оснащения; выделены 5 групп аналогичных орошаемых участков. Установлены отдельные ошибки при реконструкции насосных станций с монтажом завышенных насосов и некоторые эксплуатационные ошибки при неверном подключении числа работающих машин к насосному агрегату. В ходе исследований выполнен анализ энергоемкости водоподачи насосными станциями, в том числе оборудованными системами частотного регулирования оборотов, и выявлены пути снижения электропотребления при поливе. Оценка энергоемкости полива выполнялась на основе данных фидеров почасового потребления электроэнергии насосными станциями и мгновенных показателей в зависимости от технических характеристик насосных агрегатов, числа работающих дождевальных машин и их общего расхода воды. Исследованиями установлено, что происходит снижение потребления электроэнергии насосными агрегатами при уменьшении расхода воды путем его дросселирования, однако удельные затраты на подачу 1000 м³ воды растут и определяются двумя факторами: маркой насоса и выходным давлением станции. Частотное регулирование дает возможность уменьшить расход воды и энергопотребление, снизить давление на выходе станции до 0,4-0,6 МПа, сократить удельные затраты электроэнергии до 150-200 кВт·ч вместо 200-650 кВт·ч. Исследования эксплуатируемых насосных станций позволили определить недостатки при проектировании и их эксплуатации, устранение которых обеспечит экономию электроэнергии при поливе. Внедрение частотного регулирования обеспечит снижение потребления электроэнергии за поливной сезон в 1,2-3 раза и более в зависимости от технических параметров орошаемого участка, повышение надежности работы закрытой оросительной сети, а также плавный пуск и остановку агрегатов.

Ключевые слова: насосная станция, насосный агрегат, дождевальная машина, частотное регулирование оборотов насоса, энергозатраты на подачу воды

Формат цитирования: Колганов Д.А., Загоруйко М.Г., Рыжко Н.Ф., Рыжко С.Н. Энергосберегающая технология частотного регулирования оборотов насосов на подкачивающих станциях. Природообустройство. 2026;Т.19(2):64-71. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-64-71>

Original article

ENERGY-SAVING TECHNOLOGY FOR FREQUENCY CONTROL OF PUMP SPEEDS AT PUMPING STATIONS

D.A. Kolganov^{1✉}, M.G. Zagoruiko², N.F. Ryzhko³, S.N. Ryzhko⁴

¹ Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov; Institute of Engineering and Robotics; 410012, Saratov, Peter Stolypin Avenue, building 4, constr.3. Russia

² Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 109428, Moscow, 1st Institute Pas., 5, Russia

^{3,4} Volga Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation; 413123, Engels-23, Saratov region, Privolzhsky Work Settlement, Gagarina St., 1, Russia

¹ dmi.kolg@mail.ru; ORCID: 0000-0001-9217-8989

² zagorujko.misha2013@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-7826-3773

³ ryzhonf@bk.ru; ORCID: 0009-0006-6352-8832

⁴ twgldes@gmal.ru; ORCID: 0009-0002-6499-8378

Abstract. It is noted that energy costs at pumping pumping stations that supply water for irrigation in many cases remain high, which reduces the efficiency of irrigation. Despite the ongoing reconstruction of irrigated areas in the country's land reclamation complex, there is a significant variety in their technical equipment, and five groups of similar irrigated areas have been identified. There were some errors during the reconstruction of pumping stations with oversized pumps, and some operational errors occurred when the number of operating machines was incorrectly connected to the pumping unit. To analyze the energy intensity of water supply by pumping pumping stations, including those with frequency control of pump speed, and to determine ways to save electricity during irrigation. The energy intensity of irrigation was estimated based on data from feeders of hourly electricity consumption by pumping stations and instantaneous indicators depending on the technical characteristics of pumping units, the number of working rain machines and their total water consumption. Studies have established a decrease in electricity consumption by pumping units with a decrease in water consumption by throttling it, however, the unit cost of supplying 1000 m³ of water increases and is determined by the pump brand and pressure at the outlet of the pumping station. Frequency control makes it possible to reduce electricity consumption while reducing water consumption, reduce the pressure at the outlet of the pumping station to 0.4-0.6 MPa and reduce unit electricity costs to 140-200 kWt-h instead of 200-650 kWt-h. Studies of operated pumping stations have made it possible to identify design and operational deficiencies, the elimination of which will ensure energy savings during irrigation. The introduction of frequency control will ensure a reduction in electricity consumption during the irrigation season by 1.2-3 times or more, depending on the technical parameters of the irrigated area, increases the reliability of the closed irrigation network and ensures smooth start and stop of the units.

Keywords: pumping station, pumping unit, irrigation machine, frequency regulation of pump speed, energy costs for irrigation

Format of citation: Kolganov D.A., Zagoruiko M.G., Ryzhko N.F., Ryzhko S.N. Energy-saving technology for frequency control of pump speeds at pumping stations. *Prirodobustrojstvo*. 2026;19(2):64-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-64-71>

Введение. В мелиоративном комплексе страны ведущее место на орошении занимают многоопорные дождевальные машины (ДМ), которые обеспечивают круглосуточный полив в автоматическом режиме [1]. За последние 20 лет в Саратовской области в эксплуатацию вводятся только современные электрифицированные многоопорные дождевальные машины российского и иностранного производства. Согласно данным Росинформагротех [2] подавляющее большинство ДМ работают в диапазоне давления от 0,2 до 0,35 МПа. Установка в конце трубопровода водяной пушки большого расхода без подкачивающего насоса

требует повышения давления на входе ДМ до 0,4-0,52 МПа [3, 4].

Многоопорные дождевальные машины с гидроприводом модернизируются для работы на пониженном напоре. Изменение диаметра гидроцилиндров, а также установка дублирующего трубопровода способствуют понижению давления до 0,35-0,45 МПа с 0,5-0,7 МПа [5-7]. Многочисленные исследования показывают, что затраты электроэнергии на подачу воды насосной станций определяются маркой насоса, давлением на его выходе и возможностью работы в оптимальном и энергосберегающем режимах [7-10]. Затраты электроэнергии на подачу

воды при поливе в настоящее время имеют значительные величины, поэтому определение способов и технических решений для уменьшения потребления энергии на насосных станциях является актуальной задачей.

Цель исследований: изучить энергоёмкость подачи воды подкачивающими насосными станциями, в том числе с частотным регулированием оборотов насоса, и определить способы экономии электроэнергии при поливе.

Материалы и методы исследований. В Саратовской области выполнен анализ почасового и мгновенного электропотребления насосных станций Приволжской, Энгельсской и Комсомольской оросительных систем (ОС). Почасовое электропотребление получено авторами по данным фидеров, зафиксированным на насосных станциях в Приволжском и Энгельском филиалах ФГБУ «Саратовмелиоводхоз». Мгновенное электропотребление на насосных станциях фиксировалось на мониторах оборудования частотного регулирования и электроприборах. Это позволило оценить энергозатраты, необходимые для водоснабжения при орошении. Сейчас осуществляется реконструкция ОС, направленная на улучшение их технических параметров и качественных показателей. Однако ввиду больших затрат на проведение реконструкции орошаемых участков наблюдаются как значительное многообразие их комплектования, так и ошибки при выборе насосов и при эксплуатации ДМ.

На оросительных системах нами выделены 5 групп орошаемых участков с аналогичной комплектацией насосных станций агрегатами и дождевальными машинами. В первую группу входят орошаемые участки, где продолжают эксплуатироваться высоконапорные насосы Д1250-125 и QVD в связке с электродвигателями мощностью от 400 до 630 кВт, обеспечивающие подачу воды на серийные высоконапорные ДМ «Фрегат». Данная конфигурация сохраняется на НА-А и НС-«Роса» в ЗАО «Трудовое», НС-47п Приволжской ОС, НС-2 Энгельсской ОС и на других насосных станциях.

Вторая группа включает в себя орошаемые участки от НС-11п, 4п, 43а и 43б в ЗАО ПЗ «Мелиоратор», где высоконапорные насосы Д1250-125 подают воду на низконапорные ДМ Zimmatic, работающие при низком давлении 0,2-0,5 МПа, и где проведена замена изношенных стальных подземных трубопроводов на полиэтиленовые, не подверженные коррозии. Аналогичные режимы работы имеют место на орошаемых участках от БКНС-Б на Приволжской ОС, на НС-4 – Энгельсской ОС и др.

В третью группу входят орошаемые участки, где на насосных станциях установлены насосы (300Д70, 200Д90) с более низким номинальным давлением 0,7-0,9 МПа, которые подают воду на низконапорные ДМ «Каскад», «Кубань», Zimmatic и др., и где проведена замена подземных изношенных трубопроводов. Такая эксплуатация имеет место на орошаемых участках от НС «Саратовка» Приволжской ОС; НС-3, НС-10, НС «Куйбышева» Энгельсской ОС и др.

Четвертая группа объединяет орошаемые участки, на насосных станциях которых смонтированы насосы с номинальным низким давлением в диапазоне 0,5-0,6 МПа. Подобный режим эксплуатации реализован на участках, обслуживаемых насосными станциями НС-41п, 42п, 2п и 46п Приволжской ОС, а также ПНС-4 и 4а Комсомольской ОС и др. В этой группе насосы модели Д1250-63 обеспечивают подачу воды посредством полиэтиленовых труб на низконапорные дождевальные машины включая «Каскад», «Zimmatic», «Valley» и иные аналоги.

Пятая группа охватывает орошаемые участки, на насосных станциях которых установлено оборудование с частотным регулированием оборотов насосов. Эти насосы работают при номинальном низком давлении 0,5-0,6 МПа и подают воду по полиэтиленовым трубам на низконапорные дождевальные машины. Такой режим реализован на участках, обслуживаемых НС-10п, 22п, 5п и БКНС «Агрофос» Приволжской ОС, а также в ООО «Воскресенское» (Энгельсская ОС), ООО «Азимут», ООО «Студенецкое» и др. В этих системах задействованы насосы типа Д1250-63 и «Грундфос», обеспечивающие подачу воды на низконапорные ДМ, включая «Каскад» и «Zimmatic».

В ходе исследований орошаемых территорий проводился сбор данных по ключевым параметрам дождевальных машин: расход воды, входное давление, площадь полива, количество задействованных машин и продолжительность орошения участка. При оценке качества полива дождевальных машин определялись равномерность, нормы полива вдоль трубопровода и соответствие давления перед насадками [11]. Также проверялось совпадение паспортных и реальных показателей расхода воды дождевальных машин. Энергосберегающая технология подачи воды на насосной станции основана на возможности снижения потребления электроэнергии при изменении частоты вращения насоса до оптимальных значений расхода воды и напора на текущий момент времени согласно исследованиям Б.С. Лезнова, Я.И. Гинзбурга, Е.М. Зоркина

и др. Энергозатраты насосных станций фиксировались по показаниям фидеров (за 1 час полива). На насосных станциях регистрировались величина потребляемого тока, частота и напряжение сети, давление на выходе насосной станции. Удельное потребление электроэнергии на подачу 1000 м³ воды (N_y) рассчитывалось на основе данных о потребляемой электроэнергии (N , кВт) по фидерам и суммарного расхода воды насосной станции (Q_c , м³/ч), равного совокупному расходу всех дождевальных машин, по формуле [12]:

$$N_y = N \cdot 1000 / Q_c, \text{ (кВт} \cdot \text{ч на } 1000 \text{ м}^3\text{)}. \quad (1)$$

Напор на выходе насосной станции (H_v) определялся напором наиболее удаленной дождевальной машины ($H_{дм}$), величиной потерь напора по длине трубопровода ($h_{п}$) и величиной геодезического подъема (h_r):

$$H_v = H_{дм} + h_{п} + h_r. \quad (2)$$

Результаты и их обсуждение. В ходе исследований выявлено, что наибольшие затраты на подачу воды характерны для высоконапорных насосов типа Д1250-125 (НС-А, НС-Роса и аналогичные), обеспечивающих водоснабжение высоконапорных дождевальных машин «Фрегат». На насосной станции поддерживается давление в диапазоне 0,85-1,1 МПа. При этом от одного насоса может одновременно работать лишь небольшое количество дождевальных машин – обычно 2-3 единицы. Подключение большего числа машин невозможно по причине недостаточного давления, необходимого для их перемещения.

На примере насосной станции НС-А (АО ПЗ «Трудовое») наблюдается следующая динамика: при работе одного насоса и увеличении числа задействованных машин с 1 до 3 потребление электроэнергии за час возрастает с 295 до 418 и 650 кВт соответственно. Удельные затраты на полив остаются высокими,

хотя и снижаются с 910 до 668 кВт·ч на 1000 м³ воды (табл. 1, рис. 1). При задействовании двух насосов максимальное количество одновременно работающих машин увеличилось до 6 (табл. 1), а затраты электроэнергии на подачу 1000 м³ воды сокращаются до 589 кВт·ч. На таких орошаемых участках после модернизации ДМ «Фрегат» можно заменить насосы Д1250-125 на низконапорные Д1250-63 для сокращения энергопотребления на орошаемых участках [7].

По данным за 2024 г., на насосной станции № 4 Энгельсской ОС проводились замеры энергопотребления при работе насоса модели Д1250-125 на 5 и 6 ДМ «Каскад». Зафиксированные затраты электроэнергии составили, соответственно, 533 и 610 кВт на 1 насос. Результаты показали, что при работе на 6 ДМ насос обеспечивал расход воды 384 л/с (или 1382 м³/ч). Удельный расход энергии на перекачку 1000 м³ воды достиг 441 кВт·ч. На 5 ДМ расход воды составил 325 л/с (или 1170 м³/ч), а удельные затраты электроэнергии на 1000 м³ воды оказались равными 455 кВт·ч.

При использовании пары насосов Д1250-125 на 8 ДМ «Фрегат» энергозатраты составили 1120 кВт, расход воды – 720 л/с (или 2590 м³/ч), удельные затраты электроэнергии на 1000 м³ воды – 416 кВт·ч.

Замеры энергопотребления на 6 ДМ «Фрегат» и 7 ДМ «Каскад» при работе от трех Д1250-125 составили приблизительно 1800 кВт, расход воды – 1170 л/с (или 4200 м³/ч), а удельные затраты электроэнергии на 1000 м³ – 428 кВт·ч.

По результатам частичной модернизации орошаемого участка зафиксировано снижение энергопотребления для второй группы на 20-40%. Тем не менее уровень затрат электроэнергии продолжает оставаться высоким, что обосновывает необходимость замены высоконапорных насосов модели Д1250-125 на низконапорные.

Таблица 1. Потребление электроэнергии за 1 час (N) и удельное потребление на подачу 1000 м³ воды (N_y) на НС-А в зависимости от числа работающих насосов и дождевальных машин

Table 1. Electricity consumption per hour (N) and specific consumption for supplying 1000 m³ of water (N_y) at the NS-A depending on the number of operating pumps and irrigation machines

Марка насоса / Pump brand	Число работающих / Number of operating		P _{нс} , МПа / P _{ns} , MPa	Q, л/с / Q, l/s	N, кВт / N, kWt	N _y , кВт·ч на 1000 м ³ / N _y , kWt-h in 1000 m ³
	насосов / pumps	ДМ / IM				
Д1250-125, N = 630 кВт	1	1	1,1	90	295	910
	1	2	1,0	180	428	690
	1	3	0,85	270	650	668
	2	4	1,0	300	750	694
	2	5	1,0	440	920	598
	2	6	0,85	540	1146	589

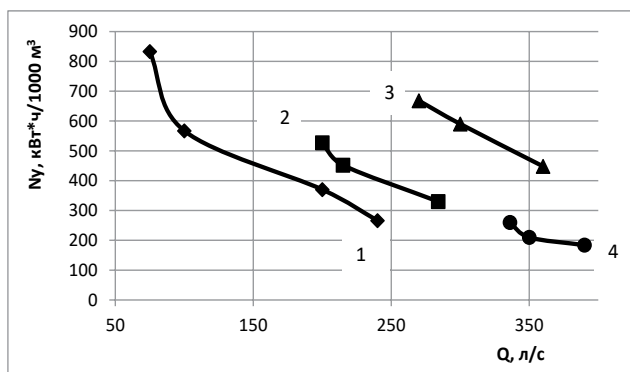


Рис. 1. Затраты электроэнергии на подачу 1000 м^3 воды в зависимости от типа насоса и расхода воды.

1 – насос 200D90; 2 – 250-QVD570-54;
3 – D1250-125; 4 – D1250-63

Fig. 1. Energy costs for supplying 1000 м^3 of water depending on the pump type and water flow rate.

1 – pump 200D90; 2-250-QVD570-54;
3 – D1250-125; 4 – D1250-63

Аналогично на НС-42п, где используется насос 250-QVD570-54 с электродвигателем 400 кВт, при работе 5 ДМ «Valley» давление снижалось до 0,85 МПа. Суммарный расход воды ДМ составил 285 л/с (или $1020 \text{ м}^3/\text{ч}$), а энергопотребление – примерно 330 кВт. Удельные затраты электроэнергии на подачу 1000 м^3 составили 323 кВт·ч (рис. 1). Для понижения энергозатрат до 50% необходимо осуществить замену высоконапорного насоса 250-QVD570 на низконапорный D1250-63 или сделать врезку в существующий коллектор насосов D1250-63.

На НС-3 Энгельсской ОС для снижения потребления электроэнергии смонтирован насос 200D90 с электродвигателем мощностью 250 кВт вместо насоса D1250-125, однако пока эксплуатация осуществляется в неоптимальном режиме с большими затратами электроэнергии. Значительные затраты электроэнергии на этой насосной станции наблюдаются, когда от насоса 200D90 работают поочередно две ДМ «Каскад» в ООО «Время-91». Давление на насосной станции поддерживается в пределах 0,56-0,6 МПа за счет незначительного открытия задвижки и работы байпаса. Потребление электроэнергии за 1 час работы насоса составляет 210 кВт. При расходе воды одной ДМ «Каскад» 70 л/с (или $252 \text{ м}^3/\text{ч}$) и давлении 0,56 МПа на подачу 1000 м^3 воды затраты электроэнергии насоса 200D90 составили 833 кВт·ч (рис. 1). Расчеты показывают, что установка здесь небольшого низконапорного насоса Д315-50 с электродвигателем мощностью 75 кВт позволит снизить удельные затраты электроэнергии до 280 кВт·ч.

На насосной станции НС-42п (четвертая группа орошаемых участков) при эксплуатации одного насоса D1250-63 обеспечивается полив 5 машин Zimmatic с расходом электроэнергии 280 кВт·ч. При работе двух насосов используются 10 машин Zimmatic, при этом затраты электроэнергии достигают 520 кВт. Рабочее давление на станции поддерживается в диапазоне 0,6-0,62 МПа. Средний расход воды при работе одного насоса составляет 390 л/с ($1404 \text{ м}^3/\text{ч}$). Удельные затраты электроэнергии на подачу 1000 м^3 воды составляют 200 кВт·ч (рис. 1). Расход воды при работе двух насосов составляет в среднем 780 л/с ($2808 \text{ м}^3/\text{ч}$), а на подачу 1000 м^3 воды затраты электроэнергии составили 184 кВт·ч. Однако минимальный режим потребления электроэнергии наблюдается только при максимальном и номинальном режимах работы насоса. При уменьшении числа работающих машин и снижении расхода воды до 100 л/с уменьшается потребление электроэнергии до 160 кВт, однако удельные затраты на подачу 1000 м^3 воды увеличиваются до 400 кВт·ч (рис. 2). Данный факт указывает на неэффективность работы в неполнонагруженных режимах. Решение проблемы видится в установке систем частотного регулирования оборотов насоса, что позволит оптимизировать энергопотребление.

За счет применения оборудования с частотным регулированием оборотов достигаются минимальные затраты электроэнергии на подачу воды орошаемых участков пятой группы. На НС-10п смонтированы 2 насоса Грундфос марки KP12280-ОДФ019 с расходом воды

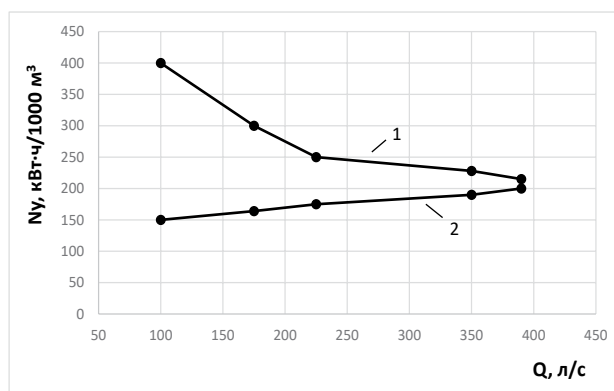


Рис. 2. Затраты электроэнергии на подачу 1000 м^3 воды в зависимости от расхода воды, насос D1250-63:

1 – при постоянных оборотах насоса;
2 – при частотном изменении оборотов

Fig. 1. Energy costs for supplying 1000 м^3 of water depending on the pump type and water flow rate.

1 – pump 200D90; 2-250-QVD570-54;
3 – D1250-125; 4 – D1250-63

300 л/с и напором 70 м, с электродвигателем 250 кВт. Один насос способен обеспечить водой 5-6 ДМ «Zimmatic», и два насоса подают воду на 8 ДМ «Zimmatic».

При работе одного насоса на 6 машин Zimmatic затраты электроэнергии за 1 час работы составили 167-168 кВт, а 2 насоса обеспечивали полив 8 машин Zimmatic, при этом затраты электроэнергии составили 305-318 кВт. Давление на насосной станции поддерживается в пределах 0,52-0,54 МПа. Расход воды при работе одного насоса составляет в среднем 239 л/с = 860 м³/ч, а на подачу 1000 м³ воды энергозатраты составили 195 кВт·ч. Расход воды при работе двух насосов составляет в среднем 470 л/с (1692 м³/ч), а на подачу 1000 м³ воды энергозатраты составили 188 кВт·ч.

На НС-22п смонтированы два насоса Д1250-63 с электродвигателем мощностью 315 кВт и оборудование для частотного регулирования оборотов. Один насос способен обеспечить водой до 5 ДМ «Zimmatic». При работе насоса на одну ДМ «Zimmatic» энергопотребление составит 78 кВт, 285 кВт – при подаче воды на 5 ДМ, при этом N_u изменяются в пределах

150-200 кВт·ч (табл. 2, рис. 2). При использовании двух насосов на 5 ДМ «Zimmatic» энергозатраты на подачу 1000 м³ воды составят 197 кВт·ч.

В начале мая 2024 г работали два насоса на 5 ДМ «Zimmatic», а начиная с июня – один насос на 5 ДМ «Zimmatic». При неправильной эксплуатации ДМ (одновременной работе 5 ДМ «Zimmatic» от одного насоса) наблюдалось несоответствие между проектным (по паспортным данным) и фактическим расходом воды (табл. 3).

Использование единственного насоса Д1250-63 для 5 дождевальных машин Zimmatic приводит к ухудшению качества полива ввиду снижения поливной нормы в отдаленной части трубопровода. В ходе испытаний установлено, что при суммарном расчетном расходе воды 5 ДМ Zimmatic 436 л/с давление на входе НС-22п снижалось до 0,45 Мпа, на ДМ хоз. № 5 – с 0,226 до 0,15 МПа. Это привело к снижению равномерности полива с 0,8 до 0,6, уменьшению нормы полива (начиная со второго пролета) на 5-30% и уменьшению площади полива концевого аппарата на 40%. Аналогичные результаты имели место на ДМ № 1, 2, 3 и 4, где давление на входе машины должно составлять 0,35; 0,26;

Таблица 2. Потребление электроэнергии при работе насоса Д1250-63 с частотным регулированием на НС-22п в зависимости от числа поливаемых ДМ «Zimmatic» (данные за 2022-2024 г.)

Table 2. Power consumption during operation of the pump D1250-63 with frequency control on НС-22p depending on the number of watered DM “Zimmatic” (data for 2022-2024)

Число насосов / number of pumps	Число ДМ / number of IM	Q ДМ, л/с / Q IM, l/s	Рнс, МПа / Pns, MPa	N, эл кВт / N, el kWt	I, а / I, a	Частота тока, Гц / Current frequency, Hz	Ny на 1000 м ³ / Ny in 1000 m ³
2	5	491	0,6	171+177	317	46,9	196,8
2	4	416	0,6	171+170	314	46,9	227,7
2	3	368	0,5	111-121	285	40,0	175,2
1	1	100	0,45	77-78	190	39	150
1	2	216	0,45	101-107	250-250	39	160
1	3	343	0,45	141-149	291	42,1	175
1	4	391	0,45	171-172	339	46,5	165
1	5	395	0,45	283-285	480-485	50	200

Таблица 3. Проектный и фактический расход воды ДМ Zimmatic в зависимости от давления на входе на НС-22п

Table 3. Design and calculated flow of DM Zimmatic water on НС-22p depending on inlet pressure

№ ДМ / No IM	Длина машины, м / Length of the machine, m	Число опор, шт. / Number of supports, pcs.	Площадь полива, га / Irrigation area, ha	Проектные / Design		Фактические / Actual	
				Рвх, МПа / Pin, MPa	Q, л/с / Q, l/s	Рфак, МПа / Pact, MPa	Qрасч, л/с / Qcalc, l/s
1	607,9	11	116	0,35	152,4	0,19	124
2	580	10	105,6	0,26	116	0,2	109
3	475	8	70,8	0,23	75	0,2	71
4	505	9	80,0	0,24	100	0,18	89
5	372	6	43,4	0,21	47,9	0,16	43
Всего			415,8		491		436

0,23 и 0,24 МПа, а фактически было 0,19; 0,2; 0,2 и 0,18 МПа.

Таким образом, снижение потребления электроэнергии и улучшение качества полива 5 ДМ Zimmatic на НС-22п обеспечиваются при одновременной работе двух насосов Д1250-63 с оборудованием частотного регулирования оборотов. При этом на насосной станции легко поддерживается давление 0,6 МПа при неполной загрузке электродвигателей (сила тока – 174 А, частота тока – 46,9 Гц.), обеспечиваются требуемое давление на машинах и качественный полив с высокой равномерностью. Качественный полив от одного насоса здесь возможен только при одновременном поливе не более 3-4 машин.

Анализ орошаемых участков, где осуществлена реконструкция, показывает, что наиболее эффективной является комплексная реконструкция с заменой изношенных высоконапорных ДМ, стальных подземных трубопроводов и высоконапорных насосных агрегатов на современные низконапорные электрифицированные ДМ, подземные полиэтиленовые трубы и низконапорные насосы с частотным регулированием оборотов. Это позволяет проводить своевременные поливы с высокой надежностью подачи воды по потребности растений. При этом не только снижается электропотребление, но и повышается урожайность, что способствует быстрой окупаемости затрат на реконструкцию.

Список использованных источников

1. Мелиоративный комплекс Российской Федерации: Информационное издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 304 с.
2. Ресурсосберегающие энергоэффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения: Справочник / Под общ. ред. Г.В. Ольгаренко. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. 264 с.
3. Васильев С.М., Шкура В.Н. Дождевание: Учебное пособие. Новочеркасск: РосНИИПИМ, 2016. 352 с.
4. Задорожный Р.Н., Романов И.В. Повышение эффективности ирригации путем подбора конструкции дождевальных машин // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 4. С. 82-86. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-82-86. EDN: QLQRVO
5. Соловьев Д.А., Елисеев М.С., Колганов Д.А., Загоруйко М.Г. Результаты создания дождевальной машины «Фрегат», работающей в режимах при низких напорах // Аграрный научный журнал. 2017. № 2. С. 67-69
6. Козинская О.В., Бочарников В.С., Бочарникова О.В., Григоров С.М. Мониторинг давления воды в оросительных трубопроводах как инструмент управления качеством полива широкозахватной дождевальной машины Bauer // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 6 (78). С. 376-384. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-06-41. EDN: UFTTOL

Выводы

Существующие подкачивающие насосные станции характеризуются неоправданно высокими энергозатратами: для подачи 1000 м³ воды требуется от 220 до 650 кВт·ч. На уровень потребления напрямую влияют тип насоса, величина давления на выходе и интенсивность водоподачи. При снижении расхода воды насосом затраты на подачу еще увеличиваются.

Энергосберегающая технология водоподачи обеспечивается при использовании частотного регулирования оборотов на насосных станциях с рабочим давлением 0,4-0,6 Мпа. При этом существенно снижаются энергозатраты, удельный расход электроэнергии на подачу 1000 м³ воды уменьшается до 150-200 кВт·ч (в 1,2-3,0 раза по сравнению с традиционными решениями).

Для эффективной реконструкции орошаемых участков критически важным является внедрение современных решений: дождевальные машины с электроприводом, рассчитанные на давление 0,2-0,4 МПа, насосные агрегаты с рабочим давлением 0,4-0,6 МПа и оборудование для частотного регулирования оборотов.

При расчете проектов реконструкции орошаемых участков с современными электрифицированными дождевальными машинами расход и напор насосных агрегатов должны соответствовать расходу и напору дождевальных машин на участках как при индивидуальной, так и при групповой эксплуатации машин.

References

1. Land reclamation complex of the Russian Federation: Information publication. Moscow: Federal State Budgetary Scientific Institution «Rosinformagrotekh», 2020. 304 p.
2. Resource-saving energy-efficient environmentally friendly technologies and technical means of irrigation: Handbook edited by G.V. Olgarenko. Moscow: Rosinformagrotekh, 2015. 264 p.
3. Vasilyev S.M., Shkura V.N. Rainfall. Novocherkassk, RosNIIPM, 2016. 352 p.
4. Zadorozhny R.N., Romanov I.V. Improving irrigation efficiency by selecting the design of sprinkler machines. Agricultural machinery and technology. 2023. Vol. 17. No. 4. P. 82-86. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-82-86. EDN: QLQRVO
5. Solovyov D.A., Eliseev M.S., Kolganov D.A., and Zagoruyko M.G. Results of the creation of the Fregat sprinkler machine operating in low-pressure modes // Agrarian Scientific Journal. 2017. No. 2. P. 67-69.
6. Kozinskaya O.V., Bocharnikov V.S., Bocharnikova O.V., Grigorov S.M. Monitoring of water pressure in irrigation pipelines as a quality management tool for irrigation of the Bauer wide-scope sprinkler machine // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: science and higher professional education. 2024. No. 6 (78). P. 376-384. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-06-41. EDN: UFTTOL
7. Ryzhko N.F., Ryzhko S.N., Smirnov E.S., Shishenin E.A., Beltikov B.N. Improvement of sprinkler machines and devices for the reclamation complex: Scientific and Practical Publication. Moscow: Rosinformagrotekh, 2023. 124 p. EDN: UFTTOL

7. Рыжко Н.Ф., Рыжко С.Н., Смирнов Е.С., Шипенин Е.А., Бельгицкий Б.Н. Совершенствование дождевальных машин и устройств для мелиоративного комплекса: Научно-практическое издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. 124 с.

8. Евсеев Е.Ю., Антипов А.О., Рязанцев А.И. К усовершенствованию регулятора расхода дождевальных аппаратов многоопорных дождевальных машин // Вестник мелиоративной науки. 2020. № 3. С. 36-39. EDN: JTPDPM

9. Pete Noll. Determining the real cost of powering a pump // World Pumps. 2008. V. 2008, № 496. Pp. 32-34

10. Kubic A.W., McEwan K.H. Adjustable speed Pumps for Utilities // Journal American Water Works Association. 1961. V. 53, № 2. Pp. 146-154

11. СТО АИСТ 11.1-2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей. М., 2012. 53 с.

12. Вишневецкий К.П., Подлас А.В. Проектирование насосных станций закрытых оросительных систем: Справочник. М.: ВО «Агропромиздат», 1990. 93 с.

Об авторах

Дмитрий Александрович Колганов, канд. техн. наук, доцент; ORCID: 0000-0001-9217-8989; dmi.kolg@mail.ru;

Михаил Геннадьевич Загоруйко, д-р. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-7826-3773, WoS Resercher ID: AAF-6639-2021, Scopus ID: 57220182022, РИНЦ AuthorID: 323776; zagorujko.misha2013@yandex.ru

Николай Федорович Рыжко, д-р техн. наук, зав. отделом, ORCID: 0009-0006-6352-8832; ryzhonf@bk.ru

Сергей Николаевич Рыжко, канд. техн. наук, научный сотрудник, ORCID: 0009-0002-6499-8378; twgldes@gmail.ru

Вклад авторов / Contribution of authors

Д.А. Колганов – научное руководство, определение основных направлений исследования, корректировка текста и выводов
М.Г. Загоруйко – постановка задачи, обработка экспериментальных данных, разработка графической части публикации
Н.Ф. Рыжко – научное руководство, теоретические предпосылки, оформление текста и выводов
С.Н. Рыжко – обработка экспериментальных данных, оформление таблиц с результатами опытов, литературный анализ

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest

Поступила в редакцию / Received 13.11.2025

Поступила после рецензирования / Received 17.04.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 20.04.2026

8. Evseev E.Y., Antipov A.O., Ryazantsev A.I. To improve the flow regulator of sprinklers of multi-support sprinklers // Bulletin of Meliorative Science. 2020. No. 3. P. 36-39.

9. Pete Noll. Determining the real cost of powering a pump // World Pumps. 2008. V. 2008, № 496. P. 32-34. EDN: JTPDPM

10. Kubic A.W., McEwan K.H. Adjustable speed Pumps for Utilities // Journal American Water Works Association. 1961. V. 53, № 2. P. 146-154.

11. СТО АИСТ 11.1-2010. Testing of agricultural machinery. Irrigation machines and systems. Methods for evaluating functional indicators. М. 2012. 53p.

12. Vishnevsky K.P., Podlas A.V. Design of Pump Stations for Closed Irrigation Systems: Handbook. Moscow: Agropromizdat, 1990, 93 p.

About the authors

Dmitry A. Kolganov, CSs (Eng), Associate Professor; ORCID: 0000-0001-9217-8989; dmi.kolg@mail.ru

Mikhail G. Zagoruiko, CSs (Eng), associate professor, leading researcher; ORCID: 0000-0001-7826-3773, WoS Resercher ID: AAF-6639-2021, Scopus ID: 57220182022, RSCIAuthorID: 323776; zagorujko.misha2013@yandex.ru

Nikolai F. Ryzhko, DSs (Eng), Head of department, ORCID: 0009-0006-6352-8832; ryzhonf@bk.ru

Sergey N. Ryzhko, CSs (Eng), Researcher, ORCID: 0009-0002-6499-8378; twgldes@gmail.ru

Contribution of the authors

D.A. Kolganov – scientific supervision, determination of the main areas of research, correction of the text and conclusions
M.G. Zagoruiko – problem statement, processing of experimental data, development of the graphic part of the publication
N.F. Ryzhko – scientific guidance, theoretical prerequisites, design of the text and conclusions;
S.N. Ryzhko – processing of experimental data, design of tables with the results of experiments, literary analysis.

Оригинальная статья

УДК 626/627

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-72-82>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ФРАГМЕНТА НАПОРНОЙ СТЕНЫ РУСЛОВОГО ЗДАНИЯ ГЭС, УСИЛЕННОГО ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ЛЕНТ

О.Д. Рубин¹, А.В. Александров², Чжан Цзюньхао³, В.Б. Балагуров⁴, С.Е. Лисичкин⁵✉

^{1,3} ФГБОУ «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»;
г. Москва, Российская Федерация

² АО «Институт Гидропроект»; г. Москва, Российская Федерация

^{4,5} Филиал АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС»; г. Москва, Российская Федерация

¹ rubinod@niies.ru; ORCID: 0000-0002-0630-3251

² a.aleksandrov@hydroproject.ru; SPIN-код: 4152-5972

³ weiw0951@gmail.com; ORCID: 0009-0006-0490-210X

⁴ v.balagurov@hydroproject.ru

⁵ lisichkin1989@rambler.ru; ORCID: 0000-0003-2761-331X

Аннотация. Здания русловых ГЭС размещаются в руслах рек. Напорные стены их машинных залов работают совместно с перекрытиями машинных залов, образуя основную несущую конструкцию здания ГЭС, которая воспринимает комплекс нагрузок. Русловые здания ГЭС и напорные здания ГАЭС имеют значительное сходство между собой, в том числе, одинаковые основные несущие железобетонные конструкции, в первую очередь, напорные верховые стены машинных залов и напорные щитовые стены с упором в перекрытия. Относящиеся к классу массивных гидротехнических конструкций напорные стены и перекрытия машинных залов русловых зданий ГЭС (щитовые стены зданий ГАЭС) состоят из отдельных блоков, разделенных межблочными строительными швами. Ослабленные по сравнению с монолитом, межблочные строительные швы провоцируют появление трещин, снижающих прочность и эксплуатационную надежность здания ГЭС/ГАЭС в целом, которые трудно отремонтировать традиционными способами. Для экспериментального обоснования усиления железобетонных конструкций ГЭС внешним армированием с применением композитных углеродных материалов проведен комплекс лабораторных исследований железобетонных моделей фрагмента напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС в масштабе 1:15. Одни модели были без усиления, другие – с усилением внешним армированием из композитной углеродной ленты. В результате лабораторных исследований было установлено, что система внешнего армирования из углеродных лент способствует: уменьшению ширины раскрытия межблочных строительных швов a_{cr} и растягивающих напряжений в рабочей стальной арматуре $\sigma_{s,ш}$, перемещений f верха моделей; возникновению растягивающих напряжений $\sigma_{f,ш}$ в элементе усиления (композитной углеродной ленте). При этом нагрузка разрушения усиленной модели увеличивается по сравнению с не усиленной моделью. Таким образом, проведенные исследования позволили экспериментально обосновать эффективность усиления напорных стен машинных залов ГЭС внешним армированием из композитных углеродных лент.

Ключевые слова: русловые здания ГЭС, машинный зал, напорная стена совместно с перекрытием, экспериментальные исследования, внешнее армирование, композитные углеродные ленты

Для цитирования: Рубин О.Д., Александров А.В., Чжан Цзюньхао, Балагуров В.Б., Лисичкин С.Е. Экспериментальные исследования железобетонного фрагмента напорной стены руслового здания ГЭС, усиленного внешним армированием на основе композитных углеродных лент. Природообустройство. 2026;Т.19(2):72-82. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-72-82>

Original article

EXPERIMENTAL RESEARCH OF A REINFORCED CONCRETE FRAGMENT OF A PRESSURE WALL OF A RIVERBED HYDROELECTRIC POWER PLANT REINFORCED WITH EXTERNAL REINFORCEMENT BASED ON COMPOSITE CARBON TAPES

O.D. Rubin¹, A.V. Aleksandrov², Zhang Junhao³, V.B. Balagurov⁴, Lisichkin S.E.⁵✉^{1,3} National Research Moscow State University of Civil Engineering; Moscow, Russian Federation² JSC "Institute Hydroproject", Moscow, Russian Federation^{4,5} Branch of JSC Institute Hidroproekt – NIIES; Moscow, Russian Federation¹ rubinod@niies.ru; ORCID: 0000-0002-0630-3251² a.aleksandrov@hydroproject.ru;³ weiw0951@gmail.com; ORCID: 0009-0006-0490-210X⁴ v.balagurov@hydroproject.ru⁵ lisichkin1989@rambler.ru; ORCID: 0000-0003-2761-331X

Abstract. The buildings of river-bed hydroelectric power plants are located in the riverbeds. The pressure walls of their machine halls work together with the ceilings of the machine halls, forming the main load-bearing structure of the hydroelectric power plant building, which carries of loads. The run-of-river buildings of hydroelectric power plants and the pressure buildings of pumped storage power plants have significant similarities with each other, including the same main load-bearing reinforced concrete structures, primarily the pressure headwalls of the machine halls and the pressure shield walls with abutment against the floors. Belonging to the class of massive hydraulic structures, the pressure walls and ceilings of the machine halls of the river-bed hydroelectric power plant buildings (shield walls of pumped storage power plant buildings) consist of separate blocks separated by inter-block construction seams. Compared to monolithic structures, the weakened inter-block construction joints cause cracks that reduce the strength and operational reliability of the entire hydroelectric power plant/PSPP, making it difficult to repair using traditional methods. In order to experimentally substantiate the strengthening of reinforced concrete structures of the hydroelectric power plant with external reinforcement using composite carbon materials, a set of laboratory studies was conducted on reinforced concrete models of a fragment of the pressure wall of the machine hall of the run-of-the-river building of the hydroelectric power plant, at a scale of 1:15. Some models were without reinforcement, while others were reinforced with external reinforcement made of composite carbon tape. As a result of the laboratory studies, it was established that the system of external reinforcement from composite carbon tapes contributes to a decrease in the opening width of inter-block construction joints $a_{(cr, III)}$ and tensile stresses in the working steel reinforcement $\sigma_{(s, III)}$, displacements f of the top of the models; the occurrence of tensile stresses $\sigma_{(f)}$ in the reinforcing element (composite carbon tape); while the failure load of the reinforced model increases in comparison with the non-reinforced model. Consequently, the conducted research allowed us to experimentally substantiate the effectiveness of strengthening the pressure walls of hydroelectric power plant turbine halls with external reinforcement made of composite carbon strips. Consequently, the conducted research allowed for the experimental justification of the effectiveness of reinforcing the pressure walls of hydroelectric power plant machine rooms with external reinforcement made of composite carbon tapes.

Keywords: hydroelectric power plant buildings, turbine hall, pressure wall and floor, experimental research, external reinforcement, composite carbon strips

For citation: Rubin O.D., Aleksandrov A.V., Zhang Junhao, Balagurov V.B., Lisichkin S.E. Experimental tests of a reinforced concrete fragment of a pressure wall of a riverbed hydroelectric power plant reinforced with external reinforcement based on composite carbon tapes. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):72-82. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-72-82>

Введение. Здания русловых ГЭС размещаются в руслах рек. Напорные стены их машинных залов работают совместно с перекрытиями машинных залов, образуя основную несущую конструкцию здания ГЭС, которая воспринимает весь комплекс нагрузок.

Русловые здания ГЭС и напорные здания ГАЭС имеют значительное сходство между собой,

в том числе, одинаковые основные несущие железобетонные конструкции, в первую очередь, напорные верховые стены машинных залов и напорные щитовые стены с упором в перекрытия.

Являясь массивными гидротехническими конструкциями, напорные стены и перекрытия машинных залов русловых зданий ГЭС (щитовые стены зданий ГАЭС) состоят из отдельных

блоков, разделенных межблочными строительными швами.

Ослабленные по сравнению с монолитом, межблочные строительные швы провоцируют появление трещин, снижающих прочность и эксплуатационную надежность здания ГЭС/ГАЭС в целом, которые трудно отремонтировать традиционными способами.

С целью поддержания необходимого уровня безопасности конструкций здания ГЭС/ГАЭС проводятся как инструментальный контроль, так и поверочные расчетные исследования. В результате обосновываются и назначаются мероприятия по усилению с применением наиболее эффективной технологии – усиления композитными материалами с устройством системы внешнего армирования.

Настоящая работа является развитием способа усиления железобетонной конструкции щитовой стены Загорской ГАЭС-2 композитными углеродными лентами, необходимость которого была вызвана непроектной осадкой здания ГАЭС-2, вследствие чего в щитовой стене образовалась система трещин с шириной раскрытия до 0,9 мм [1, 2].

Был выполнен анализ следующих источников литературы.

Работа [3] посвящена исследованиям инновационного гибридного усиления (FRP) изгибаемых железобетонных конструкций (RC). Исследования показали, что гибридное FRP повысило прочность на 175%, причем приповерхностный монтаж (NSM) из углеродных ламинатов повысил прочность на 111%, но при снижении пластичности.

В работе [4] представлены данные расчетно-экспериментальных исследований железобетонных конструкций, усиленных внешним армированием из углепластика (CFRP), на действие статических нагрузок. Разрушение всех моделей определялось шириной раскрытия трещин, образованием вторичных трещин и прогибами с последующим отклеиванием углепластика при хорошем согласовании расчетных и опытных данных.

В работе [5] представлен численный анализ, согласующийся с лабораторными данными, полученными на 14-ти железобетонных моделях (RC). Результаты показали, что наклейка листов углепластика с V-образными концевыми анкерами со стороны растяжения вызвала повышение прочности примерно на 29,8%. Наклейка наклонных углепластиковых полос на боковые стороны моделей RC была весьма эффективной для повышения прочности балок на сдвиг.

В целях повышения жесткости и трещиностойкости выполнялось усиление изгибаемых железобетонных конструкций с применением предварительно напряженного листового углепластика (CFRP), приклеенного к нижней грани модели и закрепленного U-образными углепластиковыми листами на концах после натяжения [6]. Несущая способность усиленных моделей была увеличена на 41,0-88,8% и на 41,9-74,8% в предельном состоянии, а пластичность при разрушении резко снижена на 54,9-186%.

В статье [7] исследуются железобетонные (RC) колонны, усиленные снаружи армированными волокнами (FRP), при циклическом сжатии. Прогнозные характеристики предложенной модифицированной модели для прогнозирования предельной осевой деформации значительно улучшены по сравнению с другими существующими моделями. Обеспечивается прогнозирование со средним коэффициентом (AR) 0,96 и средней абсолютной ошибкой (AAE) 36,5%, что, следовательно, может способствовать более безопасному перепроектированию, в том числе сейсмостойкому перепроектированию.

В исследованиях [8] разработан и реализован точный многошаговый метод Безье для определения нелинейных колебаний и конфигураций после прогиба композитных балок Эйлера-Бернулли, армированных графеновыми нанопластинками (GnP). Установлено, что добавление относительно низкого содержания GnP резко увеличивает упругие константы композита, особенно в поперечном направлении к волокну. Кроме того, численные результаты сравниваются с результатами, полученными с помощью точных аналитических решений. Стабильность результатов свидетельствует об эффективности представленной методологии.

Усиление внешним композитным армированием железобетонных моделей (со стальной арматурой) в виде технической полиамидной (нейлоновой) ткани и стекловолокна, наклеиваемых на наружную растянутую поверхность, рассмотрено в работе [9]. При этом изменяется характер разрушения модели, повышается несущая способность на 16-38% в зависимости от материала и способа усиления.

Усиление железобетонных конструкций с поперечным армированием и без него посредством углеродных и базальтовых тканей представлено в работе [10].

Были также испытаны изгибаемые усиленные модели с поперечным армированием, частично и полностью изготовленные из инженерного цементного композита. Модели,

изготовленные из самоуплотняющегося бетона, инженерного цементного композита и их комбинации, были подготовлены и испытаны четырехточечной нагрузкой. Усиленные модели подразделялись на две группы по прочности. Первая группа включала в себя усиление на сдвиг самоуплотняющихся бетонных армированных моделей со срезом (балок без ригелей) путем рассмотрения различных конфигураций усиления с использованием обоих типов полимерных тканей, армированных волокнами. Вторая группа включала в себя усиление изгибаемых армированных наклонных балок с помощью полимерных тканей, армированных волокнами, и/или инженерного цементного композита. Наибольшее увеличение несущей способности составило 72,8% при усилении на сдвиг (первая группа), а при усилении на изгиб (вторая группа) наибольшее увеличение составило 28,8%.

В проанализированных источниках литературы [3-10] представлены новые способы усиления железобетонных конструкций композитными материалами.

Цель исследований: экспериментально обосновать эффективность усиления напорных стен машинных залов ГЭС внешним армированием из композитных углеродных лент.

Экспериментальные исследования, проведенные авторами статьи, представляют собой новшество, так как выполнены применительно к гидротехническому сооружению – напорному русловому зданию гидроэлектростанции. Напорные стены совместно с перекрытиями машинных залов являются основными несущими конструкциями русловых зданий ГЭС, воспринимающими все вышеуказанные нагрузки и обеспечивающими длительную эксплуатацию гидроэнергетического объекта.

Вертикальное сечение руслового здания ГЭС вдоль потока представлено на рисунке 1.

Относящиеся к классу массивных гидротехнических конструкций напорные стены и перекрытия машинных залов русловых зданий ГЭС состоят из отдельных блоков, разделенных межблочными строительными швами.

Материалы и методы исследований. Для экспериментального обоснования усиления железобетонных конструкций ГЭС внешним армированием с применением композитных углеродных материалов проведен комплекс лабораторных исследований железобетонных моделей фрагмента напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС в масштабе 1:15.

Высота железобетонных моделей составляла 140 см, поперечное сечение – 27 × 30 см,

рабочее армирование – 3Ø12A500C, коэффициент армирования $\mu_s = 0,00471$, класс бетона – B25.

Опытная модель 1 не имела усиления (рис. 2.а); модель 2-1 была усилена внешним армированием из композитной углеродной ленты в опорной части (рис. 2.б), модель 2-2 была усилена внешним армированием из композитной углеродной ленты в опорной части и на растянутой грани (рис. 2.в). Модели 1, 2-1 и 2-2 были испытаны при соотношении $M/Qh_0 = 4,17$ [11].

Опытная модель 3-1 была усилена внешним армированием из композитной углеродной ленты в опорной части (рис. 3.а); модель 3-2 была усилена внешним армированием из композитной углеродной ленты в опорной части и на растянутой грани, а также в поперечном направлении (рис. 3.б). Модели 3-1 и 3-2 были испытаны при соотношении $M/Qh_0 = 3,3$ [11].

При ослаблении межблочными строительными швами по сравнению с монолитом в конструкциях возникают трещины по межблочным строительным швам, снижающие прочность и эксплуатационную надежность здания ГЭС в целом, которые трудно отремонтировать традиционными способами. В связи с этим представляется необходимым провести комплекс экспериментальных исследований с усилением конструкций композитными углеродными лентами.

Усиление опытных моделей выполнялось композитной углеродной лентой типа FibArm

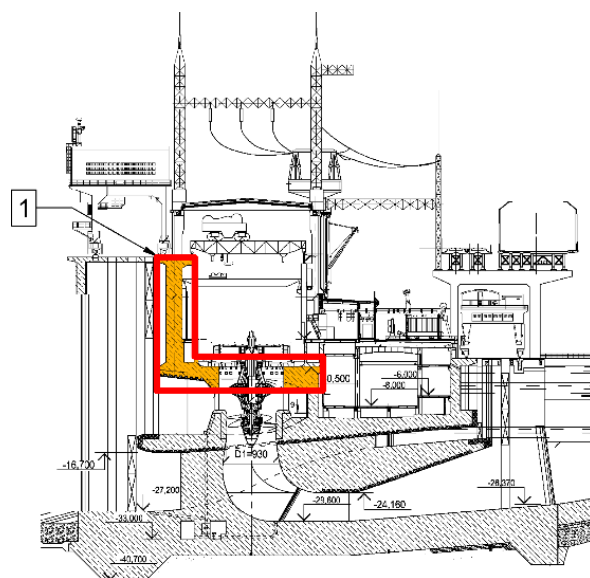


Рис. 1. Вертикальное сечение руслового здания ГЭС:

1 – напорная стена совместно с перекрытием машинного зала ГЭС

Fig. 1. Vertical section of the channel HPP building:
1 – pressure wall together with the ceiling of the turbine hall of the HPP

530/300 (аналог применяемой при усилении щитовой стены Загорской ГАЭС-2).

В экспериментальных исследованиях железобетонных моделей фрагмента напорной стены машинного зала ГЭС решалась задача по определению прочности не усиленной и усиленной композитными углеродными лентами конструкции, ширины раскрытия межблочных строительных швов, напряжений в рабочей стальной арматуре и в композитных углеродных лентах усиления внешним армированием; описывалась эффективность усиления моделей фрагментов напорной стены.

Экспериментальные исследования выполнялись в лаборатории филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» на железобетонных моделях фрагмента напорной стены.

Использовались:

1. Специализированный силовой металлический стенд на максимальную нагрузку 1000 кН.

2. Домкрат гидравлический (создание статической нагрузки) ДГ-50

- создаваемое усилие – 500 кН;
- величина выдвигания штока (длина хода) – 60 мм;
- рабочее давление – 45,5 МПа.

3. Гидравлическая насосная станция MP700 ENERPAC

- номинальное давление – 70,0 МПа;
- величина выдвигания штока (длина хода) – 26,5 мм.

Измерительное оборудование:

1. Тензорезисторы TML FLA-10-350-21

Тензорезисторы TML FLA-10-350-21 предназначены для измерения деформаций конструкций при статических и динамических нагрузках, а также для применения в качестве чувствительных элементов первичных преобразователей различных физических величин. Тензорезисторы TML FLA-10-350-21 с базой 10 мм сопротивлением 350 Ом.

Предельное относительное отклонение сопротивления в партии от номинального составляет $\pm 1,0\%$.

Номер в государственном реестре средств измерений (ФГИС «АРШИН») – 79148-20.

2. Индикаторы часового типа 1МИГ 0-10,001 ЧИЗ

Тензометры на базе индикаторов часового типа 1МИГ 0-10,001 ЧИЗ представляют собой высокоточный измерительный инструмент, применяемый для измерений линейных размеров, в том числе деформаций, а также отклонения их

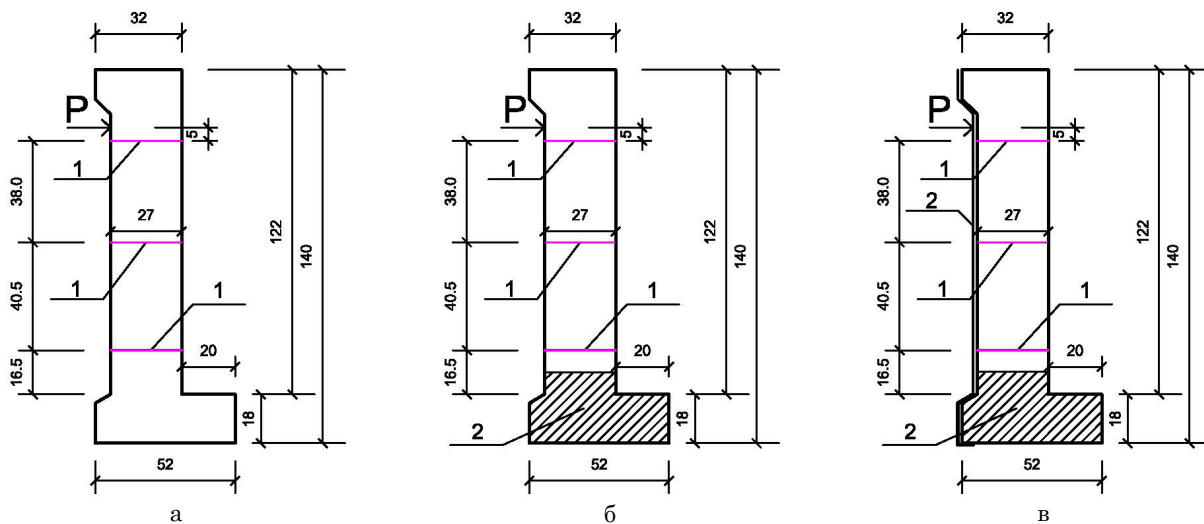


Рис. 2. Опытные модели фрагмента напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС, см:

1 – межблочные строительные швы; 2 – композитная углеродная лента; а) модель без усиления (1);

б) модель (2-1), усиленная композитной углеродной лентой в опорной части;

в) модель (2-2), усиленная композитной углеродной лентой в опорной части и на растянутой грани;

P – опытная сосредоточенная сила, приложенная на высоте 118 см от низа моделей (вариант 1), при соотношении $M/Qh_0 = 4.17$

Fig. 2. Experimental models of a fragment of the pressure wall of the turbine hall of the channel building of the HPP

(dimensions are given in cm): 1 – interblock construction seams; 2 – composite carbon tape;

a) Model without reinforcement (1); b) model (2-1), reinforced with composite carbon tape in the supporting

part; c) model (2-2), reinforced with composite carbon tape in the supporting part and on the stretched edge;

P – is the experimental concentrated force attached at a height of 118 cm from the bottom of the models (option 1) at $M/Qh_0 = 4.17$

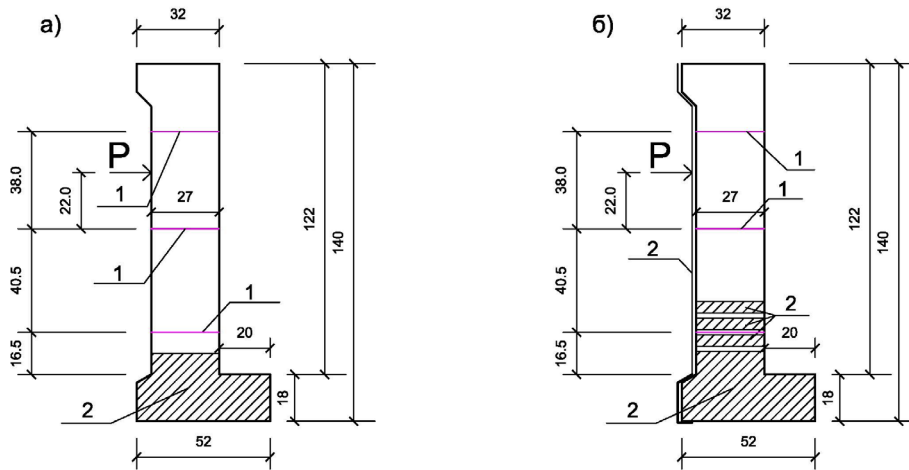


Рис. 3. Опытные модели фрагмента напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС, см:

- 1 – межблочные строительные швы; 2 – композитная углеродная лента;
 а) модель (3-1), усиленная композитной углеродной лентой в опорной части;
 б) модель (3-2), усиленная композитной углеродной лентой в опорной части, на растянутой грани и поперечными композитными углеродными лентами; P – опытная сосредоточенная сила, приложенная на высоте 98 см от низа моделей (вариант 2), при соотношении $M/Qh_0 = 3.3$

Fig. 3. Experimental models of a fragment of the pressure wall of the turbine hall of the HPP channel building (dimensions are given in cm):

- 1 – interblock seams; 2 – carbon tape; а) model (3-1), reinforced with carbon tape in the supporting part;
 б) model (3-2), reinforced with carbon tape in the supporting part, on the stretched edge and transverse bands;
 P is the experimental concentrated force (located 22 cm above the middle seam (option 2) at $M/Qh_0 = 3.3$

размеров от заданного диапазона. Применяется совместно с дополнительным оборудованием – таким, как штативы, скобы и разнообразные подставки. Погрешность измерительного устройства находится в пределах 10-15 мкм.

Наибольшая погрешность измерений: 2,0 мкм, цена деления – 0,001 мм.

Номер в государственном реестре средств измерений (ФГИС «АРЦИН») – 49140-12.

3. Тензометрическая станция TSG-S01-32. Номер в Госреестре средств измерений – 79484-20 (5) (табл. 1).

Результаты и их обсуждение. При проведении экспериментальных исследований моделей железобетонного фрагмента напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС (рис. 2, 3), изготовленных без усиления и с усилением внешним армированием из композитной углеродной ленты, были получены результаты, представленные в виде графиков на рисунках 4-10.

Как показывают результаты экспериментальных исследований, усиление системой внешнего армирования из композитных углеродных лент существенно повлияло на измеряемые

Таблица 1. Параметры тензометрической станции TSG-S01-32

Table 1. Parameters of the TSG-S01-32 load cell station

№ п.п.	Характеристики / Characteristics	Тензометрическая станция TSG-S01-32 / Strain gauge station TSG-S01-32
1	Количество измерительных каналов / Number of measuring channels	32
2	Схемы включения тензорезисторов / Strain Gauge activation diagrams	мост, полумост, четвертьмост / bridge, half-bridge, quarter bridge
3	Номинальное сопротивление тензорезисторных преобразователей / Nominal resistance of strain gauge transducers	50-1000 Ом
4	Диапазоны измерений коэффициента преобразования / Conversion ratio measurement ranges	$\pm 5; \pm 10$ мВ/В
5	Пределы допускаемой относительной погрешности измерений частоты колебаний / Limits of permissible relative error of oscillation frequency measurements	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$
6	Внешние интерфейсы / External interfaces	RS-485, USB; Bluetooth

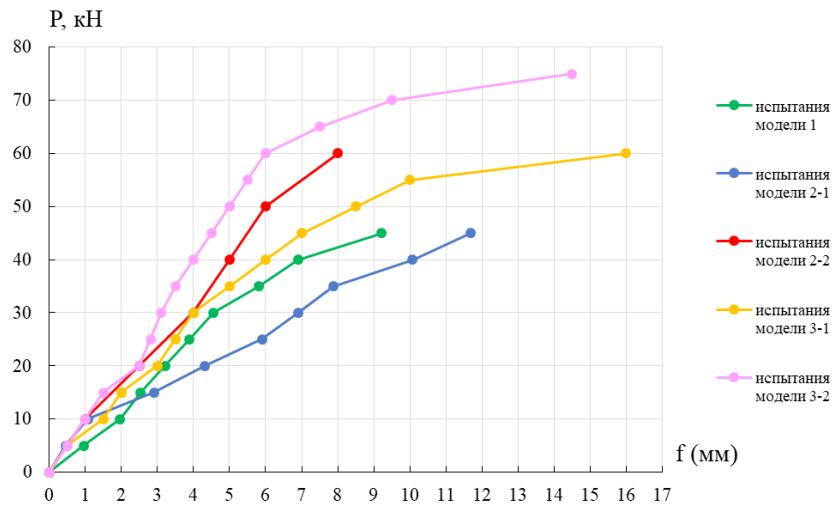


Рис. 4. Графики перемещений верха моделей 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2
 Fig. 4. Schedules of movement of the top of models 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

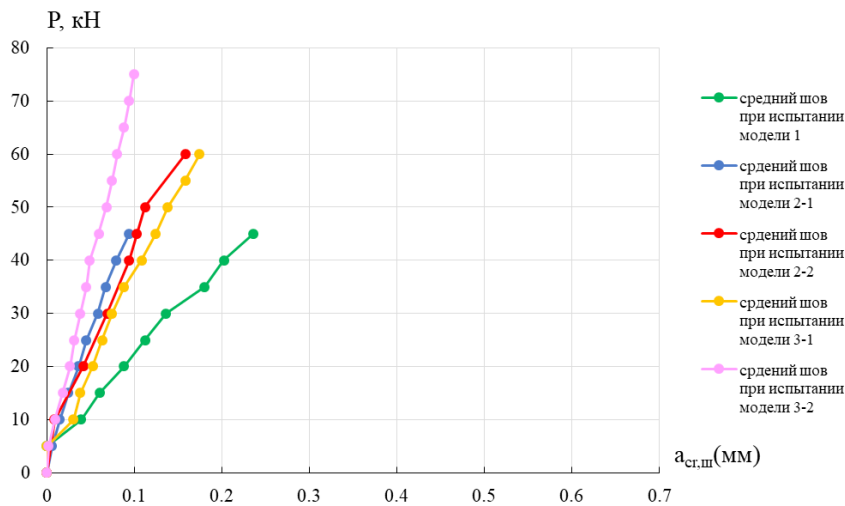


Рис. 5. Графики ширины раскрытия межблочных строительных швов (средний шов) при испытании моделей 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2
 Fig. 5. Graphs of the width of the opening of interblock construction joints (middle seam) when testing models 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

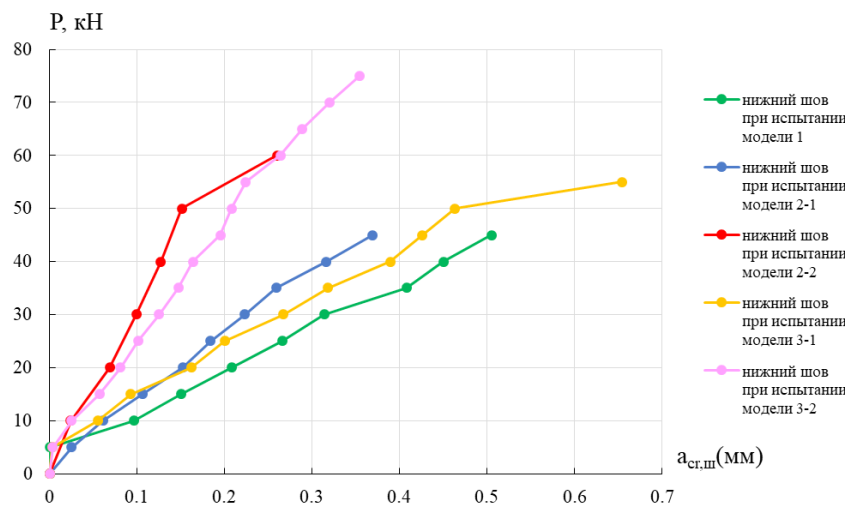


Рис. 6. Графики ширины раскрытия межблочных строительных швов (нижний шов) при испытании моделей 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2
 Fig. 6. Graphs of the width of the opening of interblock construction joints (bottom seam) when testing models 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

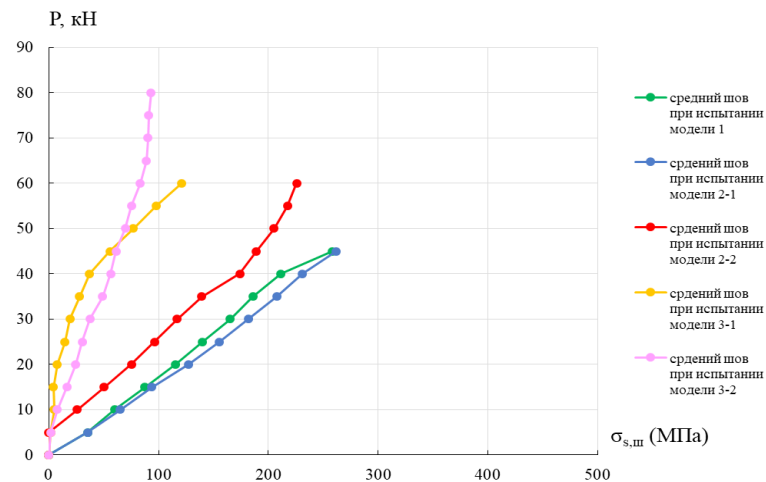


Рис. 7. Графики растягивающих напряжений в рабочей стальной арматуре в среднем шве: модели 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

Fig. 7. Graphs of tensile stresses in working steel reinforcement in the middle joint: models 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

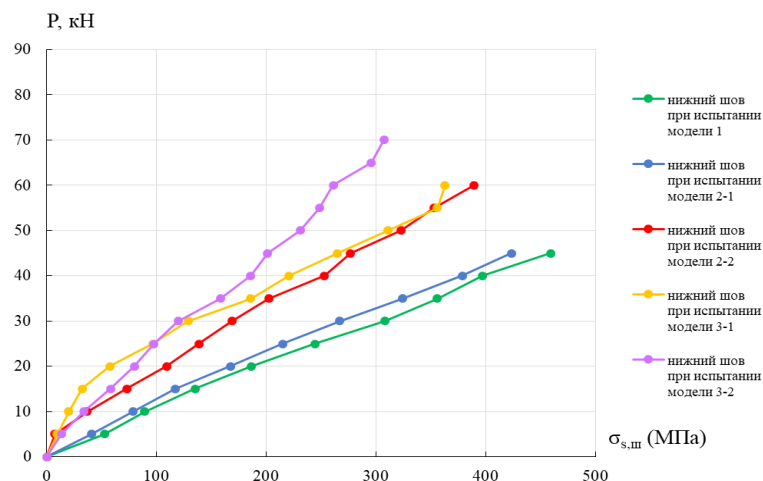


Рис. 8. Графики растягивающих напряжений в рабочей стальной арматуре в нижнем шве: модели 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

Fig. 8. Graphs of tensile stresses in working steel reinforcement in the bottom joint: models 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2, 3-1, 3-2

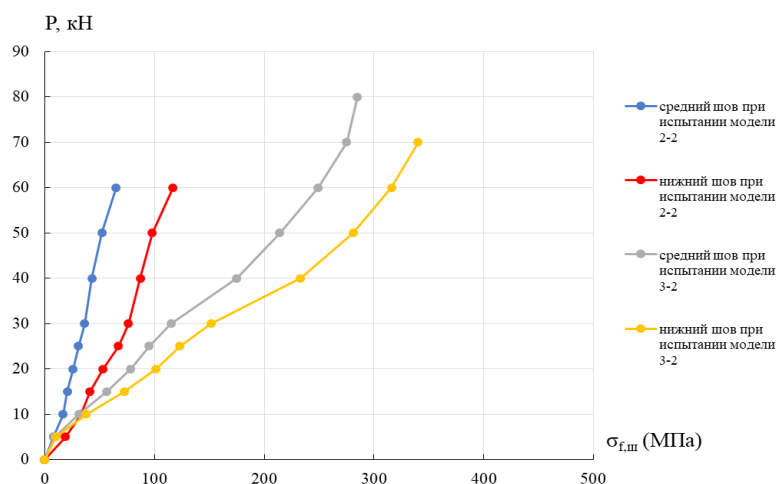


Рис. 9. Графики растягивающих напряжений в композитной углеродной ленте на растянутой грани на уровне межблочных строительных швов моделей 2-2, 3-2

Fig. 9. Graphs of tensile stresses in composite carbon tape on a tensile face at the level of interblock construction seams of models 2-2, 3-2

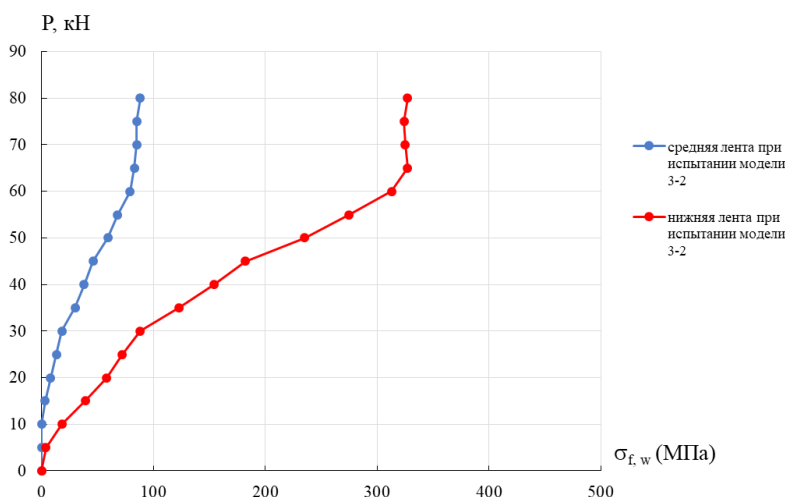


Рис. 10. Графики растягивающих напряжений в средней и нижней поперечных композитных углеродных лентах модели 3-2

Fig. 10. Graphs of tensile stresses in the middle and lower transverse composite carbon tapes of model 3-2

величины: уменьшились ширина раскрытия межблочных строительных швов $a_{cr,ш}$, напряжения в растянутой рабочей стальной арматуре $\sigma_{s,ш}$ и перемещения f верха моделей; максимальные напряжения растяжения в композитной углеродной ленте достигали 340 МПа.

Необходимо отметить, что в результате усиления композитными углеродными лентами моделей (рис. 2.в, 3.б) полностью восстановлена несущая способность, полученная при испытаниях (рис. 2.а, 2.б, 3.а), дополнительно увеличившись на 33%. Это подтверждает эффективность системы внешнего армирования.

Экспериментальные исследования моделей напорной стены указывают на специфику работы железобетонных конструкций с межблочными строительными швами «строительный шов – наклонная трещина». В качестве примера на рисунке 11 представлен снимок фрагмента опытной модели.



Рис. 11. Экспериментальные исследования опытной модели напорной стены – «трещина по строительному шву-наклонная трещина»

Fig. 11. Experimental studies of an experimental model of a pressure wall – “construction seam crack-slanting crack”

Выводы

1. Руслевые здания ГЭС и напорные здания ГАЭС имеют значительное сходство между собой, в том числе, одинаковые основные несущие железобетонные конструкции, в первую очередь, напорные верховые стены машинных залов и напорные щитовые стены с упором в перекрытия.

2. В результате проведения экспериментальных исследований моделей фрагментов напорной стены руслового здания ГЭС (основной, воспринимающей нагрузки, конструкции в системе «напорная стена – железобетонное перекрытие») машинного зала ГЭС выявлен характер трещинообразования с раскрытием межблочных

строительных швов и разрушения в опорной части по схеме «межблочный шов – наклонная трещина». В усиленной модели фрагмента напорной стены (в сравнении с не усиленной моделью) установлено снижение ширины раскрытия межблочных строительных швов и снижение напряжений в рабочей стальной арматуре, а также повышение несущей способности на 33%.

3. Выявлена совместная работа железобетонных моделей, усиленных системой внешнего армирования с растягивающими напряжениями в композитной углеродной ленте $\sigma_{f,ш}$ на растянутой грани до 340 МПа и в поперечном направлении σ_f до 330 МПа.

4. Эффективность усиления напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС внешним армированием с применением композитных углеродных лент была экспериментально обоснована.

5. Область применения усиления железобетонных конструкций системами внешнего

армирования с использованием композитных углеродных лент была расширена вплоть до использования в конструкциях ГЭС/ГАЭС на основе результатов проведенного комплекса экспериментальных исследований.

Список использованных источников

1. Александров А.В., Зерцалов М.Г., Баклыков И.В., Смирнова М.А., Чжан Ц. «Анализ напряженно-деформированного состояния напорной стены здания гидроаккумулирующей электростанции при проектировании усиления прибетонной и композитами» / Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 4. С. 317-337.
2. Александров А.В. «Выравнивание здания Загорской ГАЭС-2» // Гидротехника 4(64). 2020. С. 10-13.
3. Chellapandian M., Prakash S.S., Sharma A. Experimental and finite element studies on the flexural behaviour of reinforced concrete elements strengthened with hybrid FRP technique // Composite Structures. 2019. Vol. 208. Design and Experimental Studies of Strengthening of Backwater Type Hydraulic Structures with Composite Materials International Journal for Computational Civil and Structural Engineering 466-478. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.10.028.
4. Samarakoon S.M.S.M.K., Piatek B., De Silva G.H.M.J.S. Investigation of the Flexural Behavior of Preloaded and Pre-Cracked Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates. Materials. 2023, 16, 22. <https://doi.org/10.3390/ma16010022>
5. Uz M.E., Guner Y., Avcı E. Strengthening of Reinforced Concrete Beams with CFRP Orientation. Buildings. 2024, 14, 82. <https://doi.org/10.3390/buildings14010082>
6. Wang H., Li C., Song S., Wang Y., Meng Q., Li F. Flexural Performance of Cracked Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets under Repeated Loads. Buildings 2023, 13, 2115. <https://doi.org/10.3390/buildings13082115>
7. Fanaradelli T.D., Rousakis T.C. Prediction of ultimate strain for rectangular reinforced concrete columns confined with fiber reinforced polymers under cyclic axial compression. Polymers. 2020, 12, 2691. <https://doi.org/10.3390/polym12112691>
8. Kabir H., Aghdam M.M. A robust Bézier based solution for nonlinear vibration and post-buckling of random checkerboard graphene nano-platelets reinforced composite beams. Composite Structures. 2019. Vol. 212. Pp. 184-198. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.041>
9. Volik A., Novitski Y. Strengthening of tensile zone of the reinforced concrete beams with composite fabrics. Research, Design & Cad in Construction: Theory and Practice (RD-CAD2021). Vol. 350. MATEC Web of Conferences. Brest: Republic of Belarus, 2021. October 29. Pp. 1-5. DOI: 10.1051/mateconf/202135000019.
10. Farqad Qays Ibrahim. Strengthen Strategies for Reinforced Concrete Haunched Beams Using Fibre Reinforced Polymer Fabric and Engineered Cementitious Composites. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. Vol. 9. № 3. July. 2021. Pp. 41-61.
11. СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87. М., 2012. 40 с.

References

1. Alexandrov A.V., Zertsalov M.G., Baklykov I.V., Smirnova M.A., and Zhang Ts. "Analysis of the Stress-Strain State of the Pressure Wall of a Hydroelectric Power Plant Building during the Design of Reinforcement with Concrete and Composites" / Melioration and Hydraulic Engineering. 2025. Vol. 15, No. 4. Pp. 317-337.
2. Alexandrov A.V. "Leveling the Zagorskaya HPP-2 Building" // Hydrotechnics 4(64). 2020. Pp. 10-13.
3. Chellapandian M., Prakash S.S., Sharma A. Experimental and finite element studies on the flexural behaviour of reinforced concrete elements strengthened with hybrid FRP technique // Composite Structures. 2019. Vol. 208. Pp. Design and Experimental Studies of Strengthening of Backwater Type Hydraulic Structures with Composite Materials International Journal for Computational Civil and Structural Engineering 466-478. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.10.028.
4. Samarakoon S.M.S.M.K.; Piatek B.; De Silva G.H.M.J.S. Investigation of the Flexural Behavior of Preloaded and Pre-Cracked Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates. Materials 2023, 16, 22. <https://doi.org/10.3390/ma16010022>
5. Uz, M.E.; Guner Y.; Avcı E. Strengthening of Reinforced Concrete Beams with CFRP Orientation. Buildings. 2024, 14, 82. <https://doi.org/10.3390/buildings14010082>
6. Wang H.; Li, C.; Song S.; Wang Y.; Meng Q.; Li, F. Flexural Performance of Cracked Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets under Repeated Loads. Buildings 2023, 13, 2115. <https://doi.org/10.3390/buildings13082115>
7. Fanaradelli T.D.; Rousakis T.C. Prediction of ultimate strain for rectangular reinforced concrete columns confined with fiber reinforced polymers under cyclic axial compression. Polymers. 2020, 12, 2691. <https://doi.org/10.3390/polym12112691>
8. Kabir H., Aghdam M.M. A robust Bézier based solution for nonlinear vibration and post-buckling of random checkerboard graphene nano-platelets reinforced composite beams. Composite Structures. Vol. 212, pp. 184-198. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.041>
9. Volik A., Novitski Y. Strengthening of tensile zone of the reinforced concrete beams with composite fabrics. Research, Design & Cad in Construction: Theory and Practice (RD-CAD2021). Vol. 350: MATEC Web of Conferences. Brest, Republic of Belarus, October 29, 2021. – Brest: [s. n.], 2021. – Pp. 1-5. DOI: 10.1051/mateconf/202135000019.
10. Farqad Qays Ibrahim. Strengthen Strategies for Reinforced Concrete Haunched Beams Using Fibre Reinforced Polymer Fabric and Engineered Cementitious Composites. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. Vol. 9, No. 3, July 2021, pp. 41-61.
11. SP 41.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures. Updated edition of SNiP 2.06.08-87. Moscow, 2012, 40 p.

Информация об авторах

Олег Дмитриевич Рубин, д-р техн. наук, профессор; профессор НИУ МГСУ, SPIN-код: 2720-6627, AuthorID:423001, Scopus 7004427140, ResearcherID AAE-6688-2022, ORCID: 0000-0002-0630-3251; rubinod@niies.ru

Андрей Викторович Александров, канд. техн. наук; начальник отдела АО «Институт Гидропроект», SPIN-код: 4152-5972, AuthorID: 1206829; a.aleksandrov@hydroproject.ru

Чжан Цзюньхао, аспирант НИУ МГСУ; ORCID: 0009-0006-0490-210X; weiw0951@gmail.com

Владимир Борисович Балагуров, инженер, начальник отдела филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС»; v.balagurov@hydroproject.ru

Сергей Евгеньевич Лисичкин, д-р техн. наук, главный специалист филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС», SPIN-код: 5423-0643, AuthorID:368472, Scopus 660391907, ORCID: 0000-0003-2761-331X; lisichkin1989@rambler.ru

Author information

Oleg D. Rubin, DSc (Eng), professor; Professor of the National Research University MGSU; SPIN-code: 2720-6627, AuthorID: 423001, Scopus 7004427140, ResearcherID AAE-6688-2022, ORCID: 0000-0002-0630-3251; rubinod@niies.ru

Andrey V. Aleksandrov, CSc (Eng); head of the department, JSC "Institute Hydroproject", SPIN-code: 4152-5972, AuthorID: 1206829; a.aleksandrov@hydroproject.ru

Zhang Junhao, postgraduate student of the National Research University MGSU ORCID: 0009-0006-0490-210X; weiw0951@gmail.com

Vladimir B. Balagurov, Engineer, head of the department, Branch of JSC "Institute Hydroproject" – "NIIES", v.balagurov@hydroproject.ru

Sergey E. Lisichkin, DSc (Eng), Chief expert, Branch of JSC "Institute Hydroproject" – "NIIES", SPIN-code: 5423-0643, AuthorID:368472, Scopus 660391907, ORCID: 0000-0003-2761-331X; lisichkin1989@rambler.ru

Вклад авторов

О.Д. Рубин – концептуализация, руководство экспериментальными исследованиями, анализ результатов экспериментов и формирование выводов.

А.В. Александров – участие в анализе результатов экспериментов, формирование выводов, редактирование рукописи.

Чжан Цзюньхао – участие в проведении экспериментов, обработке результатов, построении графиков.

В.Б. Балагуров – изготовление опытных моделей к проведению экспериментов, участие в проведении экспериментов.

С.Е. Лисичкин – участие в проведении экспериментов, анализе результатов экспериментов и формирование выводов, редактирование рукописи.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received 04.09.2025

Поступила после рецензирования / Received 27.11.2025

Принята к публикации / Accepted 17.12.2025

Contribution of the authors

O.D. Rubin – conceptualization, management of experimental research, analysis of experimental results and formation of conclusions.

A.V. Aleksandrov – participation in the analysis of experimental results, formation of conclusions, editing the manuscript.

Zhang Junhao – conducting experiments, processing results, plotting graphs.

V.B. Balagurov – manufacturing experimental models for conducting experiments, participation in conducting experiments.

S.E. Lisichkin – participation in conducting experiments, analysis of experimental results and formation of conclusions, processing results, editing the manuscript.

Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

УДК 556.3:626.811(06):574

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-83-91>**МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ПРИТОКА ВОДЫ
В ИРИКЛИНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ****Ж.Т. Сивохип¹, В.М. Павлейчик²**^{1,2} Институт степи УрО РАН; г. Оренбург, Российская Федерация¹ sivohip@mail.ru; ORCID: 0000-0001-5704-0554² pavleychik@rambler.ru; ORCID: 0000-0002-2846-0442

Аннотация. Крупнейшим искусственным водоемом в бассейне р. Урал, выполняющим функцию регулирования стока, является Ириклинское водохранилище ($W = 3260$ млн m^3), заполнение которого осуществлялось в период с 1958 по 1966 гг. Цель исследований – установить тенденции многолетней и сезонной динамики притока воды в Ириклинское водохранилище с учетом современных изменений регионального климата. Представлены результаты оценки многолетней динамики притока воды в Ириклинское водохранилище за периоды 1963-1992 и 1993-2024 гг. Среднемесячные, квартальные и годовые значения притока рассчитаны для створов рек: Урал (Березовка); Суундук (Майский); Таналык (Мамбетово); Большая Уртазымка (Сосновка) и Джуса (Добровольское). Установлено увеличение значений притока воды за период 1993-2024 гг. с максимальным ростом в зимние (январь-март) и в летние (август) месяцы, что соответствует современным тенденциям изменения водного режима рек бассейна р. Урал. Наиболее значительное превышение нормы установлено для фаз весеннего половодья и летней межени. Результаты анализа многолетних характеристик годового притока воды в Ириклинское водохранилище свидетельствуют о различиях по отдельным створам.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственной темы ИС УрО РАН № 126013016160-7 «Геоэкологические основы и технологические аспекты оптимизации природопользования в степных регионах России и сопредельных территорий».

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность руководителю В.А. Мещерину и начальнику отдела гидрологии Оренбургского ЦГМС Д.М. Татарину за предоставление актуальных данных инструментальных наблюдений по расходам воды.

Ключевые слова: степная зона, регулирование стока, изменение климата, общий приток воды

Формат цитирования: Сивохип Ж.Т., Павлейчик В.М. Многолетняя динамика притока воды в Ириклинское водохранилище. Природообустройство. 2026;Т.19(2):83-91. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-83-91>

Original article

**LONG-TERM DYNAMICS OF WATER INFLOW
INTO THE IRIKLINSKOYE RESERVOIR****Zh.T. Sivokhip¹, V.M. Pavleichik²**^{1,2} Institute of Steppe of UB of RAS; Orenburg, Russian Federation¹ sivohip@mail.ru; ORCID: 0000-0001-5704-0554² pavleychik@rambler.ru; ORCID: 0000-0002-2846-0442

Abstract. The largest artificial reservoir in the Ural River basin performing function of flow regulation is the Iriklienskoye reservoir ($W = 3260$ million m^3), which was filled in the period from 1958 to 1966. The objective of the study is to establish trends in the long-term and seasonal dynamics of water inflow into

the Iriklinskoye Reservoir, taking into account current changes in the regional climate. The article presents the results of an assessment of the long-term dynamics of water inflow into the Iriklinskoye Reservoir under changing climate conditions for the periods 1963-1992 and 1993-2024. Average monthly, quarterly, and annual inflow values are calculated for the cross-sections: Ural (Berezovka) and Suunduk (Maisky); Tanalyk (Mambetovo); Bolshaya Urtazymka (Sosnovka), and Dzhusa (Dobrovolskoye). An increase in water inflow values was established for the period 1993-2024, with a maximum growth in the winter (January–March) and summer (August) months, which corresponds to current trends in changes in the water regime of the rivers of the Ural River basin. The most significant excess of the norm was found for the phases of spring flooding and summer autumn. The results of the analysis of long-term characteristics of the annual water inflow into the Iriklinskoye Reservoir indicate certain differences in individual hydrometric sections.

The article was prepared within the framework of the implementation of the state theme of the IS Ural Branch of the Russian Academy of Sciences No 126013016160-7 “Geoecological Foundations and Technological Aspects of Optimizing Nature Management in the Steppe Regions of Russia and Adjacent Territories”.

Acknowledgements. The authors express their sincere gratitude to the head V.A. Meshcherin and the head of the hydrology department of the Orenburg CGMS D.M. Tatarinov for providing up-to-date data of instrumental observations on water discharges.

Keywords: steppe zone, flow regulation, guaranteed water supply, temperature

Format of citation: Sivokhip Zh.T., Pavleichik V.M. Long-term dynamics of water inflow into the Iriklinskoye reservoir. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(2):83-91. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-83-91>

Введение. Для регионов, расположенных в пределах степной зоны, решение задач гарантированного водообеспечения достигается, в том числе, и за счет регулирования стока прудами и водохранилищами. В частности, многолетнее регулирование речного стока – эффективный способ увеличения объемов располагаемых водных ресурсов в годы низкой водности. Крупнейшим искусственным водоемом в бассейне р. Урал, выполняющим данную функцию, является Ириклинское водохранилище ($W = 3260$ млн м³), заполнение которого осуществлялось в период с 1958 по 1966 гг. Значительное превышение полезного объема водохранилища над среднегодовым стоком ($W_{\text{п}} = 2,8$ км³; $Q_{\text{п}} = 1,3$ км³/год) позволяет эффективно устранять естественную неравномерность стока в многолетнем и сезонном аспектах [1].

Поверхностный приток является главным элементом приходной части водного баланса (табл. 1).

Регулирующая емкость водохранилища более чем в 1,5 раза превышает средний многолетний объем притока речных вод, поэтому

водохранилище способно производить глубокое регулирование стока среднего течения р. Урал и заметно влиять на режим даже в нижнем течении реки [2].

Общая площадь водосборной территории Ириклинского водохранилища составляет 15725 км² (рис. 1). В пределах водосбора водохранилища поверхностный приток формируется за счет основной (река Урал) и боковой приточности, причем доля бокового притока не превышает 8% и играет заметную роль только в период половодья [3].

Характерной чертой водного режима рек степной зоны являются многолетние и годовые отклонения от среднеемноголетних значений речного стока (рис. 1). В целом для современного периода (1993-2024 гг.) характерно превышение нормы стока в период летне-осенней и зимней межени, что соответствует текущим тенденциям изменения водного режима рек степной зоны. Кроме того, наиболее существенный размах значений стока установлен для притоков р. Урал 1-2 порядка [4]. В частности, максимальные расходы воды р. Суундук превышают среднеемноголетние

Таблица 1. Средний многолетний годовой баланс Ириклинского водохранилища [1]

Table 1. Average long-term annual balance of the Iriklinskoye Reservoir [1]

Водохранилище / Reservoir	Приход / Water inflow			Расход / Water flow rate			Внешний водообмен, км ³ / External water exchange, км ³
	Поверхностный приток, км ³ /год / Surface inflow, км ³ /year	Осадки / Precipitation		Сток, км ³ /год / Flow, км ³ /year	Испарение / Evaporation		
		км ³ /км ²	мм / mm		км ³ /км ²	мм / mm	
Ириклинское / Iriklinskoye	1,38	0,07	302	1,25	0,20	862	1,45

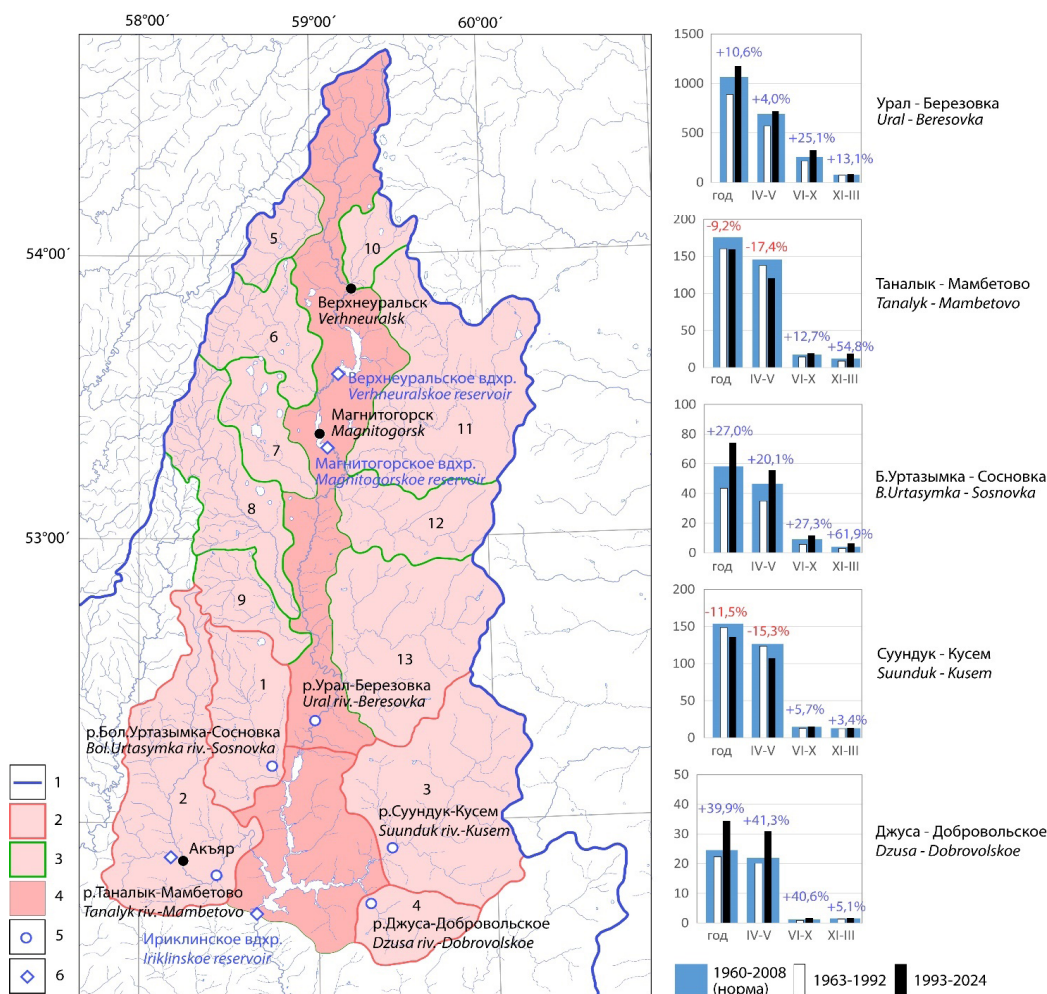


Рис. 1. Водосборная территория Ириклинского водохранилища.

Графики изменения среднего многолетнего стока (млн м³/год)

- 1 – граница бассейна р. Урал; 2 – водосборы рек – притоков Ириклинского вдхр. (на карте: 1 – р. Большая Уртазымка; 2 – р. Таналык; 3 – р. Суундук; 4 – р. Джуса); 3 – водосборы рек – притоков р. Урал выше Ириклинского вдхр. (на карте: 5 – р. Миндяк; 6 – р. Малый Кизил; 7 – р. Янгелька; 8 – р. Большой Кизил; 9 – р. Худолаз; 10 – р. Урляда; 11 – р. Гумбейка; 12 – р. Зингейка; 13 – р. Большая Караганка); 4 – водосборы поверхностного неруслового стока в р. Урал; 5 – гидрометрические посты; 5 – створы крупных водохранилищ

Fig. 1. Catchment area of the Irikliinskoye Reservoir.

Graphs of changes in the average long-term runoff (million m³/year)

- 1 – boundary of the Ural River basin; 2 – catchment areas – tributaries of the Irikliinskoye Reservoir (on the map: 1 – Bolshaya Urtazymka River; 2 – Tanalyk River; 3 – Suunduk River; 4 – Dzhusa River); 3 – catchment areas – tributaries of the Ural River upstream of the Irikliinskoye Reservoir (on the map: 5 – Mindyak River; 6 – Malyy Kizil River; 7 – Yangelka River; 8 – Bolshoy Kizil River; 9 – Khudolaz River; 10 – Urlyada River; 11 – Gumbeyka River; 12 – Zingeyka River; 13 – Bolshaya Karaganka River); 4 – catchment areas of surface non-riverbed runoff in the Ural River; 5 – hydrometric posts; 5 – sections of large reservoirs

значения практически в 3 раза. В маловодную фазу года (летняя и осенняя межень) сток притоков Ириклинского водохранилища (Суундук, Большая Уртазымка, Джуса и др.) сокращается до минимальных значений, что обуславливает формирование слабопроточных плесов. Река Урал (п. Березовка) также характеризуется значительными колебаниями стока: например, максимальный объем стока в данном створе составил 3,2 км³ в 2000 г., а минимальный – 0,2 км³ в 1976 г.

Согласно результатам ранее проведенных исследований [5] в бассейне р. Урал установлено статистически значимое повышение температуры приземного слоя воздуха с максимальным ростом в январе-марте. Данная тенденция сопровождается увеличением числа дней с температурой выше 0°C и закономерным повышением доли стока зимней межени в годовом объеме рек исследуемого бассейна [6]. Кроме того, важно учесть, что эксплуатация водохранилища как одного из элементов техносферы, изменяющего сток

рек, обуславливает необходимость тщательной оценки происходящих на его водосборе изменений естественного стока [7].

Цель исследований: установить тенденции многолетней и сезонной динамики притока воды в Ириклинское водохранилище с учетом современных изменений регионального климата.

Материалы и методы исследований. В качестве исходных данных использованы ряды средних значений расходов воды (Q , м³/с) по 5 замыкающим створам рек – притоков исследуемого водохранилища (табл. 2).

Сформированная база данных охватывает период с 1960 по 2024 гг. включительно. Приток воды в Ириклинское водохранилище определен методом суммы расходов в данных створах. Эмпирическая ежегодная вероятность превышения гидрологических характеристик и статистических параметров основного и бокового притоков в водохранилище рассчитана в соответствии с указаниями, представленными в работе [8]. Фазы водности рек исследуемой территории определены методом расчета значений модульного коэффициента:

$$K_i = W_i / W_0,$$

где i – годы многолетнего ряда; W_0 – средняя многолетняя величина по всему ряду с последующим построением нормированных разностных интегральных кривых годового и сезонного стока.

Средние многолетние значения стока (норма стока) рек исследуемой территории рассчитаны для периода 1960-2007 гг., включающего в себя фазы низкой (1960-1989 гг.) и высокой водности (1990-2007 гг.). С учетом региональных особенностей климата выделены следующие периоды: апрель-май – весеннее половодье; июнь-октябрь – летне-осенний сезон; ноябрь-март – зимний сезон. Сравнительный анализ отдельных параметров основного и бокового

притоков выполнен для двух периодов: 1963-1992 гг. (30 лет) и 1993-2024 гг. (31 год).

Результаты и их обсуждение. Поверхностный приток в Ириклинское водохранилище характеризуется значительными колебаниями водности, что подтверждает чередование много- и маловодных фаз, отличающихся продолжительностью и интенсивностью (рис. 2).

Как правило, группировки маловодных лет более продолжительны по сравнению с многоводными. Среднегодовые значения стока (модульный коэффициент) р. Урал (п. Березовка) изменяются от 1,02 в 1960-1989 гг. до 1,30 в многоводную фазу 1990-2007 гг. и 0,63 в маловодный период 2008-2023 гг. Кроме того, большинство рек исследуемой территории характеризуется синфазными изменениями стока, что связано со сходными климатическими условиями стокообразования [9].

В таблице 3 приведены статистические параметры, характеризующие вероятностные закономерности распределения величин сезонного и годового притока в Ириклинское водохранилище.

Данные таблицы 3 отражают параметры изменчивости и асимметричности величин сезонного и годового притоков. В частности, коэффициент вариации достигает максимальных значений (0,9-1,1) в летне-осенний и зимний (для бокового притока) сезоны. Основной и боковой приток Ириклинского водохранилища в период летне-осенней межени характеризуется значительной асимметричностью распределения стока. Также обращает на себя внимание высокая доля бокового притока в весенний период – около 40-50% в общем объеме.

Закономерности внутригодового распределения стока в пределах водосборной территории Ириклинского водохранилища наглядно иллюстрируют гидрографы основного притока: для

Таблица 2. Характеристика основного и бокового притока в Ириклинское водохранилище
Table 2. Characteristics of the main and lateral inflows into the Iriklynskoye Reservoir

Река – створ / River – section	D^* , км / D , km	S , км ² / S , km ²	L , км / L , km	Q_{cp} , м ³ /с / Q_{av} , m ³ /s	W , млн м ³ / W , million m ³ / year
Основной приток / Main inflow					
Урал – Березовка / Ural – Berezovka	32,0	22600	498	32,65	1015,70
Боковой приток / Lateral inflow					
Таналык – Мамбетово / Tanalyk – Mambetovo	59,0	4160	225	5,19	157,67
Б. Уртазымка – Сосновка / B. Urtazymka – Sosnovka	10,6	1890	87	1,86	56,78
Суундук – Майский / Suunduk – Maiskiy	69,0	6430	174	4,50	138,84
Джуса – Добровольское / Dzhusa – Dobrovolskoe	15,0	1070	75	1,61	27,13

* D – расстояние до уреза воды в Ириклинском водхр., км / distance to the water's edge in the Iriklynsky reservoir, km; S – водосборная площадь / catchment area; L – длина водотока / length of watercourse; Q_{cp} – среднегодовой расход / average annual flow; W – среднегодовой объем / rate average annual volume

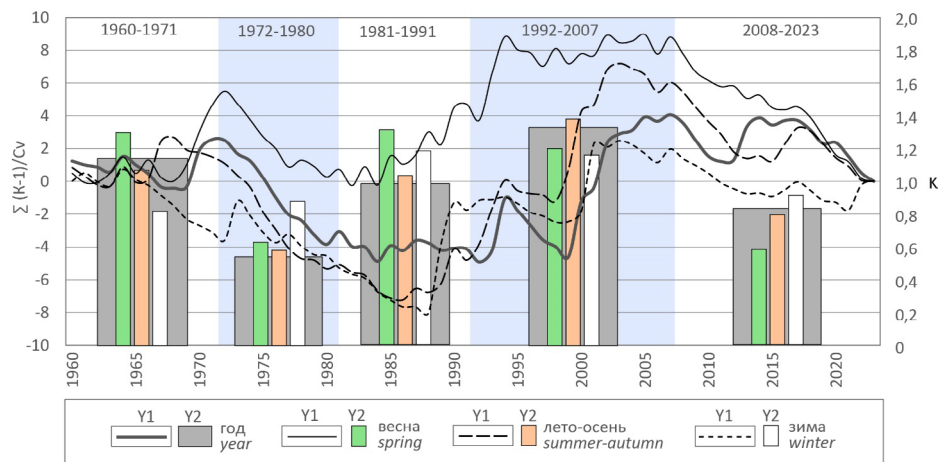


Рис. 2. Нормированные разностные интегральные кривые стока (Y1) р. Урал (п. Березовка). Значения модульного коэффициента по среднемноголетним периодам (Y2)

Fig. 2. Normalized difference integral curves (Y1) of the Ural River runoff (Berezovka). The values of the modular coefficient for the average annual periods (Y2)

маловодных лет – 75%, для многоводных лет – 5% обеспеченности (рис. 3).

В целом гидрографы мало- и многоводных лет показывают сходное распределение притока по отдельным сезонам: основная доля притока формируется в апреле – в период пика весеннего половодья, минимальная доля – в период устойчивой зимней межени.

Результаты сопоставительного анализа средних величин общего притока в Ириклинское водохранилище для периодов 1963-1992 и 1993-2024 гг. представлены в таблице 4.

В период 1993-2024 гг. наиболее значительный рост объемов притока воды в Ириклинское

водохранилище отмечается в зимний и летне-осенний сезоны. Менее значимая динамика поверхностного притока наблюдается в предзимний сезон (октябрь-ноябрь) и в период весеннего половодья. Суммарные годовые значения общего притока за исследуемые периоды возросли с 480,6 до 609,5 м³/с, или на 127%, что обусловлено в первую очередь увеличением водности фаз летне-осенней и зимней межени.

Актуальная тенденция изменения водного режима рек степной зоны подтверждается данными таблицы 5, отражающими сезонное изменение расходов воды основного и бокового притоков в Ириклинское водохранилище.

Таблица 3. Статистические параметры притока в Ириклинское водохранилище

Table 3. Statistical parameters of the inflow into the Iriklikskoye Reservoir

Период / Period	W*, млн м ³ / W, million m ³ / year	σ ² , млн м ³ / σ ² / million m ³ / year	C _v	C _s	(r=1)
Основной / main					
Весна / spring	639,5	231816,0	0,7	1,8	0,14
Лето-осень / summer-autumn	259,2	73842,0	1,0	3,4	0,01
Зима / winter	77,8	1772,5	0,5	1,9	0,24
Год / year	1015,7	437134,6	0,6	1,6	0,22
Боковой / lateral					
Весна / spring	315,2	54751,8	0,7	1,2	0,01
Лето-осень / summer-autumn	29,0	741,9	0,9	2,1	0,15
Зима / winter	20,6	368,3	0,9	2,0	0,05
Год / year	389,7	69277,5	0,7	1,3	0,04
Общий / total					
Весна / spring	862,1	391123,1	0,7	1,4	0,22
Лето-осень / summer-autumn	300,3	105533,2	1,1	3,0	-0,01
Зима / winter	98,3	2913,5	0,5	1,8	0,1
Год / year	1426,4	827420,7	0,6	1,5	0,2

* W – средний приток / average inflow; σ² дисперсия / dispersion; C_v – коэффициент вариации / coefficient of variation; C_s – коэффициент асимметрии / coefficient asymmetry; (r = 1) – коэффициент автокорреляции / coefficient autocorrelation

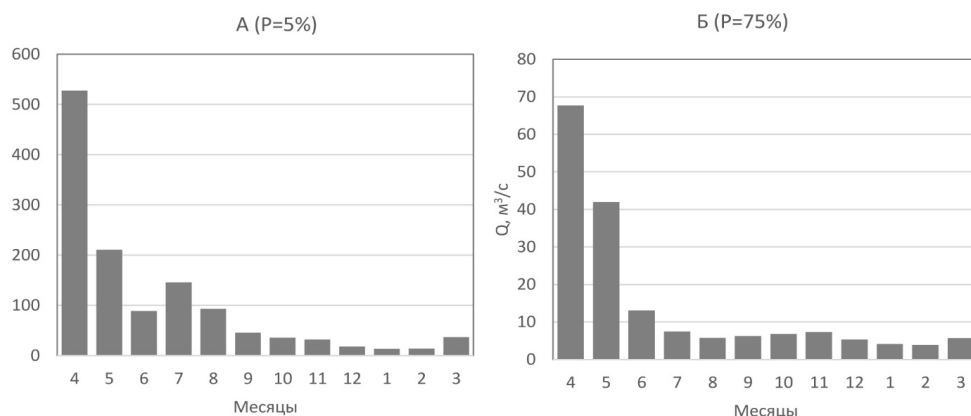


Рис. 3. Гидрограф 5- и 75%-ной обеспеченности в створе Березовки
Fig. 3. Hydrograph 5% and 75% availability at the Berezovka section (Ural River)

Таблица 4. Осредненные значения общего притока воды (Q , m^3/c) в Ириклинское водохранилище за периоды 1963-1992 (1) и 1993-2024 (2) гг.

Table 4. Average values of total water inflow (Q , m^3/s) into the Iriklikskoye Reservoir for the periods 1963-1992 (1) and 1993-2024 (2)

Период / Period	Месяц / Month											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	6,6	5,6	12,8	258,6	79,9	28,6	21,6	16,4	11,9	15,2	14,4	9,0
2	9,3	9,6	21,7	286,2	112,6	42,4	29,9	37,1	18,3	15,6	15,6	11,3
Δ , %	140	171	169	111	141	149	138	226	153	103	108	125

Таблица 5. Многолетние параметры притока воды в Ириклинское водохранилище (1963-1992/1993-2024 гг.)

Table 5. Long-term parameters of water inflow into the Iriklikskoye Reservoir (1963-1992/1993-2024)

Параметры / Parameters	Основной приток / main inflow				Боковой приток / lateral inflow			
	Квартал / quarter							
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
C_v	$\frac{0,46}{0,59}$	$\frac{0,68}{0,75}$	$\frac{1,21}{1,64}$	$\frac{0,48}{0,74}$	$\frac{1,6}{1,0}$	$\frac{0,6}{0,8}$	$\frac{0,9}{0,9}$	$\frac{0,9}{0,5}$
$Q_{cp}, m^3/c / Q_{av}, m^3/s$	$\frac{19,7}{29,7}$	$\frac{244,8}{313,6}$	$\frac{44,4}{75,9}$	$\frac{33,7}{34,5}$	$\frac{5,8}{10,8}$	$\frac{126,2}{127,6}$	$\frac{7,1}{9,9}$	$\frac{5,7}{8,0}$
$Q_{min}, m^3/c / Q_{min}, m^3/s$	$\frac{6,2}{7,8}$	$\frac{53,7}{68,7}$	$\frac{4,8}{6,1}$	$\frac{10,8}{10,0}$	$\frac{0,4}{3,4}$	$\frac{19,6}{10,1}$	$\frac{0,6}{1,9}$	$\frac{1,3}{2,7}$
$Q_{max}, m^3/c / Q_{max}, m^3/s$	$\frac{46,4}{83,5}$	$\frac{828,6}{990,0}$	$\frac{320,3}{568,1}$	$\frac{81,0}{146,1}$	$\frac{42,7}{50,3}$	$\frac{284,4}{465,5}$	$\frac{32,2}{36,6}$	$\frac{28,7}{24,9}$

Наиболее значительное повышение водности (Q_{cp}) в последние десятилетия по отношению к периоду 1963-1992 гг. отмечается в I (основной приток – 50%, боковой приток – 86%) и III (основной приток – 70%, боковой приток – 39%) кварталах. Аналогичные результаты получены для периода 1978-2013 гг. по сравнению с 1946-1977 гг. (представлены в научно-прикладном справочнике «Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища РФ»). Так, приток в Ириклинское водохранилище за период 1978-2013 гг. увеличился как по годовым значениям (23%), так и поквартально: II квар-

тал – на 14%; III квартал – на 52%; I квартал – на 135% [10].

Результаты анализа изменения многолетних характеристик годового притока свидетельствуют о пространственных различиях для замыкающих створов рек бассейна исследуемого водохранилища (табл. 6).

Максимальный рост среднегодовых значений бокового притока установлен для рек Урал, Джуса и Большая Уртазымка (на 22, 43 и 64% соответственно). Общая тенденция современного периода для рек, формирующих приток воды в Ириклинское водохранилище, – это повышение коэффициента вариации

Таблица 6. Многолетние характеристики годового притока воды (Q , м³/с) в Ириклинское водохранилище

Table 6. Long-term characteristics of the annual water inflow (Q , m³/s) into the Iriklienskoye Reservoir

Периоды / Periods	Cv	Макс. / Max	Вероятность превышения, % / Probability of exceeding, %					Мин. / Min	Среднее / Average
			5	25	50	75	95		
Общий приток / total inflow									
1963-1992	0,54	1258,7	871,5	618,3	426,3	261,4	154,7	138,5	487,1
1993-2024	0,66	1570,3	1530,3	744,7	480,1	282,6	176,4	169,2	609,5
Урал – Березовка / Ural-Berezovka									
1963-1992	0,54	958,9	709,8	412,8	320,8	189,0	127,7	83,1	353,8
1993-2024	0,70	1253,7	1196,5	546,0	325,1	207,2	142,7	122,5	453,7
Таналык – Мамбетово / Tanalyk – Mambetovo									
1963-1992	0,58	150,9	132,3	82,5	57,1	35,8	14,8	9,4	61,4
1993-2024	0,82	248,2	164,7	74,0	44,8	27,1	11,6	5,2	61,5
Большая Уртазымка – Сосновка / B. Urtazymka – Sosnovka									
1963-1992	0,69	52,3	38,5	23,3	13,8	7,4	3,4	3,3	16,8
1993-2024	0,78	89,3	74,8	39,4	25,8	8,5	2,5	1,5	28,5
Суундук – Майский / Suunduk – Maiskiy									
1963-1992	0,64	159,3	120,3	79,2	56,4	23,1	11,9	10,6	56,9
1993-2024	0,72	154,8	132,5	64,0	37,6	24,4	11,4	8,5	52,5
Джуса – Добровольское / Dzhusa – Dobrovol'skoe									
1963-1992	1,32	36,9	27,0	14,3	4,7	1,1	–	1,1	8,8
1993-2024	0,90	39,6	39,3	17,6	10,9	3,9	–	2,7	13,3

речного стока (кроме р. Джуса). В среднем рост данного параметра составил 10-15%, что обусловлено, в том числе, наличием в современном периоде экстремально многоводных (1994, 2000, 2012, 2024 гг.) и маловодных (2009, 2010, 2022 гг.) лет.

Отдельного внимания заслуживает анализ формирования поверхностного притока в Ириклинское водохранилище в 2024 г., для которого было характерно развитие экстремального гидроэкологического события в период весеннего половодья (табл. 7).

Таблица 7. Изменение притока в Ириклинское водохранилище (млн м³) в 2024 г. по отношению к среднемноголетнему значению

Table 7. Change in the inflow into the Iriklienskoye Reservoir (million m³) in 2024 in relation to the average long-term value

Реки / Rivers	Параметры / Parameters	Год / Year	Весна / Spring	Лето-Осень / Summer-Autumn	Зима / Winter
Урал – Березовка / Ural – Berezovka	норма / rate	1063,7	692,0	258,4	75,7
	2024	2892,8	1309,0	1376,1	122,6
	%	171	89	432	61
Таналык – Мамбетово / Tanalyk – Mambetovo	норма / rate	175,7	145,9	17,4	12,3
	2024	260,6	184,3	31,7	11,2
	%	48	26	82	–9
Б. Уртазымка – Сосновка / B. Urtazymka – Sosnovka	норма / rate	58,3	46,4	9,2	4,0
	2024	153,7	104,1	27,3	3,4
	%	163	124	196	–13
Суундук – Майский / Suunduk – Maiskiy	норма / rate	153,7	126,3	14,7	12,9
	2024	335,7	261,4	39,0	10,4
	%	118	107	166	–20
Джуса – Добровольское / Dzhusa – Dobrovol'skoe	норма / rate	24,6	21,9	1,2	1,6
	2024	86,7	62,3	7,0	0,2
	%	252	184	478	–89
Общий приток / Total inflow	норма / rate	1471,6	919,3	279,6	95,8
	2024	3729,7	1921,2	1481,1	147,9
	%	153	108	429	54

Наиболее значимое превышение нормы установлено для фаз весеннего половодья и летней межени. Развитие высокой волны весеннего половодья в верховьях бассейна р. Урал в 2024 г. произошло на фоне длительного маловодного периода (2008-2022 гг.) и было обусловлено взаимодействием гидрометеорологических и физико-географических факторов [11]. Формирование высоких объемов притока в Ириклинское водохранилище в период летнего сезона 2024 г. связано в первую очередь с интенсивными ливневыми осадками в пределах водосборной территории (в июле 2024 г. в Верхнеуральске – 263 мм, Магнитогорске – 212 мм). Норма общего притока в 2024 г. была превышена в 2,5 раза для годового объема, в 2 раза – для объемов весенне-половодного периода и в 5 раз – для летне-осеннего сезона. Годовой объем общего притока в Ириклинское водохранилище в 2024 г. составил 3,72 км³ при объеме искусственного водоема 3,26 км³. Также следует отметить, что доля стока весеннего половодья и летне-осенней межени 2024 г. в суммарном объеме общего притока периода 1993-2024 гг. составляет 6 и 13% соответственно. В итоге формирование значительных объемов притока воды в Ириклинское

водохранилище весной и летом 2024 г. на фоне продолжительной маловодной фазы (2008-2023 гг.) подтверждает актуальность своевременного анализа изменения водного режима рек бассейна р. Урал с учетом текущих климатических тенденций.

Выводы

Таким образом, происходящие в бассейне реки Урал изменения условий стокоформирования (в первую очередь – климатических условий) привели к значительной трансформации внутригодового распределения притока воды в Ириклинское водохранилище. Максимальное увеличение объемов поступающей в водохранилище воды характерно для межени периода, особенно зимнего сезона. Установлено увеличение притока воды за период 1993-2024 гг. с максимальным ростом в зимние (январь-март) и летние (август) месяцы, что соответствует современным тенденциям изменения водного режима рек бассейна р. Урал. Современные тенденции необходимо принимать во внимание при осуществлении регулирования стока Ириклинским водохранилищем, в том числе с учетом трансграничного статуса реки Урал.

Список использованных источников

1. Вуглинский В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 220 с.
2. Магрицкий Д.В. Водохранилища, водопотребление в российской части бассейна реки Урал и их воздействие на годовой сток // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 4. С. 62-80. DOI: 10.35567/19994508-2024-6-61-80
3. Чибилёв А.А., Павлейчик В.М., Дамрин А.Г. Ириклинское водохранилище: геоэкология и природно-ресурсный потенциал: Монография. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 182 с. EDN: QKOSKL
4. Сивохиц Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилёв А.А. и др. Современные изменения водного режима рек бассейна р. Урал // Вопросы географии: Сборник 145 «Гидрологические изменения». 2018. С. 285-313. DOI: 10.31857/S2587556621060133 EDN: XNFPNR
5. Сивохиц Ж.Т., Павлейчик В.М. Региональные тенденции изменения климата в бассейне реки Урал // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2022. № 3. С. 106-117. DOI: 10.31857/S2686739722602691
6. Сивохиц Ж.Т., Павлейчик В.М., Падалко Ю.А. Изменение минимального стока в бассейне реки Урал // Известия РАН. Серия Географическая. 2021. № 6. С. 900-913. DOI: 10.31857/S2587556621060133. EDN: SRZGWQ
7. Добровольский С.Г., Лебедева И.П., Истомина М.Н. и др. Водохранилища мира: анализ количественных параметров и воздействия на структуру многолетних изменений стока регулируемых рек // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 1. С. 3-15. DOI: 10.31857/S0321059620010162
8. Свод правил 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Минстрой России, 2023. 103 с.

References

1. Vuglinsky V.S. Water resources and the water balance of large reservoirs of the USSR. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 220 p.
2. Magritskiy D.V. Reservoirs, water consumption in the Russian part of the Ural River basin and their impact on annual runoff // Russian water industry: problems, technologies, management. 2024. No. 4. P. 62-80. DOI: 10.35567/19994508-2024-6-61-80
3. Chibilev A.A. The Irilinsky reservoir: geocology and natural resource potential / A.A. Chibilev, V.M. Pavleichik, A.G. Damrin. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006. 182 p. EDN: QKOSKL
4. Sivohip Zh.T. Modern changes in the water regime of the rivers of the Ural River basin / Zh.T. Sivohip, V.M. Pavleychik, A.A. Chibilev et al. // Questions of Geography. Collection 145. Hydrological changes, 2018. P. 285-313. DOI: 10.31857/S2587556621060133 EDN: XNFPNR
5. Sivohip Zh.T. Regional trends in climate change in the Ural River basin / Zh.T. Sivohip, V.M. Pavleichik // Bulletin of Irkutsk State University. Series "Earth Sciences". 2022. No. 3. P. 106-117. DOI: 10.31857/S2686739722602691
6. Sivohip Zh.T. Change in minimum flow in the Ural River basin / Zh.T. Sivohip, V.M. Pavleichik, Yu.A. Padalko // Reports of the Academy of Sciences. Earth Sciences. 2021. No. 6. P. 900-913. DOI: 10.31857/S2587556621060133 EDN: SRZGWQ
7. Dobrovolsky S.G., Lebedeva I.P., Istomina M.N. et al. Reservoirs of the world: analysis of quantitative parameters and impact on the structure of long-term changes in the flow of regulated rivers // Water resources. 2020. Vol. 47. No. 1. P. 3-15. DOI: 10.31857/S0321059620010162
8. Code of Rules 529.1325800.2023. Determination of the main calculated hydrological characteristics. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2023. 103 p.

9. Сивохиц Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилёв А.А. Пространственно-временные закономерности многолетней динамики речного стока в бассейне р. Урал // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2025. Т. 522 (2). С. 155-164. DOI: 10.31857/S2686739725060199

10. Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища РФ: Научно-прикладной справочник / Под ред. В.Ю. Георгиевского. М.: ООО «РПЦ Офорт», 2017. 132 с.

11. Павлейчик В.М., Языкбаев Э.Р., Сивохиц Ж.Т. Метеорологические условия формирования весеннего половодья 2024 года на реке Урал // Вопросы степеведения. 2026. № 1. С. 25-35.

Информация об авторах

Жанна Тарасовна Сивохиц, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник отдела ландшафтной экологии. ORCID: 0000-0001-5704-0554, Scopus: 36176391600, WOS Researcher ID J-6413-2018, РИНЦ ID: 119177, sivohip@mail.ru

Владимир Михайлович Павлейчик, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник отдела ландшафтной экологии. ORCID: 0000-0002-2846-0442, Scopus: 36176329600, WOS Researcher ID B-2106-2018, РИНЦ ID: 118846, pavleychik@rambler.ru

Вклад авторов

Ж.Т. Сивохиц – разработка концептуального замысла исследования, разработка структуры статьи и методического подхода исследования, и подготовка рукописи к публикации.

В.М. Павлейчик – участвовал в проверке логики изложения, оформлении графических материалов, редактировании текста и научной корректировке рукописи.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received 19.02.2026

Поступила после рецензирования / Received 18.04.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 20.04.2026

9. Sivohip Zh.T., Pavleichik V.M., Chibilev A.A. Spatial and temporal patterns of long-term dynamics of river flow in the Ural River basin // Reports of the Academy of Sciences. Earth Sciences. 2025. Vol. 522 (2). P. 155-164. DOI: 10.31857/S2686739725060199

10. Long-term characteristics of water inflow to the largest reservoirs of the Russian Federation. Scientific and applied reference book / Edited by V.Y. Georgievsky, Moscow: ROC Ofort LLC, 2017. 132 p.

11. Pavleichik V.M. Meteorological conditions of the formation of the spring flood of 2024 on the Ural River / V.M. Pavleychik, E.R. Yazykbaev, Zh.T. Sivohip // Questions of steppe studies. 2026. No. 1. P. 25-35.

About the authors

Zhanna T. Sivohip, DScs (Geogr), senior researcher, department of landscape ecology. ORCID: 0000-0001-5704-0554, Scopus: 36176391600, WOS Researcher ID J-6413-2018, RSCI ID: 119177, sivohip@mail.ru

Vladimir M. Pavleichik, CSs (Geogr), senior researcher, department of landscape ecology. ORCID: 0000-0002-2846-0442, Scopus: 36176329600, WOS Researcher ID B-2106-2018, RSCI ID: 118846, pavleychik@rambler.ru

Contribution of the authors

Zh.T. Sivohip – development of the conceptual concept of the study, development of the structure of the article and methodological approach of the study, and preparation of the manuscript for publication.

V.M. Pavleychik – participated in checking the logic of presentation, design of graphic materials, editing the text and scientific correction of the manuscript.

Оригинальная статья

УДК 556.06 (571.65)

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-92-97>



МНОГОЛЕТНИЕ КОЛЕБАНИЯ ГОДОВОГО СТОКА РЕК НА ПОБЕРЕЖЬЕ ЗАЛИВА КРЕСТА

М.В. Ушаков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук; Магадан, Российская Федерация
mvilorich@narod.ru; ORCID: 0000-0003-1731-7541

Аннотация. На побережье залива Креста (Чукотка) сточные воды п. Эгвекино и аэропорта сбрасываются в речную сеть и залив без очистки. В исследованиях ставилась цель изучить характер многолетних колебаний годового стока рек залива Креста. По годовым суммам осадков и вычисленным величинам испарения с поверхности суши были удлинены ряды годового стока рек Нырвакнотвээм и Изыскательский. Исследования показали, что ряд среднегодовой температуры воздуха в пункте Эгвекино имеет статистически значимый положительный тренд. Колебания годовых сумм атмосферных осадков, испарения и слоев годового стока не содержат трендов. Спектральный анализ выявил в колебаниях годового стока статистически значимые гармоники на периодах 4, 6 и 7 лет. Было получено гармоническое уравнение, при помощи которого можно прогнозировать колебания годового стока рек залива Креста. Результаты будут полезны при проектировании и эксплуатации очистных сооружений сточных вод и рациональном использовании водных ресурсов.

Ключевые слова: годовой сток, испарение, спектральный анализ временного ряда, прогноз

Формат цитирования: Ушаков М.В. Многолетние колебания годового стока рек на побережье залива Креста. *Природообустройство*. 2026;Т.19(2):92-97. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-92-97>

Original article

LONG-TERM FLUCTUATIONS IN THE ANNUAL FLOW OF RIVERS ON THE COAST OF THE BAY OF THE CROSS

M.V. Ushakov

North-East Interdisciplinary Scientific Research Institutena. N.A. Shilo, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Russian Federation

¹ mvilorich@narod.ru; ORCID: 0000-0003-1731-7541

Abstract. On the coast of the Bay of the Cross (Chukotka), wastewater from the village of Ekvekinot and the airport is discharged into the river network and the bay without treatment. The goal of the study was to study the nature of long-term fluctuations in the annual flow of the rivers of the Bay of the Cross. Based on annual precipitation amounts and calculated evaporation values from the land surface, the series of annual runoff of the Nyrvaknotveem and Izyskatelsky rivers were extended. The study showed that the series of average annual air temperature at Egvekinot has a statistically significant positive trend. Fluctuations in annual precipitation amounts, evaporation, and annual runoff layers do not contain trends. Spectral analysis revealed statistically significant harmonics in fluctuations in annual runoff over periods of 4, 6, and 7 years. A harmonic equation was obtained that can be used to predict fluctuations in the annual runoff of the rivers of the Bay of the Cross. The results will be useful in the design and operation of wastewater treatment plants and the rational use of water resources.

Keywords: annual runoff, evaporation, time series spectral analysis, forecast

Citation format: Ushakov M.V. Long-term fluctuations in the annual flow of rivers on the coast of the Bay of Cross. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):92-97. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-92-97>

Введение. Залив Креста – часть Анадырского залива Берингова моря у южного берега Чукотского полуострова, административно относящийся к городскому округу Эгвекино Чукотского автономного округа Российской Федерации.

На берегу залива Креста располагается одноименный аэропорт и п. Эгвекино. Водоснабжение Эгвекино и аэропорта осуществляется из двух скважин с суммарным дебетом 18000 м³ в сутки [1].

Водоотведение производится в выгребные ямы, далее сточные воды сбрасываются в ручей Изыскательский и залив Креста без очистки. Текущая система не способна обеспечить соблюдение нормативов качества очистки сточных вод по всем показателям [1]. Поэтому полезной является информация о режиме речного стока, который снижает концентрации загрязняющих веществ как в реках, так и в заливе.

Цель исследований: получить представление о характере многолетних колебаний годового стока рек в бассейне залива Креста.

В связи с глобальным потеплением климата [2] происходят изменения в гидрологическом режиме рек [3-5], поэтому изучение многолетних колебаний гидрологических характеристик приобретает еще большее научное значение.

Побережье залива Креста расположено в субарктическом поясе с продолжительной морозной зимой и прохладным летом, в зоне тундр.

Внутригодовое распределение стока является крайне неравномерным [6]. Зимой все реки промерзают до дна. Весеннее половодье начинается в конце мая – начале июня и заканчивается в июле. Летняя межень прерывается дождевыми паводками. В октябре реки уходят в зиму, и в ноябре сток прекращается совсем.

Материалы и методы исследований.

В районе исследований работали два гидрологических поста, изучавших речной сток (табл. 1). Годичные величины годового стока были взяты из справочников и гидрологических ежегодников Государственного водного кадастра. В 90-е гг. прошлого века наблюдения на этих постах были прекращены.

Пропуски в последовательности значений слоя стока на р. НырвакиноТВЭЭМ, 6 км от устья, были восстановлены по данным гидрологического поста руч. Изыскательский – 1,6 км от устья – методом гидрологической аналогии [8].

Многолетние данные о температуре воздуха и атмосферных осадках на метеостанции ЭгвекиноТ были получены на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [9].

Вычисление годичных величин испарения с поверхности суши за гидрологический год производилось по методу В.С. Мезенцева, когда учитываются сумма положительных среднемесячных температур воздуха и годовая сумма атмосферных осадков [10].

Анализ рядов на наличие тренда выполнялся с помощью оценки статистической значимости коэффициента регрессии связи анализируемой величины с временем [11] и критерия Стьюдента на уровне значимости 5%.

В работе использовался регрессионный анализ.

Для изучения частотной структуры многолетних колебаний годового стока применялся спектральный анализ. Спектральная плотность рассчитывалась с использованием весовой функции Хемминга [12]:

$$S(T) = 1 / 2\pi + \sum_{\tau=1}^m [(0,54 + 0,46 \cos(\pi\tau / m))r(\tau) \cos(2\pi\tau / T)] / \pi, \quad (1)$$

где T – период ($T = 1, 2, \dots, m$ лет); τ – сдвиг по времени с дискретностью 1 год; m – максимальный сдвиг по τ ($m = n/2$ лет); n – длина ряда; $r(\tau)$ – ординаты автокорреляционной функции.

Аналитическая аппроксимация колебаний стока производилась при помощи гармонического уравнения.

Результаты и их обсуждение. Анализ среднегодовой температуры воздуха, годовой суммы атмосферных осадков, испарения с поверхности суши за год в пункте ЭгвекиноТ на внутрирядную однородность показал, что все ряды однородны по среднему и дисперсии (табл. 1). Исключение составляет ряд среднегодовых температур воздуха, который содержит статистически значимый тренд на повышение (рис. 1, табл. 2).

Слои годового стока рек залива Креста хорошо связаны с разностью между годовой суммой осадков и испарения за год $P-E$ (рис. 2):

$$H_1 = 1,19(P - E) + 191, r = 0,72; \quad (2)$$

$$H_2 = 1,51(P - E) + 506, r = 0,72, \quad (3)$$

где H_1, H_2 – слои годового стока на р. НырвакиноТВЭЭМ (6 км от устья) и на ручье Изыскательский (1,6 км от устья) соответственно, мм; P – годовая сумма осадков, мм; E – испарение за год, мм; r – коэффициент корреляции.

Таблица 1. Гидрологические посты на побережье залива Креста [7]

Table 1. Hydrological posts on the coast of the Bay of the Cross [7]

Река – пункт / The river – a point	Площадь водосбора, км ² / Catchment area, km ²	Средняя высота водосбора, м / Average catchment height, m	Годы наблюдений за стоком / Years of runoff observations
р. НырвакиноТВЭЭМ – 6 км от устья / Nyrvakinetveem River – 6 km from the mouth	207	550	1950-1965, 1968-1980, 1982-1998
руч. Изыскательский – 1,6 км от устья / stream Izyskatelsky – 1.6 km from the mouth	13,2	430	1947-1995

Таблица 2. Статистические характеристики элементов гидрометеорологического режима на побережье залива Креста

Table 2. Statistical characteristics of the elements of the hydrometeorological regime on the coast of the bay of the Cross

Элемент режима / Mode element	Длина ряда, лет / Series length, years	Среднее / Average	Средне-квадратичное отклонение / Mean standard deviation	Однородность ряда / Homogeneity of the series	
				по среднему / by average	по дисперсии / by dispersion
Среднегодовая температура воздуха, °С / Average annual air temperature, °C	62	-5,4	1,4	Неоднороден / heterogeneous	Однороден / homogeneous
Сумма осадков за год, мм / Annual precipitation, mm	55	555	150	однороден / homogeneous	Однороден / homogeneous
Испарение за год, мм / Evaporation per year, mm	54	336	44	однороден / homogeneous	Однороден / homogeneous
Годовой слой стока р. НырвакиноТВЭЭМ – 6 км от устья, мм / The annual runoff layer of the Nyrvakintveem River is 6 km from the mouth, mm	55	450	167	однороден / homogeneous	Однороден / homogeneous
Годовой слой стока руч. Изыскательский – 1,6 км от устья / The annual flow layer of the stream. Izyskatelsky – 1.6 km from the mouth, mm	55	831	208	Однороден / homogeneous	однороден / homogeneous
Динамическое среднее годового слоя стока / Dynamic average of annual runoff layer	53	0,04	1,01	однороден / homogeneous	однороден / homogeneous

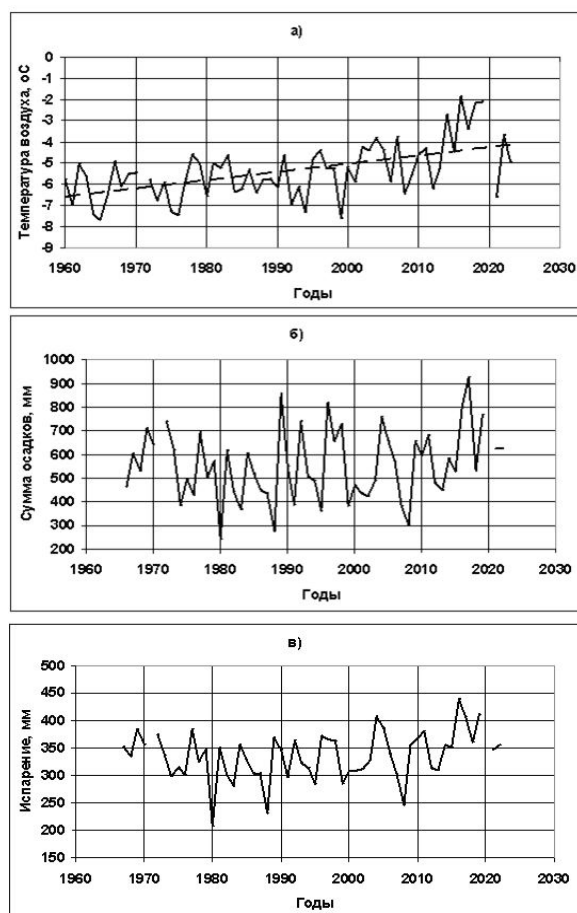


Рис. 1. Многолетние колебания

среднегодовой температуры воздуха (а), годовой суммы атмосферных осадков (б), испарения с поверхности суши за год (в)

в Эгвекиноте (пунктиром обозначена линия тренда)

Fig. 1. Long-term fluctuations of the average annual air temperature (a), annual precipitation (b), evaporation from the land surface per year (c) in Egvekinot (The trend line is drawn with a dotted line)

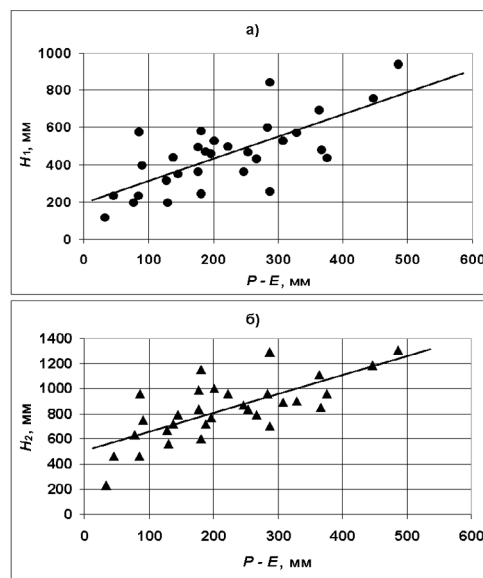


Рис. 2. Связи слоев годового стока на р. НырвакиноТВЭЭМ, 6 км от устья H_1 (а), и на ручье Изыскательский, 1,6 км от устья H_2 (б), с разностью между годовой суммой осадков и испарением за год $P-E$

Fig. 2. Connections between the layers of annual runoff on the Nyrvakintveem River – 6 km from the mouth of H_1 (a) and on the stream Izyskatelsky – 1.6 km from the mouth H_2 (b) with the difference between the annual amount of precipitation and evaporation for the year $P - E$

С использованием формул (2) и (3) были восстановлены погоди́чные величины стока с 1996 г. (руч. Изыскательский) и с 1999 г. (р. НырвакиноТВЭЭМ) по 2022 г. Для исключения систематического уменьшения дисперсии восстановленных данных вводились поправки в значения стока в соответствии с работой [8].

Ряды стока не содержат трендов (табл. 2, рис. 3).

По рядам слоев стока была рассчитана последовательность динамической средней, взвешенной по площади водосбора (рис. 3б):

$$F_i = (A_1 f_{1,i} + A_2 f_{2,i}) / (A_1 + A_2), \quad (4)$$

где i – годы; A_1, A_2 – площади водосборов р. Нырвакинотвээм – 6 км от устья и на руч. Изыскательский – 1,6 км от устья соответственно, км²; $f_{1,i}, f_{2,i}$ – слой годового стока, выраженные в стандартных отклонениях.

Такое преобразование позволяет частично убрать «белый шум» в колебаниях исследуемой величины.

Спектральный анализ показал, что динамическая средняя содержит статистически значимые гармоники на периодах 4, 6 и 7 лет (рис. 4). С вероятностью 95% можно утверждать, что многолетние колебания годового стока рассматриваемой территории соответствуют статистической модели сложной цепи Маркова [13], а значит, величина стока может быть прогнозируемой.

На основе выделенных гармоник можно получить аналитическую аппроксимацию колебаний стока следующего вида:

$$F_i^* = \tilde{F}_i + \sum_1^m (a_j \cos(2\pi(i + l_j) / T_j)), \quad (5)$$

где i – год; \tilde{F}_i – средний уровень динамической средней; m – количество гармоник; a_j – амплитуда j -й гармоники; l_j – сдвиг фазы по времени j -й гармоники; T_j – период j -й гармоники.

Определение амплитуд и фазовых сдвигов в (5) производилось по методу наименьших квадратов.

Итоговое уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$F_i^* = 0,037 + 0,646 \cos(2\pi(i - 1965)/4) + 0,352 \cos(2\pi(i - 1961)/6) + 0,394 \cos(2\pi(i - 1962)/7). \quad (6)$$

Многолетние колебания динамической средней годового стока и ее аппроксимация до 2030 г. показаны на рисунке 5.

Уравнение (6) можно рассматривать как прогностическую формулу. Обоснованность проверочных прогнозов (табл. 3) составила 61,8%, отношение среднеквадратичной ошибки прогнозов к стандартному отклонению прогнозируемого ряда $S/\sigma = 0,79$. В соответствии с [14]

$$\sigma_{\text{доп}} = 0,674\sigma, \quad (7)$$

где σ – стандартное отклонение прогнозируемого ряда.

Переход от расчетной (прогнозной) динамической средней к величине слоя стока конкретного водотока можно произвести по формуле:

$$H_i^* = F_i^* \sigma + H, \quad (8)$$

где σ, H – стандартное отклонение и норма слоя годового стока конкретного водотока, определенного по натурным данным или по рекомендациям [8].

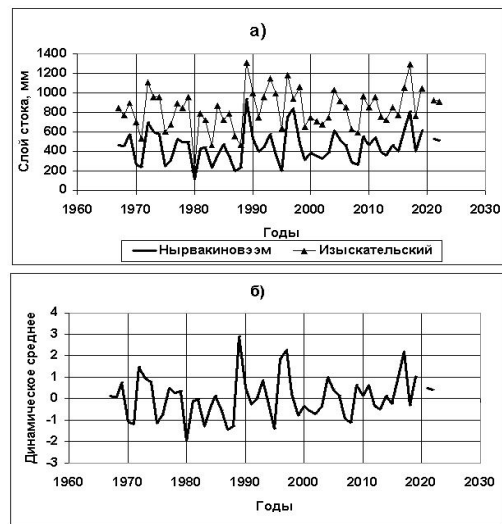


Рис. 3. Многолетние колебания слоя годового стока на р. Нырвакинотвээм, 6 км от устья, и на ручье Изыскательский, 1,6 км от устья (а), и динамической средней годового стока (б)

Fig. 3. Long-term fluctuations of the annual runoff layer on the Nyrvakinothveem River – 6 km from the mouth and on the stream Izyskatelsky – 1.6 km from the mouth (a) and the dynamic average annual runoff (b)

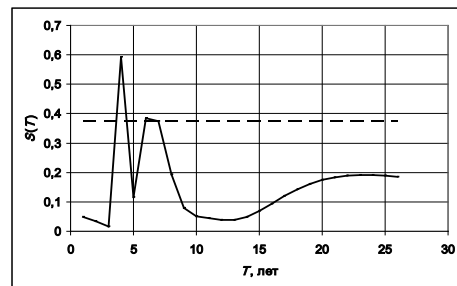


Рис. 4. Спектрограмма динамической средней годового стока рек залива Креста (пунктиром обозначен доверительный уровень 5%)

Fig. 4. Spectrogram of the dynamic average annual flow of the rivers of the Bay of the Cross (The dotted line shows the confidence level of 5%)

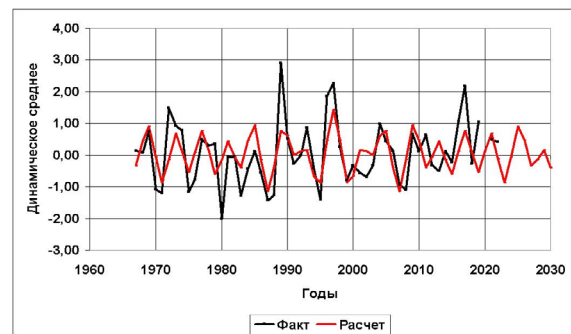


Рис. 5. Многолетние колебания динамической средней слоя годового стока рек, впадающих в залив Креста, и ее вычисленных значений

Fig. 5. Long-term fluctuations of the dynamic average layer of the annual flow of rivers flowing into the Bay of the Cross, and its calculated values

Таблица 3. Проверочные прогнозы динамической средней слоя годового стока рек залива Креста (допустимая ошибка $\sigma_{\text{доп}} = 0,68$)

Table 3. Verification forecasts of the dynamic mean layer of the annual flow of the rivers of the Bay of the Cross (permissible error $\sigma_{\text{доп}} = 0.68$)

Годы / Years	Динамическое среднее / Dynamic mean		Ошибка прогноза / Forecast error	Успешность прогноза / Forecast success
	Фактическое / actual	по прогнозу / by forecast		
1967	0,13	-0,34	0,48	Оправдался / Justified
1968	0,07	0,46	-0,38	Оправдался / Justified
1969	0,74	0,90	-0,16	Оправдался / Justified
1970	-1,07	-0,07	-1,01	Не оправдался / Not justified
1971	-1,20	-0,87	-0,33	Оправдался / Justified
1972	1,47	-0,14	1,62	Не оправдался / Not justified
1973	0,92	0,68	0,24	Оправдался / Justified
1974	0,79	0,13	0,66	Оправдался / Justified
1975	-1,16	-0,54	-0,62	Оправдался / Justified
1976	-0,76	0,08	-0,84	Не оправдался / Not justified
1977	0,50	0,75	-0,25	Оправдался / Justified
1978	0,29	0,13	0,17	Оправдался / Justified
1979	0,35	-0,61	0,97	Не оправдался / Not justified
1980	-2,00	-0,14	-1,86	Не оправдался / Not justified
1981	-0,07	0,42	-0,49	Оправдался / Justified
1982	-0,04	-0,07	0,03	Оправдался / Justified
1983	-1,28	-0,39	-0,89	Не оправдался / Not justified
1984	-0,44	0,46	-0,89	Не оправдался / Not justified
1985	0,12	0,95	-0,83	Не оправдался / Not justified
1986	-0,54	-0,14	-0,40	Оправдался / Justified
1987	-1,44	-1,14	-0,30	Оправдался / Justified
1988	-1,27	-0,40	-0,86	Не оправдался / Not justified
1989	2,91	0,75	2,15	Не оправдался / Not justified
1990	0,53	0,61	-0,08	Оправдался / Justified
1991	-0,27	-0,01	-0,26	Оправдался / Justified
1992	0,00	0,13	-0,13	Оправдался / Justified
1993	0,86	0,15	0,71	Не оправдался / Not justified
1994	-0,42	-0,67	0,25	Оправдался / Justified
1995	-1,42	-0,87	-0,54	Оправдался / Justified
1996	1,85	0,46	1,39	Не оправдался / Not justified
1997	2,27	1,43	0,84	Не оправдался / Not justified
1998	0,25	0,46	-0,21	Оправдался / Justified
1999	-0,79	-0,87	0,08	Оправдался / Justified
2000	-0,34	-0,67	0,33	Оправдался / Justified
2001	-0,56	0,15	-0,71	Не оправдался / Not justified
2002	-0,69	0,13	-0,82	Не оправдался / Not justified
2003	-0,34	-0,01	-0,33	Оправдался / Justified
2004	0,99	0,61	0,39	Оправдался / Justified
2005	0,44	0,75	-0,32	Оправдался / Justified
2006	0,13	-0,40	0,53	Оправдался / Justified
2007	-0,93	-1,14	0,21	Оправдался / Justified
2008	-1,10	-0,14	-0,95	Не оправдался / Not justified
2009	0,66	0,95	-0,29	Оправдался / Justified
2010	0,13	0,46	-0,33	Оправдался / Justified
2011	0,63	-0,39	1,02	Не оправдался / Not justified
2012	-0,32	-0,07	-0,25	Оправдался / Justified
2013	-0,50	0,42	-0,92	Не оправдался / Not justified
2014	0,12	-0,14	0,26	Оправдался / Justified
2015	-0,24	-0,61	0,37	Оправдался / Justified
2016	1,07	0,12	0,94	Не оправдался / Not justified
2017	2,19	0,75	1,44	Не оправдался / Not justified
2018	-0,28	0,08	-0,36	Оправдался / Justified
2019	1,04	-0,54	1,58	Не оправдался / Not justified
2020	-	0,12	-	-
2021	0,49	0,68	-0,19	Оправдался / Justified
2022	0,42	-0,14	0,56	Оправдался / Justified

Выводы

Анализ рядов годовых сумм осадков и испарения с поверхности суши за год на побережье залива Креста показал, что эти ряды не содержат трендов.

Для реки Нырвакиновтвээм, ручья Изыскательский установлены связи слоев годового стока с разностью между годовой суммой осадков и испарения за год. При помощи этих уравнений ряды наблюдений за стоком были удлинены. Восстановленные ряды не содержат тренда и имеют гармоники на периоде 4, 6 и 7 лет. Это позволяет сделать

Список использованных источников

1. Об утверждении схем водоснабжения и водоотведения городского округа Эгвекино. [Электронный ресурс]. URL: https://эгвекино.рф/inoва_block_documentset/document/271642/.
2. WMO statement on the status of the global climate in 2015. WMO-No. 1167. Geneva: Publications Board World Meteorological Organization, 2016. 26 p.
3. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б. и др. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7, № 1. С. 36-79. EDN: JEMWYL
4. Сточкучте Ю.В., Василевская Л.Н. Многолетние изменения температуры воздуха и почвы на крайнем северо-востоке России // Географический вестник. 2016. № 2. С. 84-96. EDN: WGBLSB
5. Makarieva O., Nesterova N., Post D.A., Sherstyukov A. and Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost, *The Cryosphere*, 2019. № 13. Pp. 1635-1659.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Северо-Восток. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. Т. 19. 282 с.
7. Основные гидрологические характеристики. Северо-Восток. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. Т. 19. 227 с.
8. СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Минстрой России, 2023. 103 с.
9. Интернет-портал Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/> (дата обращения: 12.03.2025).
10. Мезенцев В.С. Метод гидролого-климатических расчетов и опыт его применения для районирования Западно-Сибирской равнины по признакам увлажнения и теплообеспеченности // Труды ОмСХИ. 1957. Т. 27. 121 с.
11. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 247 с.
12. Шелутко В.А. Численные методы в гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 239 с.
13. Шелутко В.А. Статистические модели и методы исследования многолетних колебаний стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 160 с.
14. Наставление по службе прогнозов. Разд.3. Ч.1. Служба гидрологических прогнозов. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 193 с.

Сведения об авторе

Михаил Вилорьевич Ушаков: канд. географических наук; ORCID: 0000-0003-1731-7541, РИНЦ AuthorID68167; mvilorich@narod.ru

вывод о том, что многолетние колебания стока представляют собой сложный марковский процесс.

На основе выделенных гармоник удалось получить гармоническое уравнение для предвычисления колебаний годового стока рек залива Креста, которое обеспечивает удовлетворительное качество.

Результаты работы будут полезны при долгосрочном планировании мероприятий по снижению уровня загрязнения вод рек и залива Креста – например, при проектировании и эксплуатации очистных сооружений.

References

1. On approval of water supply and sanitation schemes for the urban district of Egvekinot. [Electronic resource]. URL: https://эгвекино.рф/inoва_block_documentset/document/271642/.
2. WMO statement on the status of the global climate in 2015. WMO-No. 1167. Geneva: Publications Board World Meteorological Organization, 2016. 26 p.
3. Gelfan A.N., Frolova N.L., Magritsky D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M. Impact of climate change on the annual and maximum flow of rivers in Russia: assessment and forecast. *Fundamental and Applied Climatology*. 2021. Vol. 7, No. 1. P. 36-79. EDN: JEMWYL
4. Stochkute Yu.V., Vasilevskaya L.N. Long-term changes in air and soil temperature in the extreme north-east of Russia. *Geographical Bulletin*. 2016. № 2. P. 84-96. EDN: WGBLSB
5. Makarieva O., Nesterova N., Post D.A., Sherstyukov A. and Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost, *The Cryosphere*, 13, 2019. P. 1635-1659.
6. Surface water resources of the USSR. V. 19. North-East. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1969. 282 p.
7. Main hydrological characteristics. V. 19. North-East. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. 1978. 227 p.
8. Code of Practice 529.1325800.2023. Definition of the Main Calculated Hydrological Characteristics. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2023. 103 p.
9. Internet portal of Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. [Electronic resource]. URL: <http://meteo.ru/data/> (12.03.2025).
10. Mezentsev V.S. Method of hydrological and climatic calculations and experience of its application for zoning of the West Siberian Plain based on moisture and heat supply characteristics. *Proceedings of Omsk Agricultural Institute*. 1957. V. 27. 121 p.
11. International guide to methods of calculating basic hydrological characteristics. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. 1984. 247 p.
12. Shelutko V.A. Numerical methods in hydrology]. (1991). L.: Gidrometeoizdat, 1991, 239 s. (in Russian)..
13. Shelutko V.A. Statistical models and methods for the study of perennial flow fluctuations. (1984). L.: Gidrometeoizdat, 160 s. (in Russian).
14. Manual for the Forecast Service. Section 3. Part I. Hydrological Forecast Service. Forecasts of the Land Water Regime. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. 1962. 193 p.

About the Author

Mikhail V. Ushakov: CSs (Geogr); ORCID: 0000-0003-1731-7541, RSCI AuthorID68167; mvilorich@narod.ru

Поступила в редакцию / Received 21.05.2025
Поступила после рецензирования / 18.02.2026
Принята к публикации / Accepted 20.02.2026

Оригинальная статья

УДК 556.3:626.811(06):574

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-98-104>

ИЗУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ИНФИЛЬТРАТОМ ТБО «ЯДРОВО» И КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО ИХ ЗАЩИТЕ

Н.П. Карпенко^{1✉}, Б.И. Корженевский², Г.Ю. Толкачев³¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова»; г. Москва, Российская Федерация^{2,3}Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук»; г. Москва, Российская Федерация¹<https://orcid.org/0000-0002-0589-3632>; npkarpenko@yandex.ru²orcid.org/0000-0001-7663-9677; 542609@list.ru³<https://orcid.org/0000-0001-6983-7106>; k-26@yandex.ru

Аннотация. Проанализировано влияние полигонов твердых бытовых отходов на экологическое состояние природной среды. Установлено, что токсические вещества промышленного и сельскохозяйственного производства, твердые бытовые отходы, хозяйственно-бытовые стоки и т.д., складываемые вблизи крупных городов, являются основными источниками загрязнения грунтовых вод. В рамках импактного гидрохимического мониторинга подземных вод проведен отбор воды из поверхностных источников и грунтовых вод, для которых выполнены химические анализы, включающие в себя определение минерализации, ионного состава и концентрации загрязняющих веществ. Выявлено, что в наблюдательных скважинах, находящихся в пределах тела свалки и за его пределами, отмечается существенное превышение содержания загрязняющих элементов в воде (выше ПДК), в которых зафиксированы такие загрязнители, как фенолы и нефтепродукты, и их превышение над ПДК варьирует от 5 до 47. Наименьшие изменения происходят по хлоридам и сульфатам, их превышение составляет немного выше 1...2 ПДК. Предложены основные превентивные мероприятия по снижению риска загрязнения грунтовых вод, к которым следует отнести природоохранные мероприятия (контурные искусственные водозащитные экраны, противодиффузионные завесы в сочетании с открытыми и закрытыми дренажными сооружениями, специальные резервуары для отвода загрязненных грунтовых вод, отвод загрязненных грунтовых вод через сборный контурный канал на поля фильтрации и т.д.).

Ключевые слова: полигоны твердых бытовых отходов, грунтовые воды, загрязняющие вещества, импактный гидрохимический мониторинг, природоохранные мероприятия

Формат цитирования: Карпенко Н.П., Корженевский Б.И., Толкачев Г.Ю. Изучение и анализ динамики загрязнения грунтовых вод инфильтратом ТБО «Ядрово» и комплекс мероприятий по их защите. Природообустройство. 2026;Т.19(2):98-104. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-98-104>

Original article

SUDY AND ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF GROUNDWATER CONTAMINATION BY THE INFILTRATION OF SOLID WASTE «YADROVO» AND A SET OF MEASURES TO PROTECT THEM

N.P. Karpenko^{1✉}, B.I. Korzhenevsky², G.Y. Tolkachev³¹Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Center of VNIIGiM named after A.N. Kostyakov»; Moscow, Russian Federation^{2,3}Federal State Budgetary Institution of Science named after E.M. Sergeev «Institute of Geoecology of the Russian Academy of Sciences»; Moscow, Russian Federation¹<https://orcid.org/0000-0002-0589-3632>; npkarpenko@yandex.ru²orcid.org/0000-0001-7663-9677; 542609@list.ru³<https://orcid.org/0000-0001-6983-7106>; k-26@yandex.ru

Abstract. The influence of landfills of solid household waste on the ecological state of the natural environment is analyzed. It has been established that toxic substances of industrial and agricultural production, solid household waste, household sewage, etc., which are stored near large cities, are the main sources of groundwater pollution. As part of the impact hydrochemical monitoring of groundwater, water was sampled from surface sources and groundwater, for which chemical analyses were performed, including determination of mineralization, ionic composition and concentrations of pollutants. It was revealed that in the observation

wells located within the landfill body and beyond, there is a significant excess of the content of pollutants in the water (above the maximum permissible concentration), in which pollutants such as phenols and petroleum products are recorded, their excess over the maximum permissible concentration varies from 5 to 47. The smallest changes occur in chlorides and sulfates, their excess is slightly above 1...2 MPC. The main preventive measures to reduce the risk of groundwater contamination are proposed, which include environmental protection measures (contoured artificial water shields, anti-filtration curtains in combination with open and closed drainage structures, special reservoirs for the discharge of contaminated groundwater, the discharge of contaminated groundwater through a collection contour channel to filtration fields, etc.).

Keywords: landfills of solid household waste, groundwater, pollutants, impact hydrochemical monitoring, environmental protection measures

Format of citation: Karpenko N.P., Korzhenevsky B.I., Tolkachev G.Y. Study and analysis of the dynamics of groundwater contamination by the infiltration of solid waste “Yadrovo” and a set of measures for their protection. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):98-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-98-104>

Введение. Подземные воды, являясь частью общих водных ресурсов, представляют собой важное полезное ископаемое, потребность использования которого для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения населения с каждым годом возрастает [1]. В условиях постоянно возрастающей нагрузки на природную среду наблюдается прогрессирующее загрязнение не только поверхностных, но и подземных вод. Особую опасность для окружающей природной среды представляют отходы различных отраслей народного хозяйства и ряда производств, в которых содержатся токсические вещества промышленного и сельскохозяйственного производства, твердые бытовые отходы, хозяйственно-бытовые стоки и т.д. и которые складываются вблизи мегаполисов и крупных городов.

Экологическая ситуация может существенно осложниться по причине не только большого количества и видов загрязнителей, но и совместного действия ряда факторов и нелинейности происходящих природно-антропогенных процессов. При этом могут происходить различные эффекты усиления или подавления (синергизма или антагонизма). В результате такого сложного

взаимодействия могут образовываться более устойчивые формы соединений, что может привести к серьезным экологическим проблемам [2].

Под влиянием высокого антропогенного пресса на окружающую среду загрязнению подвергаются все компоненты природной среды: атмосферный воздух, поверхностные водные ресурсы, почвенный покров и подземные воды, а также человек. Следует отметить, что именно складирование полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) является не только дестабилизирующим фактором экологической обстановки, но и мощным источником загрязнения всех компонентов природной среды [3].

Цель исследований: анализ источников возможного ухудшения качества подземных вод в зонах расположения полигонов твердых бытовых отходов и разработка превентивных мер по их снижению.

Материалы и методы исследований. В качестве объекта научных исследований был выбран полигон твердых бытовых отходов (ТБО) «Ядрово», расположенный на западе г. Москвы в Волоколамском районе (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Территория полигона «Ядрово»:

а) спутниковый снимок; б) рекультивация полигона в настоящее время

Fig. 1. Territory of the Yadrovo test site

а) satellite imagery б) current reclamation of the landfill

Полигон «Ядрово» в течение длительного времени принимал твердые бытовые отходы из городов Истра и Дедовск, а также из районов Южное Тушино, Строгино, Крылатского. В настоящее время площадь полигона (по данным спутниковым снимкам) составляет около 100 тыс. м², а мощность полигона превысила 200 тыс. т в год.

Складирование промышленных, строительных и других отходов на полигоне началось в 2008 г., однако, как показали публикации в СМИ, было выявлено значительно число нарушений, связанных с неправильной организацией и высокой нагрузкой полигона, в том числе с несоответствием санитарно-эпидемиологическим нормам. Проведенные Министерством природных ресурсов Подмосковья контрольные обследования в зоне влияния полигона «Ядрово» показали значительные превышения предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ по многим показателям. В частности, концентрация сероводорода в приземном слое атмосферы была превышена в 8...15 раз. Начиная с 2020 г. все городские свалки в Московской области закрыты [4].

В структурно-тектоническом и геологическом отношении данный регион относится к Русской платформе. Платформенный чехол состоит из отложений юрской системы (верхний отдел) и каменноугольной системы (средний отдел). Юрские отложения представлены черными глинами, песками с включениями фосфоритов, а в состав каменноугольных отложений входят известняки и доломиты. В гидрогеологическом отношении в районе широко распространен Подольско-Мячиковский водоносный горизонт, а основными водовмещающими породами являются трещиноватые известняки и доломиты каменноугольной системы.

В настоящее время в пределах расположения территории полигона «Ядрово» осуществляется периодические пробы почв и грунта, а также выполняется контроль за многолетней динамикой гидрохимических показателей поверхностных вод, водных объектов, подземных вод в теле свалки включая прилегающую к полигону область.

В отобранных пробах грунтовых и поверхностных вод определялось содержание аммиака, нитритов, нитратов, гидрокарбонатов, кальция, хлоридов, железа, сульфатов, лития, ХПК, БПК, органического углерода, рН, магния, кадмия, хрома, цианидов, свинца, ртути, мышьяка, меди, бария, сухого остатка. Пробы также исследовались на гельминтологические и бактериологические

показатели. Были сформированы следующие приоритетные контролируемые показатели: кислотность почв, содержание растворимых солей в водной вытяжке (хлорид, сульфат, карбонат, гидрокарбонат, кальций-магний), содержание тяжелых элементов, нефтепродуктов, рН грунтовых вод, концентрация сульфат-иона в природных водах, концентрация гидрокарбонатов в пробах природных вод, массовая концентрация нефтепродуктов в пробах природных вод. Оценка степени загрязнения проб осуществлялась исходя из сопоставления содержания основных загрязнителей с их фоновыми значениями, а также с учетом их предельно-допустимых концентраций (ПДК).

Результаты и их обсуждение. Для решения поставленной задачи и оценки динамики загрязнения грунтовых вод в зоне расположения ТБО «Ядрово» необходимо было разработать принципы организации и импактного гидрохимического мониторинга подземных вод, который представляет собой систему [5]:

- регулярных наблюдений за подземными водами, а также отдельными компонентами окружающей, в том числе компонентами геологической среды, в границах влияния полигона твердых бытовых отходов;
- контроля и регистрации наблюдаемых контролируемых и приоритетных показателей и обработки полученной информации;
- оценки пространственно-временных изменений состояния подземных вод и связанных с ними компонентов окружающей природной среды на основе полученных в процессе наблюдений данных;
- прогнозирования риска изменения состояния подземных вод под влиянием точечных источников загрязнения.

Для решения поставленной задачи были разработаны импактный мониторинг подземных вод и его структурно-технологическая схема (рис. 2).

Для анализа воздействия полигона «Ядрово» на окружающую среду специалистами Министерства экологии и природопользования Подмосковья были проведены мониторинговые обследования по выявлению загрязняющих веществ в грунтовых водах. В рамках этого обследования в пределах зоны полигона и за его пределами из наблюдательных скважин отбирались пробы воды на химический анализ и выполнялись контрольные замеры, в ходе которых было выявлено значительное превышение предельно-допустимых концентраций по отдельным загрязнителям [6].

При мониторинговых обследованиях состояния грунтовых вод по трем наблюдательным скважинам были изучены и проанализированы следующие гидрохимические показатели: хлориды, сульфаты, железо, марганец, свинец, медь, кадмий, ртуть, аммоний, нефтепродукты и фенолы. Скважина № 1 и скважина № 2 располагаются непосредственно в пределах зоны полигона, а скважина № 3 находится в овраге за пределами тела полигона.

Динамика гидрохимических показателей грунтовых вод по скважинам на территории полигона «Ядрово» за 2016-2019 гг. представлена в таблицах 1-3.

Анализ представленных таблиц динамики гидрохимических показателей грунтовых вод, выполненный за период наблюдений 2016-2019 гг., позволил выявить следующие общие закономерности их изменения.

Наибольшее превышение содержания загрязняющих элементов в воде (выше ПДК)

происходит по скважинам № 1 и № 2, в которых зафиксированы такие загрязнители, как фенолы и нефтепродукты; их превышение над ПДК варьирует от 5 до 47. Значительные превышения наблюдаются также по железу, меди и свинцу. Наименьшие изменения происходят по хлоридам и сульфатам; их превышение составляет немного выше 1...2 ПДК. Загрязнение грунтовых вод такими элементами, как марганец, кадмий и ртуть, не фиксируется.

По скважине № 3, которая находится вне полигона, произошли наименьшие изменения по гидрохимическим показателям. Тем не менее радиус влияния распространения загрязняющих элементов проявляется за пределами зоны полигона, в которых обнаружены их превышения в 5...10 раз выше ПДК. Это связано с тем, что вертикальная миграция углеводородов имеет сложный струйный характер и может осуществляться в различных формах. На границе смыкания насыщенной и ненасыщенной зон

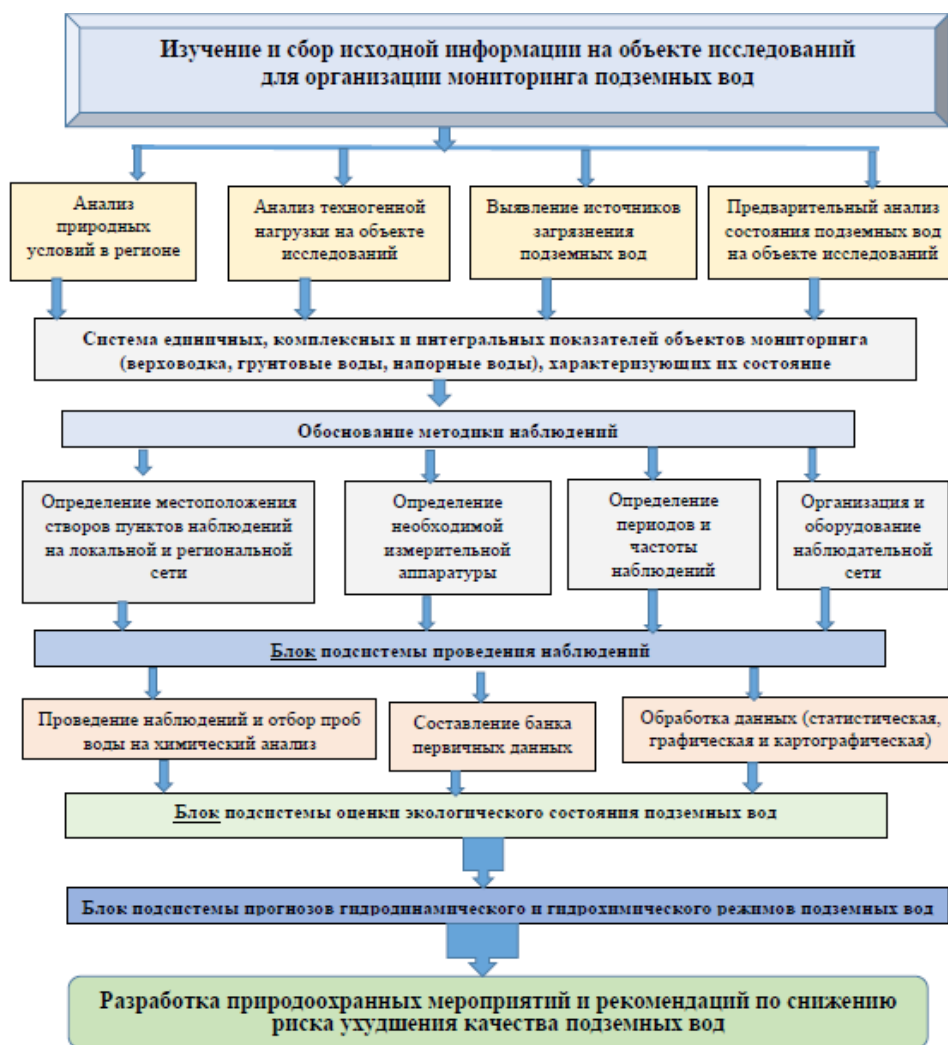


Рис. 2. Структурно-технологическая схема импактного гидрохимического мониторинга подземных вод

Fig. 2. Structural and technological scheme of impact hydrochemical monitoring of groundwater

Таблица 1. Динамика гидрохимических показателей грунтовых вод по наблюдательной скважине № 1

Table 1. Dynamics of hydrochemical indicators of groundwater for observation well No 1

Загрязняющие элементы, мг/л / Polluting elements, mg/l	ПДК, мг/л / MPC, mg/l	Годы наблюдений / Years of observation			
		2016	2017	2018	2019
Хлориды / Chlorides	100	314	418	206,52	200
Сульфаты / Sulfates	100	136	174	149	125
Железо / Iron	3,0	0,01	0,011	0,016	0,02
Марганец / Manganese	0,1	0,016	0,016	0,016	0,016
Аммоний / Ammonium	1,2	2,39	1,92	2,46	2,3
Медь / Copper	1,0	0,004	0,0032	0,0054	0,006
Свинец / Lead	0,03	0,0021	0,0025	0,003	0,003
Кадмий / Cadmium	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ртуть / Mercury	0,005	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Нефтепродукты / Petroleum products	0,01	0,3	0,3	0,12	0,09
Фенолы / Phenols	0,001	0,001	0,001	0,0021	0,006

Таблица 2. Динамика гидрохимических показателей грунтовых вод по наблюдательной по скважине № 2

Table 2. Dynamics of hydrochemical indicators of groundwater for observation well No 2

Загрязняющие элементы, мг/л / Polluting elements, mg/l	ПДК, мг/л / MPC, mg/l	Годы наблюдений / Years of observation			
		2016	2017	2018	2019
Хлориды / Chlorides	100	87	65	58	50
Сульфаты / Sulfates	100	91	80	80	77
Железо / Iron	3,0	0,01	0,011	0,016	0,02
Марганец / Manganese	0,1	0,29	0,28	0,29	0,29
Аммоний / Ammonium	1,2	1,14	1,1	1,1	0,81
Медь / Copper	1,0	0,001	0,001	0,002	0,003
Свинец / Lead	0,03	0,004	0,004	0,006	0,007
Кадмий / Cadmium	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Ртуть / Mercury	0,005	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Нефтепродукты / Petroleum products	0,01	0,47	0,33	0,3	0,28
Фенолы / Phenols	0,001	0,002	0,006	0,006	0,008

Таблица 3. Динамика гидрохимических показателей грунтовых вод по наблюдательной скважине № 3

Table 3. Dynamics of hydrochemical indicators of groundwater for observation well No 3

Загрязняющие элементы, мг/л / Polluting elements, mg/l	ПДК, мг/л / MPC, mg/l	Годы наблюдений / Years of observation			
		2016	2017	2018	2019
Хлориды / Chlorides	100	230	199,9	140,0	109,0
Сульфаты / Sulfates	100	134	131	126	124,0
Железо / Iron	3,0	11,5	13,8	14,3	17,8
Марганец / Manganese	0,1	4,1	3,9	4	4,19
Аммоний / Ammonium	1,2	1,0	1,0	2,21	3,4
Медь / Copper	1,0	0,002	0,002	0,002	0,002
Свинец / Lead	0,03	0,006	0,0068	0,007	0,010
Кадмий / Cadmium	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Ртуть / Mercury	0,005	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Нефтепродукты / Petroleum products	0,01	0,42	0,3	0,29	0,26
Фенолы / Phenols	0,001	0,002	0,006	0,007	0,010

происходит формирование загрязненной линзы, в которой отмечается избыточное содержание нефтепродуктов. Как правило, мощность такой

линзы определяется гидрогеологическими и гидравлическими условиями, геофильтрационными свойствами пород зоны аэрации, интенсивностью

поступления органических соединений, плотностью самих углеводородов и их фракциями.

Для защиты природной среды и, в частности, грунтовых вод от воздействия инфильтрата полигона необходимо составить прогноз его влияния. Несмотря на то, что негативное воздействие полигона осуществляется в течение длительного периода времени, опасность его воздействия связана с геоэкологическим риском, минимизация которого зависит от разработки и реализации комплекса мероприятий по защите компонентов природной среды. В составе этого комплекса следует предусмотреть не только разработку технического и технологического оформления полигона, но и гидрохимический мониторинг грунтовых вод, мероприятия по защите грунтовых вод от загрязнения.

Возможный экологический ущерб, который наносится окружающей среде, связан с образованием биогаза, который образуется в толще свалки, а также с образованием инфильтрата, который совместно с атмосферными осадками вертикальными потоками проникает в грунтовые воды, формируя мощный очаг сосредоточенного загрязнения [7, 8].

Снижение загрязнения грунтовых вод в районе размещения полигона ТБО «Ядрово» представляется возможным за счет организации и проведения природоохранных мероприятий, которые позволяют существенно снизить риск загрязнения грунтовых вод. К основным превентивным мероприятиям, позволяющим снизить степень загрязнения грунтовых вод, которые имеют первостепенное значение, следует отнести природоохранные и нормативно-правовые меры. Так, для санитарной защиты подземных вод от загрязнения инфильтрата полигона необходимо предусмотреть водозащитные мероприятия по созданию искусственных барьеров (специальных конструктивных элементов и защитных экранов), которые совместно с системой сбора и удаления фильтрата (дренажной системы) позволяют снизить риски поступления загрязнения в водоносные горизонты.

В составе *водозащитных природоохранных мероприятий* следует предусмотреть [9]:

- установку контурных противofiltrационных водозащитных экранов, которые устраиваются на поверхности отходов при завершении эксплуатации полигона;

Список использованных источников

1. Карпенко Н.П. Геоэкологический мониторинг в задачах рекультивации земель на полигонах ТБО // Труды XIX Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». М.: РГГУ. 2011. С. 296-299.
2. Карпенко Н.П. Проблемы экологической безопасности крупных городов и мегаполисов // Труды международной

- установку водозащитных экранов, которые устраиваются в основании тела свалочного грунта;

- установку противofiltrационных экранов (завес) в сочетании с открытыми и закрытыми дренажными сооружениями;

- установку и оборудование специальных резервуаров, позволяющих отвести загрязненную грунтовую воду за пределы полигона;

- удаление необходимого объема загрязненных грунтовых вод из специально оборудованных скважин, которые подлежат герметизации ствола выше водоносного горизонта;

- отвод загрязненных грунтовых вод через специально оборудованный сборный канал за пределы полигона или на поля фильтрации.

При обосновании *нормативно-правовых мероприятий* следует исходить из действующих федеральных законов, кодексов, СНиПов, СанПиНов и т.д., в которых содержатся принципы относительно регулирования в сфере охраны окружающей среды и требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов с целью предотвращения риска загрязнения окружающей среды [10-14].

Выводы

Увеличение количества отходов промышленного производства, сельскохозяйственного и коммунального сектора и складирование их на полигонах ТБО негативно отражается на экологическом состоянии окружающей среды. Проведенные мониторинговые исследования гидрохимических показателей показали, что источником загрязнения окружающей среды по многим ее компонентам является полигон «Ядрово». Выявлено значительное увеличение концентрации загрязняющих веществ по наблюдательным скважинам, в которых содержание сульфатов, хлоридов, ионов аммония, нефтепродуктов и фенолов превышает ПДК от 7 до 47 раз. Разработана структурно-технологическая схема импактного мониторинга подземных вод в зоне влияния полигона ТБО, представляющая собой систему наблюдений, контроля, оценки состояния и прогнозного тренда состояния приоритетных показателей. Предложен комплекс превентивных мер по снижению риска загрязнения грунтовых вод, в которых первостепенное значение имеют искусственные природоохранные (водозащитные) и нормативно-правовые мероприятия.

References

1. Karpenko N.P. Geoecological monitoring in the tasks of land reclamation at landfills. Proceedings of the XIX International Conference «Safety management problems of complex systems». Moscow: RGGU. 2011. P. 296-299.
2. Karpenko N.P. Problems of environmental safety of large cities and megacities. – Proceedings of the international scientific

научной конференции «Проблемы регионального и муниципального управления». М.: РГГУ. 2012. С. 258-263.

3. Карпенко Н.П. Геоэкологический мониторинг в природопользовании: учебное пособие. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. 2020. 150 с.

4. Тагаева Т.О., Казанцева Л.К., Коржубаева А.А. Система управления отходами производства потребления в России // Экологический вестник России. 2016. № 6. С. 36-41. EDN: VZYMTN

5. Манукьян Д.А., Карпенко Н.П. Теория и методология ведения мониторинга техноприродных систем: монография. М.: МГУП. 2009. 307 с. EDN: QKSIRP

6. [Электронный ресурс] <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/29573> (дата обращения 09.12.2025).

7. Кудинов В.Н. Дегазация и рекультивация земель, нарушенных свалками и полигонами твердых бытовых отходов // Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 2002. 20 с.

8. Сметанин В.И., Соломин И.А., Соломина О.И. Учебное пособие по курсовому проектированию: проект полигона захоронения твердых бытовых отходов. М.: МГУП. 2006. 68 с.

9. Ведяшкин А.С., Ахмедова Н.Р. Разработка способа защиты грунтовых вод от загрязнения в местах складирования твердых отходов // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 300. С. 200-201.

10. СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества». М.: Минздрав России. 2002. 103 с.

11. СанПиН 2.1.3684-21 «Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов». М.: Минздрав России. 7 с.

12. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 08.08.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025). М.: Правительство РФ. 51 с.

13. Федеральный закон № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (введ. 2002-01-10). М.: Правительство РФ. 2002. 33 с.

14. Федеральный закон № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (ред. 04.08.2023). М.: Правительство РФ. 1998. 76 с.

Сведения об авторах

Нина Петровна Карпенко, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова»; <https://orcid.org/0000-0002-0589-3632>; SPIN-код: 3054-6462, PИИИЦ AuthorID: 532745; WOS Research ID AAD-9045-2022; Scopus Author ID: 57205643378; npkarpenko@yandex.ru

Борис Игоревич Корженевский, канд. геолого-мин. наук, ведущий научный сотрудник, ИГЭ РАН им. Е.М. Сергеева; <https://orcid.org/0000-0001-7663-9677>; 542609@list.ru

Глеб Юрьевич Толкачев, канд. географических наук, ведущий научный сотрудник, ИГЭ РАН им. Е.М. Сергеева; <https://orcid.org/0000-0001-6983-7106>; k-26@yandex.ru

Вклад авторов

Н.П. Карпенко – общее руководство, методология построения статьи, введение, результаты исследований, выводы
Б.И. Корженевский – обработка гидрохимических данных по полигону
Г.Ю. Толкачев – разработка водозащитных мероприятий

Конфликт интересов / Criteria of authorship

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received 10.12.2025

Поступила после рецензирования / Received 14.04.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 17.04.2026

conference «Problems of regional and municipal management». M.: RGGU. 2012. P. 258-263.

3. Karpenko N.P. Geoecological monitoring in nature management: a textbook. – M.: RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev. 2020. 150 p.

4. Tagaeva T.O., Kazantseva L.K., Korzhubaeva A.A. Waste management system of production and consumption in Russia // Ecological Bulletin of Russia. – 2016. No. 6. P. 36-41. EDN: VZYMTN

5. Manukyan D.A., Karpenko N.P. Theory and methodology of monitoring technoprirodnye systems: monograph. M.: MGUP. 2009. 307 p. EDN: QKSIRP

6. [Electronic resource] <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/29573> (accessed 09.12.2025).

7. Kudinov V.N. Degassing and reclamation of lands disturbed by landfills and landfills of solid household waste. – Abstract for the degree of candidate of technical Sciences. M.: 2002. 20 p.

8. Smetanin V.I., Solomin I.A., Solomina O.I. Textbook on course design: project of a landfill for solid household waste disposal. Moscow: MGUP. 2006. 68 p.

9. Vedyashkin A.S., Akhmedova N.R. Development of a method for protecting groundwater from pollution in solid waste storage areas // Bulletin of Tomsk State University. 2010. No. 300. P. 200-201.

10. SanPiN 2.1.4.1074-01 «Drinking water and water supply in populated areas. Drinking water. Hygienic requirements for the water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control» M.: Ministry of Health of Russia. 2002. 103 p.

11. SanPiN 2.1.3684-21 «Hygienic requirements for the design and maintenance of landfills for solid household waste». – Moscow: Ministry of Health of Russia. 7 p.

12. The Water Code of the Russian Federation dated 06/03/2006 No. 74-FZ (as amended on 08/08/2024) (as amended and supplemented, intro. effective from 01.01.2025). Moscow: Government of the Russian Federation. 51 p.

13. Federal Law, No. 7-FZ «On Environmental Protection» (introduction. 2002-01-10). – Moscow: Government of the Russian Federation. 2002. 33 p.

14. Federal Law, No. 89-FZ «On Production and Consumption of Waste» (as amended on 08/04/2023). Moscow: Government of the Russian Federation. 1998. 76 p.

About the authors

Nina P. Karpenko, D.Ss (Tech), associate professor, leading researcher, Federal Research Center VNIIGiM named after A.N. Kostyakov; <https://orcid.org/0000-0002-0589-3632>; SPIN-code: 3054-6462, RSCI AuthorID: 532745; WOS Research ID AAD-9045-2022; Scopus Author ID: 57205643378; npkarpenko@yandex.ru

Boris I. Korzhenevsky, CSs (Geol-min), leading researcher, IgHE RAS named after E.M. Sergeev; <https://orcid.org/0000-0001-7663-9677>; 542609@list.ru

Gleb Yu. Tolkachev, CSs (Geogr), leading researcher, E.M. Sergeev Institute of State Economics of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0000-0001-6983-7106>; k-26@yandex.ru

Contribution of the authors

N.P. Karpenko – general guidance, methodology for constructing the article, introduction, research results, conclusions
B.I. Korzhenevsky – processing of hydrochemical data on the test site
G.Y. Tolkachev – development of water protection measures

Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация

Оригинальная статья

УДК 630.431

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-105-113>



СПЕЦИФИКА УЧЕТА ПОЖАРОВ НА ЗЕМЛЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В РОССИИ И МЕРЫ ПО УМЕНЬШЕНИЮ УЩЕРБА ОТ НИХ

А.В. Брюханов^{1,2✉}, Г.А. Демиденко², С.В. Жила¹

¹ Институт леса имени В.Н. Сукачёва – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИЛ СО РАН); Красноярский край, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет» (КрасГАУ); Красноярский край, г. Красноярск, Российская Федерация

^{1,2} bryukhanov1975@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-0035-9377

² demidenkoekos@mail.ru; ORCID: 0000-0001-9268-585X

¹ new_science@bk.ru ORCID ID: 0009-0008-4130-9094

Аннотация. Цель исследований – оценка особенностей учета пожаров на землях сельскохозяйственного назначения в России за последнюю четверть века, а также мероприятий по снижению угрозы от очагов горения, рекомендации в части совершенствования учета пожаров и улучшения организации профилактических противопожарных мероприятий в аграрном секторе. Для оценки ситуации использовалась открытая ведомственная отчетность МЧС России. Выявлено, что в 2021-2024 гг. в РФ фиксировалось ежегодно около 200 тыс. случаев пожаров на сельскохозяйственных землях, однако их площадные значения в официальной статистике не фигурировали, прежде всего – ввиду сложности их корректной фиксации. Определено, что в настоящее время есть достаточно действенные меры для снижения уровня природной и антропогенной пожарной опасности на данных землях. Среди них наиболее эффективные – ограничение использования открытого огня, снижение запасов горючих материалов и контроль за существующими заброшенными земельными участками. Отмечена необходимость организации единой системы сбора и обработки статистической информации, прежде всего – путем заполнения карточки на каждый пожар, возникающий на сельхозугодьях, так, как это делается в лесном фонде, землях ООПТ, в населенных пунктах и объектах.

Работа выполнена при поддержке госзадания ИЛ СО РАН КНЦ СО РАН № FWES -2024-0007, Рег. НИОКТР № 124012900559-4

Ключевые слова: сельскохозяйственные земли, ландшафтные пожары, пожарная опасность, пожарные риски, пожары на землях сельскохозяйственного назначения, природные пожары, горючие материалы

Формат цитирования: Брюханов А.В., Демиденко Г.А., Жила С.В. Специфика учета пожаров на землях сельскохозяйственного назначения в России и меры по уменьшению ущерба от них. Природообустройство. 2026;Т.19(2):105-113. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-105-113>

Original article

SPECIFICITY OF ACCOUNTING FOR FIRES ON AGRICULTURAL LANDS IN RUSSIA AND MEASURES TO REDUCE DAMAGE FROM THEM

A.V. Bryukhanov^{1,2✉}, G.A. Demidenko², S.V. Zhila¹

¹V.N. Sukachev Institute of Forest of the Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian; Branch of the Russian Academy of Sciences” (V.N. Sukachev Institute of Forest KSC SB RAS), Krasnoyarsk, Russia

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Krasnoyarsk State Agrarian University” (FSBEI HE Krasnoyarsk SAU)

^{1,2}bryukhanov1975@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-0035-9377

²demidenkoekos@mail.ru; ORCID: 0000-0001-9268-585X

¹new_science@bk.ru ORCID ID: 0009-0008-4130-9094

Abstract. The aim of the study was to assess the fire records on agricultural lands in Russia over the past quarter century, as well as measures to reduce the threat posed by fires, to make recommendations regarding improving fire accounting and improving the organization of preventive fire prevention measures in the agricultural sector. Open departmental reporting from the Russian Ministry of Emergency Situations was used to assess the situation. In 2021-2024, about 200 thousand cases of fires on agricultural lands were recorded annually in Russian Federation, but their area values do not appear in official statistics, primarily due to the difficulty of their correct recording. It has been determined that currently there are sufficiently effective measures to reduce the level of natural and anthropogenic fire danger on these lands, among which the most effective will be the restriction of the use of open fire and control over existing abandoned agricultural lands. It was noted that there is a need to organize a unified system for collecting and processing statistical information, primarily by filling out a card for each fire that occurs on agricultural lands, as this is done in the forest fund, protected areas, settlements and facilities.

Keywords: agricultural lands, landscape fires, fire hazard, fire risks, agricultural fires, wildfires, fuels

Format of citation: Bryukhanov A.V., Demidenko G.A., Zhila S.V. The specifics of accounting for fires on agricultural lands in Russia and measures to reduce damage from them. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):105-113. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-105-113>

Введение. Природные (ландшафтные) пожары являются одними из самых распространенных случаев введения чрезвычайных ситуаций во многих странах мира включая Россию [1]. Эти термины объединяют понятия, означающие пожары, распространяющиеся не только по лесам, степям, тундрам и болотам, но и на землях сельскохозяйственного назначения [2].

Пожары в садах, на плантациях, лугах, пастбищах, сенокосах и пашнях также часто специалисты МЧС называют «площадными пожарами» (в законодательстве термин не утвержден), так как площади их горения значительны и измеряются гектарами. Ученые и практики лесного пожаротушения используют более детальные классификации подобных пожаров, детализирующие не только информацию о площади, типе и интенсивности горения, виде горючих материалов, но и оценку потенциальной угрозы от них и другие характеристики.

Актуальность исследований обусловлена прежде всего тем, что в мировом списке угроз для агропромышленного комплекса пожары стабильно находятся в тройке основных причин наряду

с наводнениями и засухами. Согласно отчету Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН «Воздействие бедствий на сельское хозяйство и продовольственную безопасность», выпущенному в 2024 г. [1], в 2023 г. самый значительный ущерб аграриям был причинен наводнениями (16%), далее – все виды пожаров (13%) и засухи (12%). Фактически можно констатировать, что ежегодные потери от огня и задымления превышают, например, такие категории ущерба, как урон от болезней и вредителей для сельскохозяйственных растений и животных.

Научная новизна исследований заключается в том, что были проанализированы особенности учета пожаров на землях сельскохозяйственного назначения в России, а также имеющийся спектр основных мероприятий для снижения уровня пожарной опасности на этих территориях.

Цель исследований: оценка особенностей учета пожаров на землях сельскохозяйственного назначения в России за последнюю четверть века, а также мероприятий по снижению угрозы от очагов горения, рекомендации в части совершенствования учета пожаров и улучшения

организации профилактических противопожарных мероприятий в аграрном секторе.

Исследования выполнены на основе анализа данных из официальной отчетности, научных публикаций, нормативных правовых актов (НПА) и средств массовой информации (СМИ) с перепроверкой достоверности, а также собственных исследований авторов на базе филиала ФБУ ВНИИЛМ «Центр лесной пирологии», ИЛ СО РАН и Института агроэкологических технологий ФГБОУ ВО КрасГАУ в г. Красноярске.

Материалы и методы исследований.

В работе представлен анализ статистических данных из отчетов ФБУ ВНИИПО ГПС МЧС России «Пожары и пожарная безопасность», отражающий специфику учета пожаров на землях сельскохозяйственного назначения в России с 2001 по 2024 гг. [3-7], а также информации из официальной отчетности МЧС России и МСХ России и профильной научной литературы.

В работе не учитывали пожары, которые фиксировались на сельскохозяйственной технике, так как задачей исследований была оценка очагов горения, только «привязанные» к конкретной местности.

Особенности учета пожаров на землях сельскохозяйственного назначения в России. Статистика учета пожаров на землях сельскохозяйственного назначения в нашей стране имеет «объектовую» структуру, принятую в МЧС России [8]. Это означает, что пожары фиксируются, когда произошли на каком-то объекте, с конкретными границами данного «объекта»: определенное строение, место хранения сельскохозяйственной продукции, поле с поспевшим урожаем или даже техника и оборудование.

Одним из основных методов исследований является оперативный мониторинг, прежде всего – с использованием дистанционных методов: космического (спутниковый) и авиационного (пилотируемый и беспилотный). До широкого внедрения спутникового мониторинга многие пожары на этих землях (если они не привели к какому-то значимому ущербу) практически не фиксировались. Сейчас в статистику попадает большинство пожаров, причем и с учетом выжиганий (официально они были запрещены на территории РФ только с 2015 г.) [9]. Это привело к тому, что если ранее на «сельхозугодьях, открытых складах и прочих открытых территориях» и в целом для Российской Федерации фиксировалось в среднем от 2 до 3 тыс. пожаров в год (остальные идентифицировались обычно как «целевые палы» различного назначения), то за последние 20 лет их количество увеличилось

практически на два порядка, превышая в 2021-2024 гг. ежегодно 200 тыс. случаев. Как сказано выше, это частично связано с укрупнением «категории», однако решающим фактором стало более широкое применение дистанционных методов фиксации возгораний и пожаров. Данное совершенствование мониторинга пожарной ситуации было обусловлено широким внедрением в современный пожарный мониторинг информации, поступающей в первую очередь со спутников, пилотируемой авиации, а в некоторых случаях – и с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

На основе материалов ежегодных Информационно-аналитических сборников «Пожары и пожарная безопасность», выпускаемых ФБУ ВНИИПО ГПС МЧС России, был подготовлен график распределения количества пожаров в агропромышленном секторе России с 2001 по 2023 гг. (рис. 1) [3-7].

Из отчетов ФБУ ВНИИПО следует, что по количеству пожаров на различных объектах агропромышленного комплекса за последнюю четверть века фиксируется устойчивое снижение пожаров в строениях, в зданиях сельскохозяйственного назначения. Фактически количество таких пожаров с 2001 г. снизилось в два раза на землях городов и в три раза – на землях сельских поселений. Относительно «благополучным» в этом отношении был 2024 г. – последний, вошедший в статистику на время исследований, когда суммарно было зафиксировано только 270 случаев пожаров в зданиях и сооружениях агропромышленного комплекса (22 случая в городах, 248 случаев в сельской местности).

Результаты и их обсуждение. Общую пройденную огнем площадь на землях сельскохозяйственного назначения для нашей страны сложно оценить, так как этих данных нет в официальной статистике. Если пожар не привел к конкретному материальному ущербу, то в предыдущие годы его зачастую просто не фиксировали. Сейчас же они попадают в учет как случившийся факт, без дополнительной детализации. Современные спутники, оснащенные мощными тепловыми радиометрами, редко пропускают термоточки, даже если в момент их пролета горение занимает несколько десятков квадратных метров. Однако оценить точно площадь пожара на малых очагах (менее нескольких гектаров) они не могут, а наземное обследование или с помощью БПЛА и спутников высокого разрешения зачастую проводится не всегда. Соответственно фактически территории, пройденные пожарами на сельскохозяйственных землях, обычно оцениваются, только если пострадали посеы или



Рис. 1. Количество пожаров в аграрном секторе России с 2001 по 2024 гг.

Fig. 1. The number of fires in the agrosector of Russia from 2001 to 2024 y.

посадки сельскохозяйственных растений, и через пройденную огнем площадь необходимо рассчитать потерянный урожай или понять, в какую стоимость обойдется восстановление сгоревшего сада, плантации, виноградника и т.д.

Кроме того, есть и другие сложности, связанные с оценкой площадных характеристик пожаров на сельскохозяйственных землях, – например, по спутниковым снимкам. Специалисты из Института космических исследований РАН [10] отмечают, что при картировании данных площадей, пострадавших от пожаров, обычно отмечается низкая точность их выделения (пропускается до 80-90%). Вероятными причинами такой невысокой точности площадных оценок авторы данной статьи считают то, что пожары на землях в аграрном секторе, как правило, весьма небольшие и имеют высокую скоротечность. Это может приводить к их пропуску, а также есть сложность в достаточно сходных с последствиями пожаров изменений (в спектральных характеристиках), вызванных распашкой или уборкой урожая, что становится причиной ложного срабатывания алгоритмов картографирования гарей.

Второй проблемой остаются случаи выхода из-под контроля сельскохозяйственных выжиганий. До 2014 г. в нашей стране региональные специалисты лесопожарных служб в качестве причины пожаров могли объяснять, что это «...в результате проводимого сельскохозяйственными предприятиями выжигания травы». С 2015 г., после вступления в силу приказа Минприроды России от 6 августа 2015 г. № 347

«Об утверждении Методических указаний по заполнению форм сведений о пожарной опасности в лесах и лесных пожарах» [11], данная причина была заменена на категорию: «От выжигания сухой травянистой растительности». Также зачастую пожары, возникающие от сельскохозяйственных палов, могут частично попадать и в другие категории причин, которые за последнюю четверть века не менялись: «Лесной пожар перешел с земель иных категорий»; «От местного населения» и «По невыясненным причинам».

По данным космического мониторинга, в последние годы в России фиксировалось ежегодно около 200 тыс. случаев площадных пожаров на землях сельскохозяйственного назначения (рис. 1). Можно предположить из расчета: если даже один пожар в среднем будет иметь площадь около 5 га, то суммарная площадь, ежегодно проходимая огнем, может достигать 1 млн га. Точная информация о площадных характеристиках в настоящее время в официальной статистике пока не фиксируется, а экспертные оценки могут сильно различаться.

Влияние различных факторов на специфику пожарной ситуации на сельскохозяйственных землях. По данным Росреестра, опубликованного в 2020 г., за организациями и гражданами числилось более 193 млн га сельхозугодий, при этом всего в России было 222 млн га таких земель, однако не использовалось из них почти 100 млн га [12]. Многие из этих земель зарастают травянистой и древесно-кустарниковой растительностью, и наибольшую пожарную опасность

представляет хвойные молодняки с напочвенным покровом из злаковых трав. Территории эти, как правило, недостаточно охраняются от пожаров, а огонь распространяется по таким открытым пространством с большой скоростью.

Сельскохозяйственные земли, когда находятся в использовании, в большинстве случаев являются достаточно устойчивыми к распространению пожаров, но как только они лишаются ухода, ситуация начинает постепенно меняться. Как показывают наблюдения авторов и других исследователей, уже через 1-2 года заброшенные пашни, луга и сенокосы начинают зарастать сорной травянистой растительностью, образующей большое количество пожароопасной травяной ветоши (отмершей травяной растительности), а через 3-5 лет на них появляются кустарники и молодые деревья. Данные заброшенные земли, как правило, имеют высокий класс природной пожарной опасности в течение всего бесснежного периода, прежде всего – по причине наличия проводников горения, которые могут достигать не одну тонну на 1 га [13, 14]. Только запасы травяной ветоши могут достигать до 1,2 т/га в абсолютно сухом состоянии и обычно достигают максимума через 5 лет после прекращения земледельческого использования [13].

Ряд авторов отмечал, что обычно после 5 лет количество древесно-кустарниковой растительности начинает превышать запасы травянистых растений и уже к 15-16 годам без сенокосения или пахоты достигает объемов до 90 м³/га [15], а через 30-40 лет – запасов до 230 м³/га [16]. При переводе данных объемных показателей в массу, учитывая, что для большинства отечественных древесных пород 1 м³ абсолютно сухой древесины имеет массу от 400 до 650 кг [17], можно говорить о том, что запас в тоннах будет меньше примерно в два раза по сравнению с объемом в кубометрах.

Мероприятия для снижения уровня пожарной опасности на сельскохозяйственных землях. Рассмотрим более подробно несколько примеров по возможным действиям, которые могут привести к снижению уровня пожарной угрозы как на самих землях сельскохозяйственного назначения, так и на прилегающих участках. Данные примеры затрагивают как мероприятия, касающиеся уборки растительных остатков, планирования расположения посевов и посадок выращиваемых растений в пространстве (чередование более пожароопасных участков с менее опасными), так и законодательные аспекты. Однако наиболее эффективным противопожарным мероприятием является убеждение аграриев в части запрета использования открытого огня на сельхозземлях. Работа эта может выражаться, как в части формирования «позитивной» повестки, через пожарную агитацию и пропаганду, так и с «карательной» точки зрения, путем наложения штрафов и сокращения государственных субсидий.

Нами не рассматриваются вопросы, связанной с работой с населением, в части агитации и пропаганды или такие хорошо известные аспекты борьбы с пожарами, как проведение оперативного пожарного мониторинга и организация противопожарного проектирования на территории: от мест сосредоточения сил и средств до организации мест забора воды и подъездов к ним.

Снижение количества проводников горения без использования источников открытого огня. Для снижения уровня пожаров на сельскохозяйственных землях одним из самых оправданных решений является применение технологий, уменьшающее количество проводников горения, а также ограничение использования источников открытого огня. В части безопасного снижения проводников горения показательным примером является применение различных измельчителей



Фото © Брюханов А.В.

Рис. 2. Визуальное различие запасов горючих материалов на используемых (слева) и на 5-летних заброшенных (справа) сельскохозяйственных землях

Fig. 2. Visual difference between combustible materials on used (left) and 5 years abandoned (right) agricultural lands

и мульчеров (как соломы, так и древесно-кустарниковой растительности).

Солома и стерня являются основной причиной повышенной пожарной опасности зерноуборочных площадей, и одна из задач, которую решают разработчики сельскохозяйственной техники, – это измельчение и (или) сбор данных горючих материалов. Например, на полях зерновых культур для снижения количества горючих материалов рекомендуется использование современных комбайнов и агрегируемых устройств к ним, которые позволяют оставлять стерню меньшей высоты, а собранную солому мелко измельчать и (или) упаковывать в большие брикеты (тюки) или валы (рулоны).

Планирование расположения видов агрокультур для снижения пожарных рисков. Весьма эффективным способом снижения уровня природной пожарной опасности будет зонирование участков, особенно в тех местах, где они примыкают к участкам с высокой пожарной опасностью, как сельскохозяйственного (места хранения заготовленного сена, загущенные посадки в садах, поля с поспевшими зерновыми и др.), так и не сельскохозяйственного (хвойные молодняки, свалки и мусорные полигоны, линейные объекты, поселения и т.д.) назначения. На границах с подобными объектами рекомендуется создавать минерализованные полосы и скашивать траву, а рядом с поселениями в идеале лучше, когда создаются посадки растений, имеющих очень высокое влагосодержание и являющихся в связи с этим задерживающими распространение горения РГМ. Это, например, поля с разными видами из семейств пасленовых, тыквенных или крестоцветных. Как правило, огороды из сельскохозяйственных растений шириной от 300 м способны защитить от «переброса» даже самого опасного вида ландшафтного (природного) пожара – лесного верхового. При меньшей ширине посадки из картофеля, капусты или других плохо горимых растений могут остановить любой лесной или степной пожар, так как для его распространения не будет в достаточном количестве проводников горения. Посадки плодовых и декоративных растений также имеют высокий уровень природной пожарной опасности ввиду большой концентрации эфирных масел в своих частях (оливы, масличные пальмы, эвкалипты и др.) или же сухой пористой структуры. Кроме того, посадки следует подразделять на блоки с менее горимой древесно-кустарниковой растительностью, так как это обычно делается в лесном хозяйстве.

Работа по снижению количества заброшенных сельскохозяйственных земель. Причины

появления заброшенных сельскохозяйственных земель связаны с многими факторами, и, соответственно, действия по их решению будут различными. На некоторые аспекты, связанные с сокращением доли сельского населения, а также межрегиональной и международной миграцией, государство пока может влиять достаточно слабо, несмотря на действующие многолетние программы – такие, как датирование переселения и льготная ипотека, льготное кредитование сельскохозяйственного бизнеса и т.д. Однако не стоит забывать, что с точки зрения выращивания сельхозпродукции, благодаря использованию более совершенных семян, а также технологий посева, уборки и хранения урожая, в России за последние несколько десятилетий удалось значительно повысить как рост урожайности, так и сохранность урожая при хранении.

Кроме того, определенную роль в трансформации площадей, используемых для производства продовольствия, в земли, «покрытые древесно-кустарниковой растительностью», сыграло принятие в 2020 г. «Положения об особенностях использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения» [18-20], которое упростило процедуру прекращения активного ведения сельскохозяйственной деятельности на соответствующих землях.

Самой радикальной мерой по улучшению ситуации с сокращением заброшенных земель, предназначенных для выращивания сельхозпродукции, остается процедура их изъятия государством, причем не только для аграриев, но и для дачных участков обычных граждан. Это стало возможным после введения Федерального закона от 8 августа 2024 г. № 307-ФЗ «О внесении изменений в Земельный кодекс Российской Федерации» и статьи 23 Федерального закона «О ведении гражданами садоводства и огородничества для собственных нужд и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [21]. Согласно законодательству в случае отсутствия изменений (по прошествии трех лет) владельцы могут столкнуться со штрафами или изъятием с последующей продажей земель. Принимать решение об изъятии будет суд. Однако даже при нарушении срока освоения участок не будет автоматически изыматься [21].

Оценка уровня заброшенных сельхоз земель сейчас выполняется как наземными, так и дистанционными способами. С 2022 г. к работам по оцифровке имеющейся древесно-кустарниковой растительности на землях

сельскохозяйственного назначения в рамках госинвентаризации лесов стали более активно привлекаться региональные предприятия ФБУ Рослесинфорга, входящего в состав Рослесхоза [22]. Также к данной работе подключены и предприятия Роскосмоса [23].

Выводы

Подводя итоги оценки ситуации с пожарами на землях сельскохозяйственного назначения в России и мер по уменьшению ущерба от них, можно констатировать следующее. Во-первых, данная проблема является достаточно актуальной для нашей страны, а во-вторых, есть достаточно действенные способы по снижению пожарных рисков, которые регулируются как на местном, так и на федеральном уровнях. Исходя из анализа публикаций и наблюдений, можно уверенно говорить о том, что наиболее эффективными мерами будут являться ограничение использования открытого огня, снижение запасов горючих материалов и контроль за существующими заброшенными участками на землях сельскохозяйственного назначения. Именно эти профилактические действия, судя по публикациям в СМИ, научной литературе и по собственным наблюдениям, являются наиболее ключевыми для снижения уровня как природной, так и антропогенной пожарной опасности в аграрном секторе.

Список использованных источников

1. Воздействие бедствий на сельское хозяйство и продовольственную безопасность-2023. Предотвращение и сокращение потерь за счет инвестиций в повышение невосприимчивости к внешним воздействиям. Рим, ФАО. 2024. 169 с. URL: <https://doi.org/10.4060/cc7900ru>
2. Земельный кодекс Российской Федерации от 25 октября 2001 г. № 136-ФЗ, в ред. от 31 июля 2025 г., с изм. и доп., вступ. в силу с 1 сентября 2025 г. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/
3. Пожары и пожарная безопасность в 2005 году: Статистический сборник / Под общ. ред. Н.П. Копылова. М.: ВНИИПО, 2006. 139 с.
4. Пожары и пожарная безопасность в 2009 году: Статистический сборник / Под общ. ред. Н.П. Копылова. М.: ВНИИПО, 2010. 135 с.
5. Пожары и пожарная безопасность в 2013 году: Статистический сборник / Под общ. ред. В.И. Климкина. М.: ВНИИПО, 2014. 137 с.
6. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: Статистический сборник / Под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2020. 80 с.
7. Пожары и пожарная безопасность в 2024 году: Информационно-аналитический сборник. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. 113 с.
8. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ, в ред. от 25 декабря 2023 г. URL: <http://government.ru/docs/all/98843/>
9. О внесении изменений в Правила противопожарного режима в Российской Федерации: Постановление

В части совершенствования учета пожаров на сельскохозяйственных землях прежде всего есть необходимость актуализации площадных характеристик, которые уже сейчас фиксируются со спутников. Однако в связи с обычно небольшим контуром гарей, площадь, пройденная огнем на пашнях, сенокосах, садах и пр., фиксируется не всегда корректно. Соответственно есть необходимость в уточнении данной информации с помощью наземного обследования территорий и облета БПЛА.

Кроме того, полезной была бы организация единой системы сбора и обработки статистической информации, прежде всего – путем заполнения карточки на каждый пожар, возникающий на сельхозугодьях, так, как это делается в лесном фонде, землях ООПТ, в населенных пунктах и объектах. В настоящее время пожары на сельхозплощадях частично фиксируются специалистами МЧС России и региональных лесопожарных центров (в случае, если был переход на их территории, если привлекались к локализации и тушению их специалисты и т.д.). Однако необходимо, чтобы эта работа носила системный и регулярный характер для территории всей нашей страны. Только тогда будут возможны получение единой базы не только по количеству пожаров на сельхозугодьях, но и по их площадям, а также оценка суммарного ущерба как в разрезе регионов, так и в целом в Российской Федерации.

References

1. FAO. 2024. The Impacts of Disasters on Agriculture and Food Security 2023. Preventing and Reducing Losses by Investing in Resilience. Rome, FAO. 169 p. URL: <https://doi.org/10.4060/cc7900ru>
2. "Land Code of the Russian Federation" of 25.10.2001 N136-FZ (as amended on 31.07.2025) with amendments and add., entered into force on 01.09.2025 URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/
3. Fires and fire safety in 2005: Statistical digest. General editor N.P. Kopylov. Moscow: VNIPO, 2006, 139 p.
4. Fires and fire safety in 2009: Statistical digest. General editor N.P. Kopylov. Moscow: VNIPO, 2010, 135 p.
5. Fires and fire safety in 2013: Statistical Digest. Edited by V.I. Klimkin. Moscow: VNIPO, 2014, 137 p.
6. Fires and fire safety in 2019: Statistical Digest. Edited by D.M. Gordienko. Moscow: VNIPO, 2020, 80 p.
7. Fires and fire safety in 2024: information and analytical collection // Balashikha: FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2025. 113 p.
8. Federal Law of July 22, 2008 No. 123-FZ (as amended on December 25, 2023) "Technical Regulations on Fire Safety Requirements" URL: <http://government.ru/docs/all/98843/>
9. Resolution of the Government of the Russian Federation of 10.11.2015 No. 1213 "On Amendments to the Fire Safety Rules in the Russian Federation". URL: <http://government.ru/docs/all/104144/>
10. Matveev A.M., Bartalev S.A., Egorov V.A., Saygin I.A., Stytsenko F.V., Shinkarenko S.S. Validation of national and global products of mapping damaged landscape fires according

Правительства Российской Федерации от 10 ноября 2015 г. № 1213. URL: <http://government.ru/docs/all/104144/>

10. Матвеев А.М., Барталев С.А., Егоров В.А. и др. Валидация на территории России национальных и глобальных продуктов картографирования поврежденных пожарами ландшафтов по данным ДЗЗ / А.М. Матвеев, С.А. Барталев, В.А. Егоров, И.А. Сайгин, Ф.В. Стыценок, С.С. Шинкаренко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22, № 3. С. 9-30. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-9-30

11. Об утверждении Методических указаний по заполнению форм сведений о пожарной опасности в лесах и лесных пожарах: Приказ Минприроды России от 6 августа 2015 г. № 347. URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rossii-ot-06082015-n-347/>

12. Оборотная сторона земли: почему в России остаются невостребованными сельхозугодья: Выдержки из протокола заседания в Госдуме РФ 20 февраля 2020 г. URL: <https://mcx.gov.ru/press-service/news/oborotnaya-storona-zemli-pochemu-v-rossii-ostayutsya-nevostrebovannymi-selkhozugodya/>

13. Морозов А.С., Иванова Г.А., Бакшеева Е.О., Иванов В.А. Пожароопасность сосновых молодняков на неиспользуемых сельскохозяйственных землях // Сибирский лесной журнал. 2020. № 3. С. 26-36. DOI: 10.15372/SJFS20200303

14. Новосёлова Н.Н., Залесов С.В., Магасумова А.Г. Формирование древесной растительности на бывших сельскохозяйственных угодьях: Монография / Минобрнауки России. Екатеринбург: Уралский государственный лесотехнический университет, 2016

15. Аксенов П.А., Никитин В.Ф. Анатомия древесины ели европейской, выращенной в культурах с промежуточным сельскохозяйственным использованием // Леса Евразии в третьем тысячелетии. Т. 1. М.: МГУЛ, 2001. С. 8-9

16. Соколов Н.Н. Рост и продуктивность сосновых древостоев по старым пашням // ИВУЗ «Лесной журнал». 1978. № 4. С. 22-25.

17. Справочник по пиломатериалам. М.: Центр стандартизации и сертификации лесоматериалов ООО «Лесэксперт», 2003. 96 с.

18. Урожайность пшеницы в России с 2012 года выросла на 77% // Новость 12 марта 2019 г. / Национальное аграрное агентство. URL: <https://rosng.ru/post/urozhaynost-psheniцы-v-rossii-s-2012-goda-vyrosla-na-77-procentov>

19. Об особенностях использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения: Постановление Правительства РФ от 21 сентября 2020 г. № 1509. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_362805/

20. О ведении гражданами садоводства и огородничества для собственных нужд и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 29 июля 2017 г. № 217-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_221173/

21. О внесении изменений в Земельный кодекс Российской Федерации и статью 23 Федерального закона «О ведении гражданами садоводства и огородничества для собственных нужд и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»: Федеральный закон от 8 августа 2024 г. № 307-ФЗ. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202408080107?index=1>

22. Зброшенныя участкі зямлі цяпер могуць ізьзяць у сабствеников. Вступил в силу закон об изъятии заброшенных участков земли у собственников // Новости РБК 1 марта 2025 г. URL: <https://www.rbc.ru/society/01/03/2025/67bc8bcd9a7947f8621b6acc>

23. Пиксель с интеллектком // Новость от 10 сентября 2022 г. Госкорпорации «Роскосмос». URL: <https://www.roscosmos.ru/38194>

to remote sensing data // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2025. v. 22. no. 3. pp. 9-30. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-9-30

11. Morozov A.S., Ivanova G.A., Baksheeva E.O., Ivanov V.A. Fire hazard of pine saplings on unused agricultural lands // Siberian Forest Journal. 2020. No. 3. pp. 26-36. DOI: 10.15372/SJFS20200303

12. Novoselova N.N., Zalesov S.V., Magasumova A.G. The formation of woody vegetation on former agricultural lands monograph; Ministry of Education and Science of Russia, Ural State Forestry Technical University UGLU. Yekaterinburg: Ural State Forestry Engineering University, 2016. – 1 electronic optical disc (CD-ROM) title; 13. ISBN 978-5-94984-584-4.

13. Aksekov P.A., Nikitin V.F. // Anatomy of European spruce wood grown in crops with intermediate agricultural use / Forests of Eurasia in the third millennium. V. 1. – Moscow: MGUL, 2001. P. 8-9.

14. Sokolov N.N. Growth and productivity of pine stands on old arable land // IVZ “Lesnoy zhurnal”, 1978. No. 4. pp. 22-25.

15. Handbook of lumber. – M. 2003: Center for Standardization and certification of timber LLC “Lesexpert”. 96 p.

16. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 06.08.2015 No. 347 “On approval of the Methodological guidelines for filling out forms of information on fire hazard in forests and forest fires”. URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rossii-ot-06082015-n-347/>

17. The other side of the land: why farmland remains unclaimed in Russia. Excerpts from the minutes of the meeting in the State Duma of the Russian Federation on February 20, 2020. URL: <https://mcx.gov.ru/press-service/news/oborotnaya-storona-zemli-pochemu-v-rossii-ostayutsya-nevostrebovannymi-selkhozugodya/>

18. National Agrarian Agency. News 03/12/2019 “Wheat yield in Russia has increased by 77 percent since 2012”. <https://rosng.ru/post/urozhaynost-psheniцы-v-rossii-s-2012-goda-vyrosla-na-77-procentov>

19. Resolution of the Government of the Russian Federation of September 21, 2020 No. 1509 “On the specifics of use, protection, reproduction of forests located on agricultural lands”. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_362805/

20. Federal Law of 29.07.2017 No. 217-FZ “On citizens’ gardening and vegetable gardening for their own needs and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation”. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_221173/

21. Federal Law of 08.08.2024 No. 307-FZ “On amendments to the Land Code of the Russian Federation and Article 23 of the Federal Law “On citizens’ gardening and vegetable gardening for their own needs and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation”. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202408080107?index=1>

22. Abandoned land plots can now be seized from owners. The law on the seizure of abandoned land plots from owners has come into force. RBC News, 01.03.2025. URL: <https://www.rbc.ru/society/01/03/2025/67bc8bcd9a7947f8621b6acc>

23. Roscosmos State Corporation. News from 10.09.2022 Pixel with intelligence. <https://www.roscosmos.ru/3819423>. Return of fertile lands: what happens to abandoned agricultural lands. Geospatial Analytics 01/29/2023. URL: <https://geonovosti.terra-ech.ru/economy/vvod-v-oborot-zarastayushchikh-selkhoz-zemel/>

Информация об авторах

Александр Викторович Брюханов, канд. биол. наук, доцент кафедры Ландшафтной архитектуры и ботаники ИАЭТ КрасГАУ, Старший научный сотрудник лаборатории лесной пирологии Института леса им. В.Н. Сукачёва ФИЦ КНЦ СО РАН; ORCID ID: 0000-0002-0035-9377; Scopus ID: 57190338740; РИНЦ ID: 123742; WOS Research ID: ААМ-2926-2021; bryukhanov1975@yandex.ru

Галина Александровна Демиденко, д-р биол. наук, профессор; заведующий кафедры Ландшафтной архитектуры и ботаники ИАЭТ КрасГАУ; ORCID: 0000-0001-9268-585X; Scopus ID: 57211227415; РИНЦ ID: 309613; demidenkoekos@mail.ru

Сергей Викторович Жила, канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории лесной пирологии Института леса им. В.Н. Сукачёва ФИЦ КНЦ СО РАН; ORCID ID: 0009-0008-4130-9094; Scopus ID: 55994504200; РИНЦ ID: 946975; WOS Research ID: F-8846-2017; new_science@bk.ru

Information about the authors

Alexander V. Bryukhanov, CSc (Biology), associate professor of the Department of Landscape Architecture and Botany, Senior Researcher of Laboratory of Forest Pirology V.N. Sukachev Institute of Forest KSC SB RAS, 660036 Akademgorodok 50, bl. 28, Krasnoyarsk, bryukhanov1975@yandex.ru

Galina A. Demidenko, DSc (Biology), Professor, Head of the Department of Landscape Architecture and Botany FSBEI HE Krasnoyarsk SAU; ORCID: 0000-0001-9268-585X; Scopus ID: 57211227415; РИНЦ ID: 309613; demidenkoekos@mail.ru

Sergey V. Zhila, CSc (Biology), Senior Researcher of Laboratory of Forest Pirology V.N. Sukachev Institute of Forest KSC SB RAS, 660036 Akademgorodok 50, bl. 28, ORCID ID: 0009-0008-4130-9094; Scopus ID: 55994504200; Krasnoyarsk, new_science@bk.ru

Критерии авторства

Брюханов А.В., Демиденко Г.А., Жила С.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received 09.09.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received 15.04.2026

Принята к публикации / Accepted 16.04.2026

Criteria of authorship

Bryukhanov A.V., Demidenko G.A., Zhila S.V. carried out the theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Оригинальная статья

УДК 630*453:630*181

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-114-123>



ХАРАКТЕРИСТИКА КРУПНЫХ ДРЕВЕСНЫХ ОСТАТКОВ В ПИХТОВЫХ НАСАЖДЕНИЯХ, ПОВРЕЖДЕННЫХ УССУРИЙСКИМ ПОЛИГРАФОМ (*POLYGRAPHUS PROXIMUS* BLANDF.)

А.А. Андропова^{1✉}, А.А. Вайс², П.В. Михайлов³, В.Н. Немич⁴,
Н.А. Соклаков⁵, А.И. Мельник⁶, И.А. Дрейман⁷, Н.В. Козлов⁸

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева; г. Красноярск, Российская Федерация

¹ economics25192715@gmail.com, ORCID0000-0001-7079-0819

² vais6365@mail.ru, ORCID0000-0003-4965-3670

³ mihaylov.p.v@mail.ru, ORCID0000-0003-3967-0709

⁴ nvn-16@yandex.ru, ORCID0000-0001-8700-532X

⁵ Soclacov@mail.ru, ORCID0009-0005-9785-2107

⁶ aleksandrana2013@gmail.com, ORCID0000-0002-1673-1639

⁷ dreiman_ia@sibsau.ru, ORCID0009-0002-2385-5194

⁸ nik.vik.kozlov.2000@gmail.com; ORCID0009-0000-7950-6650

Аннотация. Цель исследований – оценка состояния и запасов крупных древесных остатков (КДО) в насаждениях, поврежденных уссурийским полиграфом (*Polygraphus proximus* Blandf.). Изучали КДО на 10 пробных площадках пихтовых насаждений с различной таксационной характеристикой. В полевой период выполнялась оценка крупных древесных остатков в соответствии с методикой ВНИИЛМа. Выявлены значительные различия в запасах растущего древостоя и КДО, что указывает на негативное воздействие уссурийского полиграфа на пихтовые насаждения. Результаты показывают, что в чистых пихтовых древостоях наблюдается деградация экосистемы (более 70% КДО от запаса растущих деревьев). Анализ классов разложения показал, что большинство КДО относится ко второму и третьему классам, и это связано с пиками активности вредителя 10-15 лет назад. На участках смешанных пихтовых насаждений наблюдается высокий уровень мертвой древесины, что предполагает значительные изменения, в том числе в составе насаждений в будущем. В древостоях выделяются участки, которые выступают как новая кормовая база, и участки, которые находятся на стадии восстановления, но все равно подвергаются атакам вредителей даже в молодом возрасте. Результаты исследований указывают на важность учета баланса КДО при управлении лесными ресурсами для предотвращения дальнейших нарушений экосистемы и содействия ее восстановлению.

Исследования проводились в рамках государственного задания, установленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, для реализации проекта ГЕФЕ-2024-0029 «Динамика восстановления таежных лесов Центральной Сибири, нарушенных энтомовредителями» коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем».

Ключевые слова: крупные древесные остатки, запас, сухостой, уссурийский полиграф, пихтовый древостой

Для цитирования: Андропова А.А., Вайс А.А., Михайлов П.В., Немич В.Н., Соклаков Н.А., Мельник А.И., Дрейман И.А., Козлов Н.В. Характеристика крупных древесных остатков в пихтовых насаждениях, поврежденных уссурийским полиграфом (*Polygraphus proximus* Blandf.). Природообустройство. 2026;Т.19(2):114-123. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-114-123>

Scientific article

CHARACTERISTICS OF LARGE WOOD RESIDUES IN FIR PLANTATIONS DAMAGED BY THE USSURI POLYGRAPH (*POLYGRAPHUS PROXIMUS* BLANDF.)

A.A. Andronova¹, A.A. Vais², P.V. Mikhaylov³, V.N. Nemich⁴,
N.A. Soklakov⁵, A.I. Melnik⁶, I.A. Dreiman⁷, N.V. Kozlov⁸

¹Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev; Krasnoyarsk, Russian Federation

¹economics25192715@gmail.com, ORCID0000-0001-7079-0819

²vais6365@mail.ru, ORCID0000-0003-4965-3670

³mihaylov.p.v@mail.ru, ORCID0000-0003-3967-0709

⁴nvn-16@yandex.ru, ORCID0000-0001-8700-532X

⁵Soclacov@mail.ru, ORCID0009-0005-9785-2107

⁶aleksandrana2013@gmail.com, ORCID0000-0002-1673-1639

⁷dreiman_ia@sibsau.ru, ORCID0009-0002-2385-5194

⁸nik.vik.kozlov.2000@gmail.com; ORCID0009-0000-7950-6650

Abstract. The purpose of the study is to assess the condition and reserves of large woody residues (LWR) in plantations damaged by the Ussuri polygraph (*Polygraphus proximus* Blandf.). The study of LWR was conducted on ten test sites of fir plantations with different taxation characteristics. During the field season, coarse woody debris was assessed in accordance with the VNIILM methodology. Significant differences were found in the stocks of growing trees and LWR, indicating the negative impact of the Ussuri polygraph on fir plantations. The results show that in pure fir stands, ecosystem degradation is observed (more than 70% of LWR from the stock of growing trees). An analysis of decay classes showed that most deadwood belongs to the second and third classes, which is associated with peaks in pest activity 10-15 years ago. In areas of mixed fir plantations, there is a high level of dead wood, which suggests significant changes, including in the composition of plantations in the future. In stands, there are areas that act as a new food base and areas that are under restoration, but are still subject to pest attacks even at a young age. The research results indicate the importance of considering the balance of deadwood during forest resource management to prevent further ecosystem disturbances and promote its restoration.

The study was conducted within the framework of the state assignment established by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of the FEFE-2024-0029 project “Dynamics of restoration of taiga forests of Central Siberia disrupted by entomological damage” by the staff of the scientific laboratory “Forest Ecosystems”.

Keywords: large wood residues, stock, deadwood, Ussuri polygraph, fir stand

Format of citation: Andronova A.A., Weiss A.A., Mikhailov P.V., Nemich V.N., Soklakov N.A., Melnik A.I., Dreiman I.A., Kozlov N.V. Characteristics of large wood residues in fir plantations damaged by the Ussuri polygraph (*Polygraphus proximus* Blandf.). *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):114-123. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-114-123>

Введение. Одной из ведущих задач, стоящих перед лесным хозяйством, является восстановление поврежденных лесных экосистем до их первоначального состояния или по крайней мере минимизация долговременного воздействия этих нарушений. Лесные экосистемы играют жизненно важную роль в поддержании биоразнообразия, и многие виды нарушений, особенно если они остаются без внимания, могут оказать значительное влияние на разнообразие компонентов биологической системы [1].

В процессе природных нарушений, антропогенного воздействия и естественного существования лесов происходит отпад древесных растений, что является важнейшим компонентом

эволюционных процессов в рамках лесного биогеоценоза. От того, насколько хорошо нами понимаются причины и закономерности гибели деревьев, зависит наша способность прогнозировать изменения в лесных экосистемах. Ведь именно этот процесс напрямую формирует условия для роста и выживания деревьев. Причины, приводящие к гибели деревьев, могут быть самыми разными: от борьбы растений за ресурсы и механических повреждений до болезней, атак насекомых и естественного старения [2, 3].

Когда говорят о мертвой древесине, используют термин «крупные древесные остатки» (КДО). Эта категория охватывает все виды древесной растительности, которые больше не являются

живыми и не выполняют своих прежних функций. Примерами КДО являются сухостойные деревья, упавшие стволы и ветви (валеж), а также пни и их фрагменты. Все эти остатки являются мертвым древесным веществом (мортмассой) и могут находиться в различных состояниях разложения: от свежесрубленной или упавшей древесины до гумуса [4-7]. Крупные древесные остатки являются важным компонентом экосистемы, обеспечивающим субстрат и микроклимат, необходимые для существования и размножения многочисленных видов животных, растений и грибов; оказывают положительное воздействие на физические, химические и биохимические свойства почвы; способны длительное время сохранять углерод, накопленный в процессе жизни дерева, и т.д. [8-10]. Тем не менее одно из важных условий для успешного восстановления лесов заключается в том, чтобы количество крупных древесных остатков не выходило за пределы допустимого значения. Оптимальное количество КДО, по мнению некоторых авторов, не должно превышать 30% [11]. Избыточное количество дебриса может оказать негативное влияние на разнообразие и численность местных растительных видов. Высокая концентрация мертвой древесины является фактором, повышающим пожарную опасность в лесу. Также она создает благоприятную среду для развития и распространения энтомофитов (например, короедов) и фитопатогенных грибов, что приводит к деградации древостоя и нарушению функционирования экосистемы [12]. Исходя из этого управление лесными ресурсами должно быть комплексным, обеспечивая баланс и учитывая все многообразие экосистем.

Одной из основных причин деградации пихтовых насаждений с образованием КДО на территории Центральной Сибири выступает полиграф уссурийский (*Polygraphus proximus* Blandf.). Начиная с 2000-х гг. данный вид активно продолжает свое распространение и увеличивает ареал. В Красноярском крае в 34 из 44 муниципальных районов зафиксированы очаги заражения, которые продолжают расти [13, 14]. Большинство исследований в настоящее время связано с изучением способности нарушенных территорий к естественному лесовосстановлению. Исследователи отмечают, что на некоторых площадях в зависимости от породного состава и степени нарушенности пихтовые древостои приходят к восстановлению через смену пород, а представленность пихты в составе будет ограничена – не более 20-50%. При этом ученые указывают на то, что пихтовые леса обладают потенциалом

к восстановлению через различные сценарии с разной продолжительностью по времени [15-17]. В связи с этим значительную роль в процессах лесовосстановления играет КДО. Поэтому необходимо выполнять оценку количества, проводить учет распределения по классам разложения и прогнозировать влияние данных показателей на способность к восстановлению нарушенных территорий. В зависимости от характеристики крупных древесных остатков можно выявить необходимость хозяйственных мероприятий для содействия естественного восстановления лесов.

Цель исследований: оценка состояния и запасов крупных древесных остатков (КДО) в насаждениях, поврежденных уссурийским полиграфом (*Polygraphus proximus* Blandf.).

Материалы и методы исследований. Территория Центральной Сибири расположена на границе двух зон: лесостепной (Красноярская лесостепь) и таежной (горно-таежный район Восточного Саяна). Основной лесобразующей породой на исследуемой территории является пихта сибирская (*Abies sibirica* L.). В полевой период выполнялась оценка крупных древесных остатков в соответствии с методикой ВНИИЛМа [6]. Заложено 10 лент, на каждой из которых закладывалась учетная площадка разных размеров (5 × 20 м; 5 × 25 м; 5 × 30 м; 5 × 50 м; 10 × 50 м). На каждой площадке отдельно учитывались все категории мертвой древесины (пни, сухостой и валеж). В учет включались стволы валежа и сухостоя с диаметром более 5 см. Для каждого вида КДО выполнялись отдельные замеры: для сухостоя (целого ствола) – диаметр на высоте груди и высота; у обломанного сухостойного дерева – диаметр у основания и в месте облома, а также высота; применительно к валежу – диаметры у основания, на середине и у вершины, а также длина ствола. Если валеж находился на стадии сильного разложения, диаметры измерялись параллельно и перпендикулярно почве; для пней измерялись диаметр у основания и диаметр у вершины, а также его высота. У каждого древесного остатка определялись класс разложения (5 классов) (табл. 1) и степень покрытия мхом, (%).

Данные всех замеров записывались отдельно для каждой площадки в полевую ведомость. После сбора выполнялась камеральная обработка информации. Для этого использовались электронная таблица «Excel», статистический пакет «STATGRAPHICS». Обработка материалов заключалась в определении запасов КДО с применением стереометрических формул по определению объемов для каждой категории

Таблица 1. Схема классов разложения древесины

Table 1. Scheme of wood decomposition classes

Классы разложения / Classes of decomposition	Признаки / Signs					
	Кора / Bark	Сучья / Branches		Твердость / Hardness	Форма поперечного сечения / Cross-sectional shape	Жесткость конструкции ствола / Stiffness of the trunk structure
		Крупные / Coarse	Мелкие / Small			
	полное покрытие / full coverage	+	+	Твердая / hard	круглая / round	не прогибается / does not bend
2	начинает отслаиваться / begins to peel off	+	+	внешняя часть становится мягкой / The outer part becomes soft	Круглая / round	не прогибается / does not bend
3	частично сохранилась / partially preserved	+	-	значительная часть сгнила / A significant part is rotten	Круглая / round	проседает, но не проваливается / sagging, but not falling through
4	почти не сохранилась / almost not preserved	нет или легко вынимаются / no or easy to remove	-	мягкая насквозь / soft through	Деформирована / deformed	Проваливается / Falls through
5	отсутствует / absent	-	-	рассыпается / crumbles	сильно деформирована / severely deformed	деструктурирована / destructured

мертвой древесины и общего запаса на всю учетную площадку [6].

Результаты и их обсуждение. В летний период оценка запаса крупных древесных остатков по трем категориям (сухостой, валеж, пни) выполнялась на 10 пробных площадях с различной лесоводственно-таксационной характеристикой древостоев и степенью поврежденности уссурийским полиграфом (*Polygraphus proximus* Blandf.). Лесные участки представлены разным составом (табл. 2). По составу обследованы чистые и смешанные пихтовые насаждения (участки 1 и 2). На участках смешанных пихтовых древостоев в составе встречались осина обыкновенная (*Populus tremula* L.), береза повислая (*Betula pendula* Roth.), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Rupr.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.). По типам леса участки подразделялись на пихтач разнотравный, пихтач осочково-разнотравно-зеленомошный, пихтач крупнотравно-зеленомошный и пихтач крупнотравно-осочковый. По бонитету насаждения в 80% представлены 3 бонитета.

Запас растущего древостоя на участках варьировал от 128 до 409 м³ · га⁻¹, а запас КДО – от 6 до 423 м³ · га⁻¹. Максимальное значение КДО

характерно для участка 2, что в 1,7 раза превышает запас растущего древостоя. Также участок 10 показал превышение запаса КДО в 2,7 раза в отличие от запаса растущего. Данные участки с учетом того, что растущие деревья имеют также признаки повреждений короедом, показывают признаки полного патологического отпада пихты и смены пород в ближайшие годы. Особенно это относится к участку 2, так как зараженность пихты является высокой (46,7%). Минимальные значения КДО характерны для участков 6 и 9. Это говорит о том, что данные площади выступают в качестве новой кормовой базы с зараженностью пихты 37,8 и 31,9%. Вероятно, происходит ослабление древостоя, и если принять необходимые меры по защите древостоя, эти участки можно сохранить.

В дальнейшем выполнена оценка связи между таксационными показателями насаждений и запасом крупных древесных остатков (рис. 1). Необходимо отметить, что полученные тренды, возможно, являются актуальными только для подобранных модельных насаждений. Большинство полученных трендов не в полной мере отражают закономерность, следовательно, связи неустойчивы и нуждаются в дальнейшем подтверждении. Несколько трендов очевидны и не требуют сложных объяснений. К ним

Таблица 2. Характеристика лесных участков пихтовых древостоев, поврежденных уссурийским полиграфом

Table 2. Characteristics of forest areas of fir stands damaged by the Ussuri polygraph

Номер участка / Plot number	Состав / Composition	Запас растущего древостоя $m^3 \cdot га / Stock of growing stand m^3 \cdot ha$	Запас КДО $m^3 \cdot га^{-1} / Stock of LWR m^3 \cdot ha^{-1}$	A, лет / years	H_{cp} , м / m	d_{cp} , см / cm	$\sum G$, $m^2 \cdot га / m^2 \cdot ha$	P	Зараженность пихты на участке, % / Fir infestation on the plot, %
1	10П	228	163	100	19	30	25,36	0,80	67,6
2	10П	255	423	130	19	27	23,13	0,72	46,7
3	73П25Ос2Б	220	213	80	18	20	23,63	0,76	0,0
4	53П34Б13ОседЕ, К	214	116	40	13	14	28,58	1,12	13,5
5	60П26Е8Б6К	203	244	70	15	18	22,25	0,78	18,1
6	48П38Б14Ос	214	6	60	15	17	23,05	0,58	37,8
7	69П19С7Ос4К	315	279	90	19	20	29,16	0,91	12,7
8	74П18Ос5Б3Е	176	198	90	20	23	23,50	0,71	33,7
9	62П18Л-14С3К2Ос1Е	409	75	90	20	23	36,19	1,10	31,9
10	72П27Л1Ос	128	328	90	13	14	13,17	0,36	15,7

Примечание: A – средний возраст древостоя; H_{cp} – средняя высота; d_{cp} – средний диаметр; $\sum G$ – сумма площадей поперечного сечения; P – полнота

Note: A is the average age of the stand; H_{av} is the average height; d_{av} is the average diameter; $\sum G$ is the sum of cross-sectional areas; P is the fullness

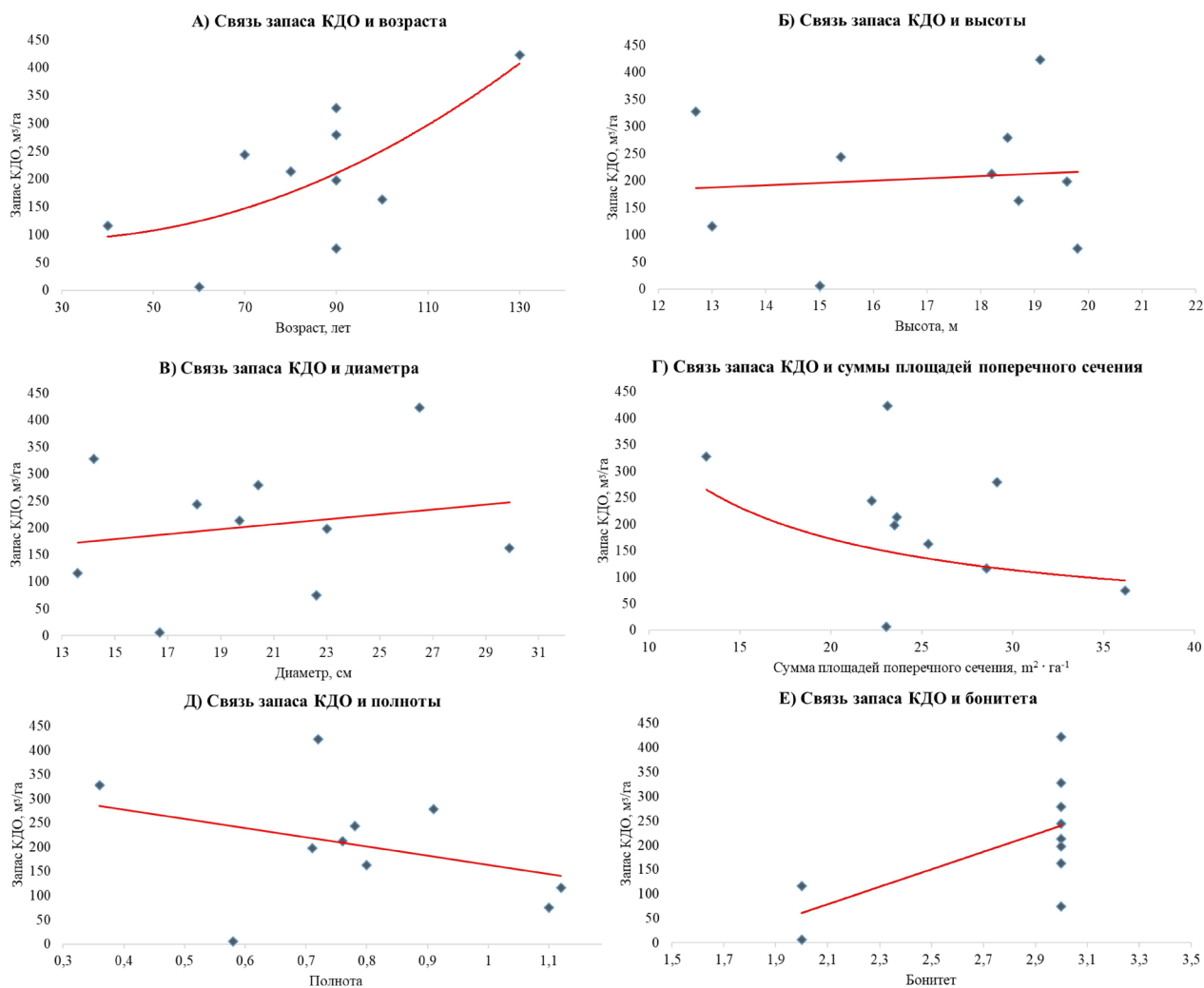


Рис. 1. Связь запаса крупных древесных остатков и таксационных показателей древостоев
Fig. 1. Relationship between the stock of large wood residues and the taxation indicators of forest stands

относятся: связь запаса КДО и возраста; связь запаса КДО и бонитета.

Для изучения давности отпада древостоев крупные древесные остатки подразделялись на категории, и определялся запас каждой группы (табл. 3). Средние показатели запаса КДО составили в сухостое $102,2 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$, в пнях – $9,8 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$, в валеже – $92,5 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$. Значительное количество сухостоя указывало на первичное воздействие полиграфа, но практически такой же запас валежа говорит о неоднократных атаках вредителей на участках.

Следует учитывать, что одновременно с последствиями повреждения полиграфом существует определенный процент отпада в связи с возрастом древостоя. На участках 3 и 7 КДО преимущественно представлены сухостоем, и скорее всего это новые поврежденные территории

с первичной степенью воздействия и отпада. Участки 4, 6, 8 и 9 – отработанные кормовые площади полиграфа. Остальные насаждения с большим количеством как валежа, так и отпада подвергались неоднократным атакам инвайдера.

Изучив распределение запасов КДО по классам разложения, можно отследить пик активности вредителей за последнее время и определить степень активности в настоящий период (табл. 4). Запасы КДО по классам разложения на всех лесных участках распределены неравномерно. Максимальное количество древесных остатков соответствовало второму и третьему классам. Эти остатки образовались в основном во время пика вспышки массового размножения вредителя 10-15 лет назад (2010-2015 гг.). Четвертый класс представлен деревьями, погибшими в фазе роста численности вредителя, и деревьями

Таблица 3. Распределение запаса по видам крупных древесных остатков пихтовых древостоев, поврежденных уссурийским полиграфом

Table 3. Distribution of stock by species of large wood residues of fir stands damaged by the Ussuri polygraph

Номер участка / Plot number	Запас сухостоя, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ / Deadwood stock, $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	Запас пней, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ / Stumps stock, $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	Запас валежа, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ / Brushwood stock, $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$
1	92	0	71
2	170	51	202
3	199	1	13
4	0	10	106
5	135	0	109
6	0	1	5
7	200	1	78
8	60	22	116
9	8	7	60
10	158	5	165

Таблица 4. Распределение запаса крупных древесных остатков по классам разложения пихтовых древостоев, поврежденных уссурийским полиграфом

Table 4. Distribution of the stock of large wood residues by classes of decomposition of fir stands damaged by the Ussuri polygraph

Номер участка / Site number	Запас КДО 1 класса разложения $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ / Stock LWR of decomposition class $1 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$	Запас КДО 2 класса разложения $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ / Stock LWR of decomposition class $2 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$	Запас КДО 3 класса разложения $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ / Stock LWR of decomposition class $3 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$	Запас КДО 4 класса разложения $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ / Stock LWR of decomposition class $4 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$
1	0,0	92,0	43,0	27,0
2	0,0	129,0	123,0	170,0
3	8,0	43,0	162,0	0,0
4	0,0	19,0	64,0	33,0
5	0,0	35,0	17,0	192,0
6	0,4	0,7	2,2	3,0
7	0,0	6,0	199,0	74,0
8	0,0	30,0	46,0	122,0
9	0,0	2,0	9,0	64,0
10	0,0	116,0	212,0	0,0

отпада по другим естественным причинам. Минимальное количество свежего КДО при первой степени разложения свидетельствует о резком замедлении процессов гибели деревьев в лесных насаждениях по причине истощения наиболее пригодных для вредителя кормовых запасов.

Распределение КДО по размерам (диаметру) в нарушенных лесных массивах указывает на предпочтения вредителей в выборе деревьев. С целью анализа КДО по диаметру его подразделили на три категории (тонкомер – 10,0-16,0 см; среднемер – 16,1-36,0 см; крупномер – 36,1 см и более). Для анализа составлены графики распределения запаса крупных древесных остатков

по группам диаметров для 10 участков (рис. 2). На рисунке 2 для примера показаны участки с 1 по 6. Распределение является неравномерным, но большая часть запаса приходится на среднемерные КДО. На нескольких участках зафиксирован и крупномерный КДО. Особенно выделяется третий участок, где высокой является доля отпада крупных деревьев, которые, вероятно, находились в ослабленном состоянии. На каждом участке присутствуют также тонкомерные крупные древесные остатки. Это говорит о том, что вредитель, предположительно в результате истощения кормовой базы, начинает атаковать молодые деревья.

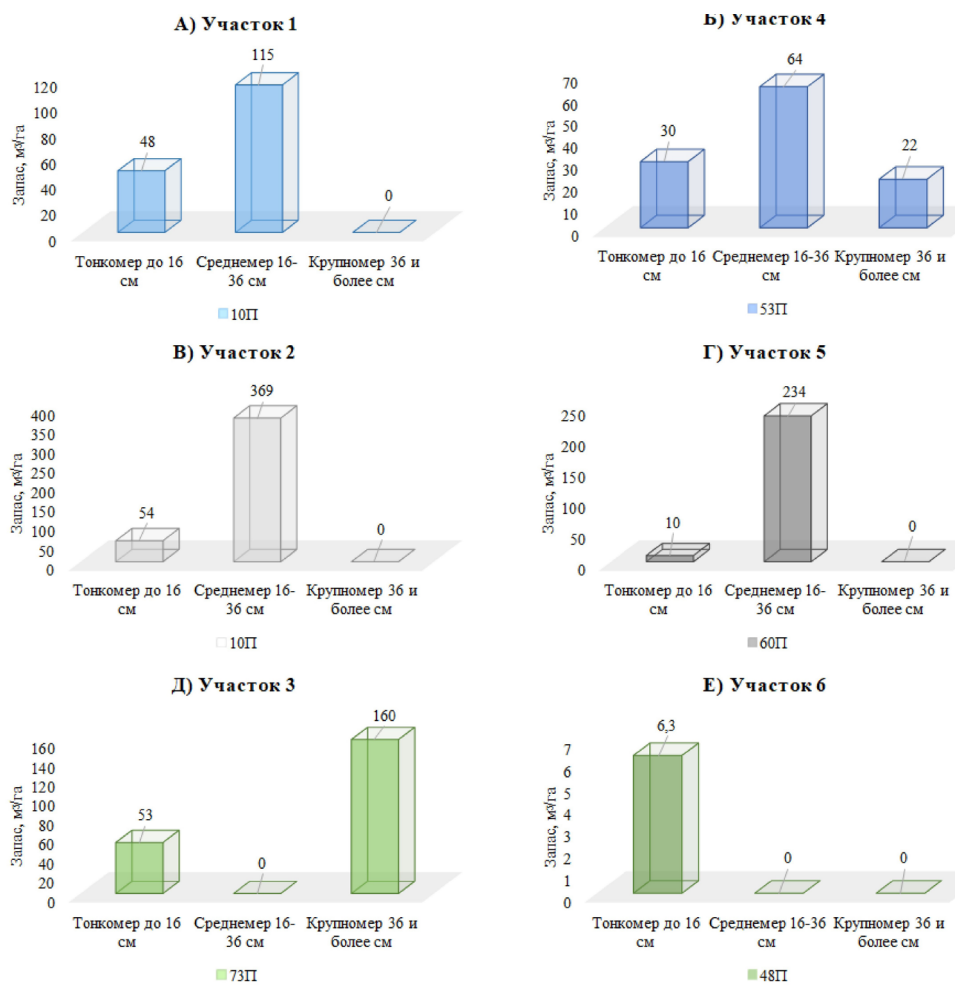


Рис. 2. Распределение запаса крупных древесных остатков по категориям диаметров
Fig. 2. Distribution of the stock of large wood residues by diameter categories

Выводы

Анализ структуры крупных древесных остатков в чистых пихтовых древостоях выявил признаки деградации экосистемы. Доля КДО превышает 70% от запаса растущей части насаждения, что является индикатором неблагоприятного состояния как для темнохвойных, так и для биогеоценоза в целом. О более активной деятельности энтомовредителя свидетельствует

присутствие всех категорий дебриса на исследованной территории, а также преобладание содержания валежа и сухостоя.

По данным о классах разложения установлено, что максимальный отпад приходился на пик активности уссурийского полиграфа в 2010-2015 гг. На участках отсутствует 1-й класс разложения, что говорит о снижении активности инвайдера. Несмотря на это, энтомовредитель,

предположительно в результате истощения кормовой базы, из взрослых деревьев начинает атаковать молодые деревья и даже подрост, что препятствует успешному лесовосстановлению.

В смешанных пихтовых древостоях на большинстве участков высоким является показатель мертвой древесины пихты, следовательно, предполагается изменение состава насаждения в будущем. На участках присутствует патологический отпад. Гибель деревьев в результате действия полиграфа преобладает. В смешанных пихтовых древостоях выделяются участки, которые выступают в качестве новой кормовой базы и участки, которые находятся на стадии восстановления, но все равно подвергаются атакам вредителей даже в молодом возрасте. На территории

присутствуют все виды КДО (пни, валеж, сухостой). Распределяется КДО в основном между валежом и сухостоем. Максимальное количество древесных остатков соответствовало второму и третьему классам разложения. Эти остатки образовались в основном во время пика вспышки массового размножения вредителя 10-15 лет назад. Минимальное количество свежего КДО первой степени разложения свидетельствует о резком замедлении процессов гибели деревьев в лесных насаждениях по причине истощения наиболее пригодных для вредителя кормовых запасов. Распределение запаса КДО по группам диаметра является неравномерным, но большая часть запаса приходится на среднемерную категорию.

Список использованных источников

1. Lingua E., Marques G., Marchi N., Garbarino M., Marangon D., Taccaliti F., Marzano R. Post-Fire Restoration and Deadwood Management: Microsite Dynamics and Their Impact on Natural Regeneration. *Forests*. 2023;14(9):1820. <https://doi.org/10.3390/f14091820>
2. Мошников С.А., Ананьев В.А., Матюшкин В.А. Оценка запасов крупных древесных остатков в среднетаежных сосновых лесах Карелии // *Лесоведение*. 2019. № 4. С. 266-273
3. Ma L., Du W., Shu H., Cao H., Shen C. Spatial Pattern of Deadwood Biomass and Its Drivers in a Subtropical Forest. *Forests*. 2023;14(4):773. <https://doi.org/10.3390/f14040773>
4. Бергман И.Е., Воробейчик Е.Л., Усольцев В.А. Структура отпада елово-пихтовых древостоев в условиях загрязнения выбросами Среднеуральского медеплавильного завода // *Сибирский лесной журнал*. 2015. № 2. С. 20-32
5. Тарасов М.Е. Роль крупного древесного детрита в балансе углерода лесных экосистем Ленинградской области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 1999. 21 с.
6. Кранкина О.Н., Поваров Е.Д. Методика определения запасов и массы древесного детрита на основе данных лесоустройства / Министерство природных ресурсов Российской Федерации. Пушкино: Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, 2002. № 44 (1)
7. Малышева Н.В., Филипчук А.Н., Золина Т.А., Сильягина Г.В. Количественная оценка запасов древесного детрита в лесах РФ по данным ГИЛ // *Лесохозяйственная информация*. 2019. № 1. С. 101-120
8. Effects of Fire Severity and Woody Debris on Tree Regeneration for Exploratory Well Pads in Jack Pine (*Pinus banksiana*) / A.T. Filicetti, R.A. LaPointe S.E. Nielsen // *Forests*. *Forests*. 2021. 12(10). 1330. <https://doi.org/10.3390/f12101330>
9. Dufour-Pelletier S.A. Tremblay J., Hébert C., Lachat T., Ibarzabal J. Testing the Effect of Snag and Cavity Supply on Deadwood-Associated Species in a Managed Boreal Forest. *Forests*. 2020;11(4):424. <https://doi.org/10.3390/f11040424>
10. Wang H., Zhang L., Deng W., Liu J., Wu C., Zhang Y., Liu Y. Habitat Significantly Affect CWD Decomposition but No Home-Field Advantage of the Decomposition Found in a Subtropical Forest, China. *Forests*. 2022;13(6):924. <https://doi.org/10.3390/f13060924>
11. Pinno B.D., Das Gupta S. Coarse Woody Debris as a Land Reclamation Amendment at an Oil Sands Mining Operation in Boreal Alberta, Canada. *Sustainability*. 2018;10(5):1640. <https://doi.org/10.3390/su10051640>

References

1. Lingua E., Marques G., Marchi N., Garbarino M., Marangon D., Taccaliti F., Marzano R. Post-Fire Restoration and Deadwood Management: Microsite Dynamics and Their Impact on Natural Regeneration. *Forests*. 2023; 14(9):1820. <https://doi.org/10.3390/f14091820>
2. Moshnikov S.A., Ananiev V.A., Matyushkin V.A. Assessment of the reserves of large wood residues in the middle taiga pine forests of Karelia. 2019. № 4. P. 266-273.
3. Ma L., Du W., Shu H., Cao H., Shen C. Spatial Pattern of Deadwood Biomass and Its Drivers in a Subtropical Forest. *Forests*. 2023; 14(4):773. <https://doi.org/10.3390/f14040773>
4. Bergman I.E., Vorobeychik E.L., Usoltsev V.A. Structure of spruce-fir forest stands under conditions of pollution by emissions from the Sredneuralsky copper smelting plant. 2015. № 2. P. 20-32.
5. Tarasov M.E. Role of large wood detritus in the carbon balance of forest ecosystems of the Leningrad Region. Abstract of Diss. ... Candidate of Biological Sciences St. Petersburg, 1999. 21 p.
6. Methods of determining the reserves and mass of wood detritus based on forest management data / Ministry of natural resources of the Russian Federation. [Krankina O.N., Povarov E.D.]. Pushkino: All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forest Economy Mechanization, 2002. 44 [1] p.: ill, tabl.; 20 cm.; ISBN 5-94219-206-7.
7. Malysheva N.V., Filipchuk A.N., Zolina T.A., Silnyagina G.V. Quantitative assessment of wood detritus reserves in the forests of the Russian Federation according to the data of the GIL. 2019. № 1. P. 101-120
8. Effects of Fire Severity and Woody Debris on Tree Regeneration for Exploratory Well Pads in Jack Pine (*Pinus banksiana*) / Filicetti AT, LaPointe RA, Nielsen SE. // *Forests*. *Forests*. 2021. 12(10).1330. <https://doi.org/10.3390/f12101330>
9. Dufour-Pelletier S, A. Tremblay J, Hébert C, Lachat T, Ibarzabal J. Testing the Effect of Snag and Cavity Supply on Deadwood-Associated Species in a Managed Boreal Forest. *Forests*. 2020; 11(4):424. <https://doi.org/10.3390/f11040424>
10. Wang H, Zhang L, Deng W, Liu J, Wu C, Zhang Y, Liu Y. Habitat Significantly Affect CWD Decomposition but No Home-Field Advantage of the Decomposition Found in a Subtropical Forest, China. *Forests*. 2022; 13(6):924. <https://doi.org/10.3390/f13060924>
11. Pinno BD, Das Gupta S. Coarse Woody Debris as a Land Reclamation Amendment at an Oil Sands Mining Operation in Boreal Alberta, Canada. *Sustainability*. 2018; 10(5):1640. <https://doi.org/10.3390/su10051640>

12. Shvidenko A., Mukhortova L., Kapitsa E., Kraxner F., See L., Pyzhev A., Gordeev R., Fedorov S., Korotkov V., Bartalev S. et al. A Modelling System for Dead Wood Assessment in the Forests of Northern Eurasia. *Forests*. 2023;14(1):45. <https://doi.org/10.3390/f14010045>

13. Обзор современного вторичного ареала Уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на территории Российской Федерации / С.А. Кривец, И.А. Керчев, Э.М. Бисирова и др. // Российский журнал биологических инвазий. 2024. Т. 17, № 1. С. 49-69. DOI: 10.35885/1996-1499-17-1-49-69

14. Буланова О.С., Загорданская О.А. Популяционные показатели уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf. (*Coleoptera: Curculionidae*) в насаждениях Боготольского лесничества Красноярского края // Современные проблемы лесозащиты и пути их решения: Материалы II Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию со дня рождения профессора Николая Ильича Федорова и 90-летию кафедры лесозащиты и древесиноведения (г. Минск, 30 ноября 2020 г.) / Под ред. В.Б. Звягинцева, М.О. Середич. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2020. С. 59-63

15. Доценко А.И., Шабалина О.М. Состояние растительности в очагах массового размножения уссурийского полиграфа в национальном парке «Красноярские Столбы» // Интеграция науки и образования: современные проблемы, достижения и инновации в области экологии и устойчивого развития: Материалы научной конференции: электронное издание (г. Красноярск, 1-3 ноября 2022 г.) / Сибирский федеральный университет. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. С. 48-50

16. Дебков Н.М. Новый тип энтомогенной сукцессии в пихтовых лесах Сибири // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 3 (35). С. 5-15. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/1

17. Debkov N. Natural regeneration in Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) forests subjected to invasion of the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandf.) / N. Debkov // *Forestry Studies*. 2019. Vol. 70, № 1. Pp. 44-57. DOI: 10.2478/fsmu-2019-0004

Информация об авторах

Алина Андреевна Андропова, аспирант кафедры лесного хозяйства и природопользования, младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем»; SPIN-код: 8842-7609, Scopus Author ID: 57486016700, ORCID: 0000-0001-7079-0819, economics25192715@gmail.com

Андрей Андреевич Вайс, д-р с.-х. наук, профессор кафедры лесного хозяйства и природопользования, ведущий научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем»; SPIN-код: 6136-9786; Scopus Author ID: 57211205270, ORCID: 0000-0003-4965-3670, vais6365@mail.ru

Павел Владимирович Михайлов, канд. с.-х. наук., заведующий кафедрой «Кафедра лесного хозяйства и природопользования», ведущий научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем»; SPIN-код: 3337-8195, Scopus Author ID: 57219098463, ORCID: 0000-0003-3967-0709, mihaylov.p.v@mail.ru

Виктор Николаевич Немич, канд. с.-х. наук., доцент кафедры «Кафедра лесного хозяйства и природопользования», старший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем»; SPIN-код: 1595-8393; Scopus Author ID: 57216963386; ORCID: 0000-0001-8700-532X; nvn-16@yandex.ru

Никита Андреевич Соклаков, магистрант кафедры «Кафедра лесного хозяйства и природопользования», младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем»; ORCID: 0009-0005-9785-2107, Soclacov@mail.ru;

Александра Игоревна Мельник, аспирант кафедры «Кафедра лесного хозяйства и природопользования», младший

12. Shvidenko A., Mukhortova L., Kapitsa E., Kraxner F., See L., Pyzhev A., Gordeev R., Fedorov S., Korotkov V., Bartalev S. et al. A Modelling System for Dead Wood Assessment in the Forests of Northern Eurasia. *Forests*. 2023; 14(1):45. <https://doi.org/10.3390/f14010045>

13. Review of the modern secondary area of the Ussuri polygraph (*Polygraphus proximus* Blandford) on the territory of the Russian Federation / S.A. Krivets, I.A. Kerchev, E.M. Bisirova [and others] // *Russian Journal of Biological Invasions*. 2024. V. 17, No 1. P. 49-69. DOI: 10.35885/1996-1499-17-1-49-69

14. Bulanova O.S., Zakordanskaya O.A. Population indicators of the Ussuri polygraph *Polygraphus proximus* Blandf. (*Coleoptera: Curculionidae*) in the plantations of the Bogotolsky forestry of the Krasnoyarsk territory // Modern problems of forest protection and ways of their solution: Materials of the II International Scientific and Practical International Conference dedicated to the 95th anniversary of the birth of Professor Nikolai Ilyich Fedorov and the 90th anniversary of the Department of Forest Protection and Wood Science, Minsk, November 30-04, 2020 / Edited by V.B. Zvyagintsev, M.O. Seredich. Minsk: Belarusian State Technological University, 2020. – P. 59-63.

15. Dotsenko A.I., Shabalina O.M. The state of vegetation in the foci of mass reproduction of the Ussuri polygraph in the national park “Krasnoyarsk Stolby” // Integration of science and education: modern problems, achievements and innovations in the field of ecology and sustainable development: materials of the scientific conference; electronic edition, Krasnoyarsk, November 01-03, 2022 / Siberian Federal University. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2022. P. 48-50.

16. Debkov N.M. New type of entomogenic succession in the fir forests of Siberia // *Forestry Journal*. 2019. V. 9, No 3(35). P. 5-15. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/1.

17. Debkov N. Natural regeneration in Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) forests subjected to invasion of the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandf.) / N. Debkov // *Forestry Studies*. 2019. Vol. 70, No. 1. P. 44-57. DOI: 10.2478/fsmu-2019-0004.

Information about the authors

Alina A. Andronova, postgraduate student of the Department of Forestry and Environmental Management, Junior Researcher of the Laboratory of Forest Ecosystems; SPIN-code: 8842-7609, Scopus Author ID: 57486016700, ORCID: 0000-0001-7079-0819, economics25192715@gmail.com

Andrey A. Weiss, DSs. (Agro), Professor of the Department of Forestry and Environmental Management, Leading Researcher of the Laboratory of Forest Ecosystems; SPIN-code: 6136-9786; Scopus Author ID: 57211205270, ORCID: 0000-0003-4965-3670, vais6365@mail.ru

Pavel V. Mikhailov, CSs (Agro), Head of the Department of Forestry and Environmental Management, Leading Researcher of the Laboratory of Forest Ecosystems, SPIN-code: 3337-8195, Scopus Author ID: 57219098463, ORCID: 0000-0003-3967-0709, mihaylov.p.v@mail.ru

Victor N. Nemich, CSs (Agro), Associate Professor of the Department of Forestry and Nature Management, Senior Researcher of the Laboratory of Forest Ecosystems; SPIN-code: 1595-8393; Scopus Author ID: 57216963386; ORCID: 0000-0001-8700-532X; nvn-16@yandex.ru

Nikita A. Soklakov, Master's Degree Student of the Department of Forestry and Environmental Management, Junior Researcher of the Laboratory of Forest Ecosystems, ORCID: 0009-0005-9785-2107, Soclacov@mail.ru;

Alexandra I. Melnik, postgraduate student of the Department of Forestry and Environmental Management, Junior Researcher

научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем»; SPIN-код: 4657-9048, Scopus Author ID: 57486433000, ORCID: 0000-0002-1673-1639; aleksandrana2013@gmail.com

Инна Анатольевна Дрейман, магистрант кафедры «Кафедра лесного хозяйства и природопользования», младший научный сотрудник лаборатории «Лесных экосистем», ORCID: 0009-0002-2385-5194, dreiman_ia@sibsau.ru;

Никита Викторович Козлов, аспирант кафедры «Кафедра лесного хозяйства и природопользования», SPIN-код: 1052-7456, ORCID: 0009-0000-7950-6650, nik.vik.kozlov.2000@gmail.com.

Вклад авторов

А.А. Андропова – участие в сборе полевых данных, анализ и обработка материалов, подготовка первоначального текста рукописи, формулировка выводов, визуализация данных, оформление библиографического списка.

А.А. Вайс – постановка проблемы и целей, разработка концепции эксперимента, анализ полученных данных, утверждение окончательного текста статьи.

П.В. Михайлов – общее научное руководство исследованием, привлечение финансирования (руководитель гранта FEFE-2024-0029).

В.Н. Немич – участие в сборе полевых данных, анализ литературных источников.

Н.А. Соклаков – участие в сборе полевых данных, обработка данных в электронной таблице.

А.И. Мельник – участие в полевых работах, измерительные исследования.

И.А. Дрейман – участие в сборе данных, подготовка сопроводительных документов.

Н.В. Козлов – разработка методологии экспериментальных исследований, взаимодействие с редакцией журнала (корреспондирующий автор).

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interest

Поступила в редакцию / Received 01.09.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received 15.04.2026

Принята к публикации / Accepted 22.04.2026

of the Laboratory of Forest Ecosystems; SPIN-code: 4657-9048, Scopus Author ID: 57486433000, ORCID: 0000-0002-1673-1639; aleksandrana2013@gmail.com

Inna A. Dreiman, Master's Degree Student of the Department of Forestry and Environmental Management, Junior Researcher of the Laboratory of Forest Ecosystems, ORCID: 0009-0002-2385-5194, dreiman_ia@sibsau.ru;

Nikita V. Kozlov, post graduate student, Department of Forestry and Environmental Management, SPIN-code: 1052-7456, ORCID: 0009-0000-7950-6650, nik.vik.kozlov.2000@gmail.com.

Author Contribution

A.A. Andronova – participation in the collection of field data, analysis and processing of materials, preparation of the initial text of the manuscript, formulation of conclusions, data visualization, design of the bibliography.

A.A. Weiss – formulation of the problem and goals, development of the concept of the experiment, analysis of the data obtained, approval of the final text of the article

P.V. Mikhailov – general scientific supervision of the study, attraction of financing (grant supervisor FEFE-2024-0029).

V.N. Nemich – participation in the collection of field data, analysis of literary sources.

N.A. Soklakov – participation in the collection of field data, data processing in a spreadsheet.

A.I. Melnik – participation in field work, measurement research.

I.A. Dreiman – participation in data collection, preparation of accompanying documents.

Kozlov N.V. – development of the methodology of experimental research, interaction with the editorial board of the journal (corresponding author).

Оригинальная статья

УДК 630*187: 630.23:630.174.754

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-124-132>



ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕСОВ И ОСОБЕННОСТИ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗОБНОВЛЕНИЯ ХВОЙНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ПОДЗОНЫ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ

А.А. Камашев^{1✉}, В.А. Савченкова²

¹ Мытищинский филиал МГТУ им Н.Э. Баумана; Московская область, г. Мытищи, Российская Федерация

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация

¹ aakamashev@rambler.ru

² v9651658826@yandex.ru; Orcid:0000-0001-8593-7887

Аннотация. В статье на основе биогеоценологической концепции академика В.Н. Сукачева представлена детальная типологическая структура лесов исследуемого района. Дана характеристика основных формаций хвойных (сосновых, еловых) и мелколиственных (березовых, осиновых) насаждений в пределах 6 групп типов лесорастительных условий: лишайниковых, зеленомошных, долгомошных, сфагновых, зеленомошно-сфагновых и травяно-сфагновых. Исследованы закономерности естественного возобновления главных хвойных пород как под пологом древостоев различной полноты, так и на сплошных вырубках. Ключевыми факторами, определяющими успешность лесовосстановления, являются: наличие и размещение обсеменителей (семенных деревьев); сохранение жизнеспособного подростка хвойных высотой более 0,5 м в процессе рубки; оптимальная полнота материнского древостоя (0,3-0,7); степень минерализации почвенной поверхности; контроль над процессом задернения. Установлено, что при условии сохранения не менее 65% предварительного подростка в ходе лесосечных работ возможно достижение эффективного естественного облесения вырубок хвойными породами на 69-80% площади без применения искусственного восстановления. Выявлены причины низкой степени прорастания семян на нарушенных лесных участках в условиях подзоны Северной тайги. Результаты подчеркивают приоритет сохранения естественного возобновления в таежных лесах за счет оптимизации лесосечных работ, учета ТЛУ-специфичных особенностей и семенных циклов, что позволит поддерживать хозяйственную ценность сосняков и ельников кисличных, черничных и брусничных типов. На основании полученных данных разработаны практические рекомендации по адаптации технологий лесозаготовок (направление валки, организация волоков, очистка мест рубок), направленные на максимальное сохранение подростка и улучшение условий для его роста. Это позволит существенно повысить долю хозяйственно-ценных хвойных пород в структуре формирующихся производных насаждений и сократить сроки восстановления коренных типов леса.

Ключевые слова: типы леса, хвойные насаждения, естественное лесовозобновление, таежная зона, типы условий местопрорастания

Для цитирования: Камашев А.А., Савченкова В.А. Типологические особенности лесов и особенности естественного возобновления хвойных пород в условиях подзоны Северной тайги. Природообустройство. 2026;Т.19(2):124-132. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-124-132>

Original article

TYPOLOGICAL FEATURES OF FORESTS AND FEATURES OF NATURAL REGENERATION OF CONIFEROUS SPECIES IN THE CONDITIONS OF THE NORTHERN TAIGA SUBZONE

A.A. Kamashev^{1✉}, V.A. Savchenkova²

¹ Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University; Moscow Region, Mytishchi, Russian Federation

² Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; Moscow, Russian Federation

¹ aakamashev@rambler.ru

² v9651658826@yandex.ru; Orcid:0000-0001-8593-7887

Abstract. The article presents a detailed typological structure of the forests in the studied area based on the biogeocoenological concept of Academician V.N. Sukachev. Characteristics of the main formations of coniferous (pine, spruce) and small-leaved (birch, aspen) stands are provided within six groups of forest site

types: lichen, green moss, long moss, sphagnum, green moss-sphagnum, and herb-sphagnum. The patterns of natural regeneration of the main coniferous species were studied both under the canopy of stands of varying density and on clear-cut areas. The key factors determining the success of reforestation were identified: the presence and distribution of seed trees, the preservation of viable coniferous undergrowth taller than 0.5 m during logging, the optimal density of the parent stand (0.3-0.7), the degree of soil surface mineralization, and control over the process of turf formation. It was established that under the condition of preserving at least 65% of the advance growth during logging operations, effective natural afforestation of clear-cut areas by coniferous species on 69-80% of the area can be achieved without artificial restoration measures. The reasons for the low degree of seed germination on disturbed forest sites in the conditions of the Northern Taiga subzone were identified. The results highlight the priority of preserving natural regeneration in taiga forests by optimizing logging operations, considering forest site type-specific characteristics and seed cycles, which will help maintain the economic value of wood sorrel, bilberry, and cowberry types of pine and spruce forests. Based on the obtained data, practical recommendations were developed for adapting logging technologies (felling direction, skid trail layout, slash disposal), aimed at maximizing the preservation of undergrowth and improving conditions for its growth. This will significantly increase the proportion of economically valuable coniferous species in the structure of the forming secondary stands and reduce the recovery time for primary forest types.

Keywords: forest types, coniferous stands, natural regeneration, taiga zone, site condition types

For citation: Kamashev A.A., Savchenkova V.A. Typological features of forests and features of natural regeneration of coniferous species in the conditions of the Northern Taiga subzone. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):124-132. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-124-132>

Введение. В основу типологической характеристики исследуемых лесов положена биогеоценологическая классификация типов леса академика В.Н. Сукачева, наиболее полно отражающая взаимосвязь лесобразующих факторов в условиях таежной зоны. Классификация построена с учетом совокупности всех видов растительности на территории, занимаемой насаждениями, и отражает целостность биогеоценоза. Наименование типа леса составляется из названия преобладающей породы и характерного представителя напочвенного покрова (например, сосняк лишайниковый, ельник кисличный и т.д.)^{1,2}.

Цель исследований: на основе биогеоценологической концепции академика В.Н. Сукачева представить детальную типологическую структуру лесов исследуемого района, дать характеристику основных формаций хвойных (сосновых, еловых) и мелколиственных (березовых, осиновых) насаждений в пределах 6 групп типов лесорастительных условий.

Материалы и методы исследований. Исследования проведены на территории северо-таежной зоны России в период 1980-1990-х гг. на основе материалов государственного

лесоустройства (далее – ГЛС) масштаба 1 : 10000-1 : 25000, включающих в себя таксационные описания 1,5 тыс. выделов спелых, перестойных и приспевающих насаждений общей площадью 45 тыс. га. Обследовано 320 постоянных и временных пробных площадей (далее – ППП) размером 0,04-0,25 га, расположенных в ключевых группах типов лесорастительных условий местопроизрастания (далее – ТЛУ): лишайниковых, брусничных, черничных (кисличников), долгомошных, сфагновых и травяно-болотных. Выбор ППП осуществлялся с учетом репрезентативности формаций (сосняки – 42%, ельники – 28%, лиственничники – 12%, березняки и осинники – 18%) и градиента увлажнения (от сухих песчаных террас до заболоченных понижений)^{3,4}.

Типологическая классификация лесов выполнена по биогеоценологической системе академика В.Н. Сукачева с использованием таксационно-геоботанических описаний. Учитывались доминирующая порода (I-II ярусы, >70% в составе), видовой состав напочвенного покрова (проективное покрытие >40%), характер увлажнения (по гидротопической шкале) и почвенные условия (морфотипы: подзолистые, дерново-глебовые, торфяно-глебовые). Наименования типов леса формировались по схеме «Преобладающая

¹ Стороженко В.Г. Естественное возобновление в коренных разновозрастных сосняках Европейской тайги России // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 5. С. 30-37.

² Эфа Д.Э. Лесовосстановление на вырубках в подзоне северной тайги Ханты-Мансийского автономного округа – Югра // Вестник биотехнологий. 2018. № 1. URL: <http://bio/beonrails.ru/2018/1/144> (дата обращения: 26.12.2025).

³ Атлас Республики Коми. М.: Феория, 2011. 448 с.

⁴ Лесохозяйственный регламент Сосногорского лесничества Республики Коми: утв. приказом Министерства промышленности, природных ресурсов, энергетики и транспорта Республики Коми от 15 декабря 2017 г. № 2809/1.

порода + индикаторный вид(ы) напочвенного покрова» (например, сосняк бруснично-зеленомошный – *Pinus sylvestris* + *Vaccinium vitis-idaea* + *Pleurozium schreberi*). Группировка ТЛУ осуществлялась на основании выделения 6 классов нарушенности, которые диагностируются при превышении порога в 2% повреждения в процессе эксплуатации лесных участков от суммарного размера их площади. К выделенным классам относятся лишайниковые, зеленомошные, долгомошные, сфагновые, зеленомошно-сфагновые и травяно-сфагновые типы.

Оценка естественного лесовозобновления под пологом насаждений выполнялась в соответствии с «Инструкцией по сохранению подроста и молодняка хозяйственно-ценных пород при разработке лесосек и приемке от лесопользователей вырубок с проведенными мероприятиями по восстановлению леса» (приказ Минлеспрома СССР 1984 г. № 456). На каждой ППП подсчитывалось количество самосева (<0,5 м), подроста (0,5-1,5 м; >1,5 м), определялась его жизнеспособность (по критериям: наличие иголочной массы >70%, корневая система >20 см, прирост >5 см/год), полнота древостоев (0,1-0,9 с шагом 0,1) и сомкнутость полога. Фиксировались запасы семян (кг/га), всхожесть (% по лабораторным тестам) и частота семенных лет по архивным данным метеостанций⁵.

Для анализа динамики на вырубках обследовано 185 лесосек сплошных рубок (площадь – 2-15 га, возраст – 1-15 лет), выполненных в 1975-1985 гг. по технологиям: сплошная рубка (72%); узкополосная (18%); выборочная санитарная (10%). Оценивались плотность молодняков (тыс. шт/га по породам), высотные классы (по шкале Закхарисена), преобладание пород (% в главном ярусе), состояние почвы (минерализация, %; задерненность, %) и микроклиматические параметры (влажность почвы, освещенность). Статистическая обработка данных выполнена в пакетах «Статистика» и Excel: расчет средних ($M \pm \sigma$), коэффициентов вариации (C_v), корреляций (r) между полнотой древостоев, сохранностью подроста и успехом возобновления ($p < 0,05$)⁶.

⁵ Инструкция по сохранению подроста и молодняка хозяйственно-ценных пород при разработке лесосек и приемке от лесопользователей вырубок с проведенными мероприятиями по восстановлению леса: утв. приказом Минлеспрома СССР. 1984 г. № 456.

⁶ Проект Министерства лесного хозяйства Коми АССР организации и развития лесного хозяйства Сосногорского механизированного лесхоза Министерства лесного хозяйства РСФСР. Вологда, 1982. 582 с.

Полевые работы включали в себя геоботанические описания (шкала Браун-Бланке), подсчет запасов семян методом коллекторов (10 × 10 м, n = 20 на ППП). Все измерения стандартизированы по ГОСТ 56.01.11-89 «Лесоустройство. Термины и определения»⁷.

Результаты и их обсуждение. В ходе исследований рассмотрена типологическая структура лесов по биогеоэкологической классификации.

На основе анализа 1,5 тыс. таксационных описаний выделено 7 основных формаций с 85 подтипами леса по системе В.Н. Сукачева. Сосновые насаждения (*Pinus sylvestris*) доминируют по площади (42%), за ними следуют ельники (*Picea obovata*, 28%), лиственничники (*Larix sibirica*, 12%), березняки (*Betula pendula* + *B. pubescens*, 12%), кедровники (*Pinus sibirica*, 3%), пихтарники (*Abies sibirica*, 2%) и осинники (*Populus tremula*, 1%). Классификация по 6 группам ТЛУ представлена в таблице 1.

Сосновые древостои занимают первое место по объему вырубок (35% от общего запаса древесины). Наиболее распространены сосняки бруснично-зеленомошные (18% площади), ельники чернично-зеленомошные (12%) и кисличники (9%)⁸.

Исследованы экологическая приуроченность и смена пород для ТЛУ:

- лишайниковой группы (песчаные террас, влажность почвы 15-20%) – заняты коренными сосняками с подростом сосны 25-30 тыс. шт/га;
- брусничной группы (песчаные увалы) – характеризуются сменой сосны на ель (5,9%) и березу (17,5%);
- ельники кисличные (суглинистые плато) – замещаются березой (20,5%) и осинной (31,4%);
- черничной группы (среднеподзолистые супеси) – восстанавливаются елью под пологом сосняков;
- травяно-болотной, долгомошной и сфагновой групп (торфяно-глебовые почвы) – формируют смешанные лиственнично-хвойные насаждения после рубок (табл. 2).

В ходе работы также исследовано возобновление под пологом насаждений и на вырубках.

Плотность хвойного подроста под пологом спелых и перестойных насаждений составляет 25-50 тыс. шт/га при полноте 0,3-0,7 ($r = -0,68$,

⁷ ГОСТ 56.01.11-89 «Лесоустройство. Термины и определения».

⁸ Проект организации и ведения лесного хозяйства Сосногорского лесхоза Комитета лесов Республики Коми: Объяснительная записка. Вологда, 1995. 227 с.

Таблица 1. Основные типы леса по группам ТЛЮ
Table 1. Main types of forest by groups of TFCs

Формация / Formation	Лишайни-ковые / Lichenseae	Зеленомошные / Green-moss	Долгомошные / Long-moss	Сфагновые / Sphagnum	Зеленомошно-сфагновые / Green-moss-sphagnum	Травяно-сфагновые / Grass-sphagnum
Сосняки (<i>Pinus sylvestris</i>)	Воронично-лишайниковый, бруснично-нолишайниковый (4 подтипа) / <i>Crowberry-lichen, lingonberry-lichen</i> (4 subtypes)	Бруснично-чернично-голубично-зеленомошные (4) / <i>Lingonberry, blueberry, bilberry-green moss</i> (4)	Кустарничково-чернично-голубично-мошные (2) / <i>Shrub-blueberry-wild rosemary – long moss</i> (2)	Кустарничково-багульничково-сфагновые (3) / <i>Shrub-Lectum-Sphagnum</i> (3)	Кустарничково-голубично-зеленомошно-сфагновые (3) / <i>Shrub-blueberry-green-moss-sphagnum</i> (3)	Вахово-пушицево-сфагновые (2) / <i>Rotational, downy-sphagnum</i> (2)
(<i>Picea obovata</i>)	Зеленомошно-лишайниковый (1) / <i>Green moss-lichen</i> (1)	Кисличный, черничный, голубичный и др. (9) / <i>Sorrel, blueberry, bilberry, etc.</i> (9)	Чернично-голубично-багульничково-долгомошные (8) / <i>Bilberry, blueberry, wild rosemary-longmoss</i> (8)	Сфагновый, ерничково-багульничково-сфагновые (10) / <i>Sphagnum, уerņikov-, lectum-sphagnum</i> (10)	Вейниково-вахово-сфагновые (2) / <i>Vein-, rotational-sphagnum</i> (2)	Папоротниково-аконитово-вейниковый (8) / <i>Fern, asonite-vein</i> (8)
Лиственничники (<i>Larix sibirica</i>)	Лишайниковый, ерничковолишайниковый (2) / <i>Lichen, Yernikovolichen</i> (2)	Чернично-бруснично-зеленомошные (5) / <i>Bilberry, cowberry-green moss</i> (5)	Чернично-долгомошный (1) / <i>Blueberry-longmoss</i> (1)	–	–	Травянистый реликтовый, крупнотравный (2) / <i>Herbaceous, relict, large-grass</i> (2)
Кедровники (<i>Pinus sibirica</i>)	–	Чернично-зеленомошный (2) / <i>Blueberry-greenmoss</i> (2)	–	Голубично-багульничково-сфагновые (2) / <i>Blueberry, rosemary-sphagnum</i> (2)	–	–
Пихтарники (<i>Abies sibirica</i>)	–	Чернично-разнотравно-зеленомошные (2) / <i>Blueberry, forb-greenmoss</i> (2)	–	–	–	Редкотравный, папоротниковый (2) / <i>Rare grass, fern</i> (2)
Березняки (<i>Betula spp.</i>)	Лишайни-ковый, можжевелово-ерничково-ый (5) / <i>Lichen, juniper-yerņikovu</i> (5)	Чернично-можжевелово-луговиковые (4) / <i>Blueberry, juniper-meadow</i> (4)	Можжевелово-голубично-долгомошные (5) / <i>Juniper, blueberry-longmoss</i> (5)	Морошково-ерничково-сфагновые (2) / <i>Cloudberry, yerņikov-sphagnum</i> (2)	Разнотравно-зеленомошно-сфагновый (1) / <i>Forb-greenmoss-sphagnum</i> (1)	Вейниковый, разнотравный, костречовый (7) / <i>Reed, forb, brome</i> (7)
Осинники (<i>Populus tremula</i>)	–	–	–	–	–	Вейниковый (1) / <i>Reedy</i> (1)

Таблица 2. Смена пород по группам ТЛУ (% от площади, год ГЛС)

Table 2. Change of species by groups of TFS (Types of Forest Sites)
(% of area, year of SFM (State Forest Management))

Группа ТЛУ / Group TFC	Сосна → Ель / Pine → Spruce	Сосна → Береза / Pine → Birch	Ель → Береза / Spruce → Birch	Ель → Осина / Spruce → Aspen	Общая смена хвойных / General change of conifers
Лишайниковые / <i>Lichenaceae</i>	2,1	8,4	–	–	10,5
Брусничные / <i>Lingonberries</i>	5,9	17,5	12,3	8,7	44,4
Черничные / <i>Blueberry</i>	3,2	11,8	15,6	22,1	52,7
Кисличные / <i>Sour</i>	–	–	20,5	31,4	51,9
Долгомошно- и сфагновые / <i>Longmoss and sphagnum</i>	4,8	14,2	18,9	16,3	54,2

$p < 0,01$). Наиболее жизнеспособен подрост $> 0,5$ м (выживаемость – 80% после рубки). Семеношение сосны составляет 0,5-6 кг/га (60-750 тыс. шт.), ели – 1-11 кг/га (120-1400 тыс. шт.); всхожесть – 60-95% (табл. 3). Покров долгомошных и сфагновых мхов снижает прорастание на 60-70%.

По результатам опытного эксперимента и многолетнего производственного опыта можно утверждать, что узкопасечная технология сохраняет 60-80% подроста, обеспечивая облесение 69,2% вырубок без мер содействия, и 80% – с минерализацией почвы.

На 185 вырубках (общая площадь – 1250 га) удовлетворительное возобновление хвойными составляет 60,1%, мягколиственными – 33,6%, недостаточное – 0,6%. Сосняки лишайниковые и сфагновые восстанавливаются за 5-10 лет при наличии обсеменителей, еловые вырубki – за 10-20 лет с преобладанием березы/осины (10-15 тыс. шт/га в 1-3 года). Задернение злаками (вейник,

луговик) замедляет еловое возобновление на 15-20 лет. Тонкомер ели ($d = 8$ см) снижает отпад подроста в 2-3 раза (табл. 4).

Результаты и их обсуждение. Полученные результаты типологической характеристики лесов полностью соответствуют принципам биогеоценотической классификации В.Н. Сукачева, подчеркивающим целостность лесного биогеоценоза как отражение взаимодействия эдификаторов (древесных пород), напочвенного покрова и абиотических факторов (почвы, увлажнения). Доминирование сосняков (42%) и ельников (28%) в структуре насаждений обусловлено их высокой конкурентоспособностью в условиях таежной зоны с преобладанием подзолистых и глеевых почв. Широкий спектр подтипов по 6 группам ТЛУ отражает гидротопический градиент от сухих песчаных террас (лишайниковые ТЛУ) до заболоченных впадин (сфагновые ТЛУ), что согласуется с данными классических исследований

Таблица 3. Параметры семеношения и возобновления

Table 3. Parameters of seeding and renewal

Порода / Breed	Семена, кг/га / Seeds, kg / ha	Всходы, шт./м ² / Seedlings, pcs / m ²	Подрост $> 0,5$ м, тыс./га / Undergrowth $> 0,5$ m, thousands / ha	Выживаемость после рубки, % Survival rate after felling, %	Стандартное отклонение, $\mu \pm 2\sigma$ / Standard deviation, $\mu \pm 2\sigma$
Сосна / Pine	0,5-6,0	30-100	15-30	70-85	2,4
Ель / Spruce	1,0-11,0	40-120	20-40	75-90	1,9

Таблица 4. Эффективность возобновления по типам леса (тыс. шт./га, 5 лет после рубки)

Table 4. Efficiency of regeneration by forest type (thousand pieces/ha, 5 years after felling)

Тип лесам / Type of forests	Хвойные / Conifers	Мягколиственные / Soft-leaved	Сохраненный подрост / Preserved undergrowth	Удовлетворительное, % / Satisfactory, %
Сосняки лишайниковые / <i>Lichen pine forests</i>	4,2 ± 1,1	1,8 ± 0,	12-18	78
Сосняки черничные / <i>Blueberry pine forests</i>	2,5 ± 0,8	3,4 ± 1,2	8-12	65
Ельники кисличные / <i>Sorrel spruce forests</i>	1,8 ± 0,5	5,2 ± 1,5	10-15	52
Ельники сфагновые / <i>Sphagnum spruce forests</i>	2,1 ± 0,7	4,8 ± 1,3	9-14	58

по типологии лесов Средней Сибири и Европейского севера.

Закономерности смены пород, выявленные в исследованиях (общая смена хвойных на мягколиственные – до 54% в сфагновых и долгомошных ТЛУ), подтверждают тенденцию листовного замещения в производных сообществах после антропогенных и природных нарушений. В брусничных и кисличных типах смена сосны/ели на березу (17,5-20,5%) и осину (31,4%) связана с повышенной светолюбивостью и быстрым ростом пионерных пород на свежих минеральных почвах, что отмечено в работах по динамике таежных лесов. В отличие от этого в черничных ТЛУ устойчивое предварительное возобновление ели под пологом сосняков (подрост – 20-40 тыс. шт/га) обеспечивает сохранность хвойного яруса, минимизируя листовное замещение (52,7%).

Параметры плодоношения хвойных пород (семена – 0,5-11 кг/га, всхожесть – 60-95%) и плотность подроста (25-50 тыс. шт/га) сопоставимы с данными многолетних наблюдений в северной тайге: цикличность семенных лет (3-7 лет) и высокая обсемененность территории способствуют потенциально успешному возобновлению. Однако низкая эффективность прорастания (30-100 шт/м²) обусловлена мохово-подстильным барьером (долгомошников и сфагнума), снижающим укоренение на 60-70%, как показано в экспериментах по лесовосстановлению. Отрицательная корреляция между полнотой древостоев и плотностью подроста ($r = -0,68$) подчеркивает роль светового режима: низко- и среднеполнотные насаждения (0,3-0,7) оптимальны для формирования жизнеспособного подроста высотой >0,5 м, выживаемость которого после рубки достигает 80%.

Динамика на вырубках демонстрирует высокую эффективность естественного возобновления в основных типах (78% удовлетворительных площадей в лишайниковых ТЛУ), где материнская порода поселяется за 5-10 лет при обсеменителях⁹. В еловых вырубках преобладание мягколиственных молодняков (33,6% общей площади) и замедление елового возобновления (10-20 лет) на задерненных участках обусловлены несовпадением рубок с семенными годами и конкуренцией злаков (вейник, луговик), формирующих дернину с плотностью 80-90%.

⁹ Нгуен Ван Зинь, Шахов А.Г. Естественное возобновление сосны обыкновенной на участках лесных культур // Экологические проблемы Арктики и северных территорий: Межвузовский сборник научных трудов. Архангельск, 2016. Вып. 19. С. 55-57.

Роль тонкомера ели ($d = 8$ см) в смягчении микроклимата и снижении отходов подроста (в 2-3 раза) подтверждает его значение как стабилизатора лесной среды аналогично эффектам в смешанных насаждениях.

Сохранение $\geq 65\%$ подроста при узкопосечной технологии обеспечивает облесение хвойными 69-80% вырубок, что превосходит показатели иной технологии при сплошных рубках (52-65%). Минерализация почвы и оставление обсеменителей повышают успех на 10-15%, устраняя моховый барьер и стимулируя налет семян. Эти меры соответствуют рекомендациям и современным подходам устойчивого лесопользования, минимизируя переход к малоценным листовным древостоям (до 20% смены хвойных)^{10,11}.

В целом результаты исследований подчеркивают приоритет сохранения естественного возобновления в таежных лесах за счет оптимизации лесосечных работ, учета ТЛУ-специфических особенностей и семенных циклов, что позволит поддерживать хозяйственную ценность сосняков и ельников кисличных, черничных и брусничных типов^{12,13}.

Выводы

Проведенные исследования типологической структуры лесов таежной зоны и закономерностей естественного лесовозобновления позволяют сформулировать следующие ключевые выводы и практические рекомендации.

1. *Типологическое разнообразие лесов.* На исследуемой территории по биогеоэкологической классификации В.Н. Сукачева выделено

¹⁰ Инструкция по сохранению подроста и молодняка хозяйственно ценных пород при разработке лесосек и приемке от лесозаготовителей вырубок с проведенными мероприятиями по восстановлению леса: утв. приказом Гослесхоза СССР от 8 декабря 1983 г. № 147.

¹¹ Башегуров К.А., Белов Л.А., Залесова Е.С., Залесов С.В. Лесоводственная эффективность минерализации почвы в условиях сосняка зеленомошно-ягодникового подзона северной тайги. Екатеринбург // Международный научно-исследовательский журнал / Уральский государственный лесотехнический университет. 2020. № 8 (98). Ч. 1. С. 186-191.

¹² Козубова Г.М., Таскаев А.И., Дегтев С.В. и др. Леса Республики Коми / Под ред. Г.М. Козубова, А.И. Таскаева / Г.М. Козубов, А.И. Таскаев, С.В. Дегтев, В.А. Мартыненко, И.В. Забоява, К.С. Бобкова, Э.П. Галенко. М.: Издательско-продюсерский центр «Дизайн. Информация. Картография», 1999. 332 с.

¹³ Основные положения по лесовосстановлению и лесоразведению в лесном фонде Российской Федерации: утв. приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 27 декабря 1993 г. № 344.

7 основных формаций (сосняки – 42%, ельники – 28%, лиственничники – 12%, березняки и осинники – 13%, кедровники и пихтарники – 5%) с 85 подтипами, распределенными по 6 группам ТЛЮ: лишайниковым, зеленомошным, долгомошным, сфагновым, зеленомошно-сфагновым и травяно-сфагновым. Сосновые и еловые насаждения кисличных, черничных и брусничных типов обладают наибольшей хозяйственной ценностью, занимая лидирующие позиции по объему вырубок (35% от общего запаса древесины).

2. *Закономерности смены пород.* Общая смена хвойных пород на мягколиственные (береза – 17,5-20,5%, осина – 31,4%) достигает 20-54% в зависимости от ТУМ, с максимумом в сфагновых и долгомошных группах (54,2%). В лишайниковых и брусничных ТЛЮ коренные сосняки сохраняют стабильность при наличии семенных деревьев; в кисличных и черничных типах предварительное возобновление елью под пологом сосняков минимизирует лиственное замещение (52,7%).

3. *Потенциал естественного возобновления под пологом.* Плотность хвойного подроста (25-50 тыс. шт/га) и плодоношение (сосна – 0,5-6 кг/га, ель – 1-11 кг/га; всхожесть – 60-95%) обеспечивают высокий потенциал восстановления при полноте древостоев 0,3-0,7. Наиболее жизнеспособен подрост высотой >0,5 м (выживаемость – 80% после рубки). Моховый покров снижает прорастание на 60-70%, что требует минерализации почвы¹⁴.

4. *Динамика на вырубках.* Удовлетворительное возобновление хвойными породами наблюдается на 60,1% площадей (сосняки лишайниковые – 78%, черничные – 65%); мягколиственные преобладают на 33,6% (еловые вырубки)^{15,16}. Срок восстановления составляет 3-10 лет при обсеменителях, до 20 лет – на задерненных участ-

ках. Узкопасечная технология сохраняет 60-80% подростка, обеспечивая облесение 69,2% вырубок без мер содействия и 80% – с минерализацией и обсеменителями.

5. *Практические рекомендации:*

– при лесосечных работах сохранять $\geq 65\%$ хвойного подростка любой высоты и весь тонкомер ели ($d = 8$ см), снижающий отпад в 2-3 раза и стабилизирующий микроклимат;

– планировать сплошные рубки в семенные годы хвойных (цикл 3-7 лет), оставлять обсеменители (5-10% площади) и проводить минерализацию почвы для устранения мохового барьера (долгомошники и сфагнум)¹⁷;

– в еловых и березовых вырубках применять рубки ухода для вывода ели в главный ярус; в сосновых типах стимулировать налет семян материнской породы;

– малоценные мягколиственные насаждения (возникшие после рубок/пожаров) переводить в хвойные путем искусственного лесовозобновления на 20% площадей.

Реализация предложенных мер позволит повысить долю хвойных пород в производных древостоях до 80%, обеспечить устойчивое лесопользование и сохранить биологическое разнообразие таежных экосистем в соответствии с принципами лесного законодательства и современными стандартами лесного хозяйства. Полученные данные могут быть использованы для корректировки лесостроительных проектов и разработки региональных программ лесовосстановления^{18,19,20}.

¹⁷Залесова Е.С., Белов Л.А., Залесов С.В. и др. Влияние типа леса и полноты древостоев на обеспеченность подростом спелых и перестойных сосняков подзоны северной тайги // Международный научно-исследовательский журнал / Е.С. Залесова, Л.А. Белов, С.В. Залесов, Ф.Т. Тимербулатов, А.И. Чермных. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2019. № 11 (89). Ч. 2. С. 37-41.

¹⁸Лесохозяйственный регламент Сосногорского лесничества Республики Коми: утв. приказом Министерства промышленности, природных ресурсов, энергетики и транспорта Республики Коми от 15 декабря 2017 г. № 2809/1.

¹⁹Методические указания по планированию, проектированию, приемке, инвентаризации, списанию объектов лесовосстановления и лесоразведения и оценке эффективности мероприятий по лесовосстановлению и лесоразведению, разработанные ВНИИЛМ – отделом, лесовосстановления, семеноводства и механизации, 2011.

²⁰Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления: приказ Минприроды России от 29 декабря 2021 г. № 1024

Список использованных источников

1. Стороженко В.Г. Естественное возобновление в коренных разновозрастных сосняках Европейской тайги России // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 5. С. 30-37. EDN: JLQCF
2. Эфа Д.Э. Лесовосстановление на вырубках в подзоне северной тайги Ханты-Мансийского автономного округа – Югра // Вестник биотехнологий. 2018. № 1. URL: <http://bio/beonrails.ru/2018/1/144> (дата обращения: 26.12.2025)
3. Атлас Республики Коми. М.: Феория, 2011. 448 с.
4. Лесной план Республики Коми: утв. распоряжением главы Республики Коми от 1 мая 2020 г. № 106-р
5. Лесохозяйственный регламент Сосногорского лесничества Республики Коми: утв. приказом Министерства промышленности, природных ресурсов, энергетики и транспорта Республики Коми от 15 декабря 2017 г. № 2809/1
6. Инструкция по сохранению подроста и молодняка хозяйственно-ценных пород при разработке лесосек и приемке от лесопользователей вырубок с проведенными мероприятиями по восстановлению леса: утв. приказом Минлеспрома СССР. 1984 г. № 456. URL: https://www.glavbukh.ru/npd/edoc/97_470925
7. Проект организации и развития лесного хозяйства Сосногорского механизированного лесхоза Министерства лесного хозяйства Коми АССР Министерства лесного хозяйства РСФСР. Вологда, 1982. 582 с.
8. ГОСТ 56.01.11-89 «Лесоустройство. Термины и определения».
9. Проект организации и ведения лесного хозяйства Сосногорского лесхоза Комитета лесов Республики Коми: Объяснительная записка. Вологда, 1995. 227 с.
10. Нгуен Ван Зинь., Шахов А.Г. Естественное возобновление сосны обыкновенной на участках лесных культур // Экологические проблемы Арктики и северных территорий: Межвузовский сборник научных трудов. 2016. Вып. 19. С. 55-57.
11. Инструкция по сохранению подроста и молодняка хозяйственно-ценных пород при разработке лесосек и приемке от лесозаготовителей вырубок с проведенными мероприятиями по восстановлению леса: утв. приказом Гослесхоза СССР от 8 декабря 1983 г. № 147.
12. Башегуров К.А., Белов Л.А., Залесова Е.С., Залесов С.В. Лесоводственная эффективность минерализации почвы в условиях сосняка зеленомошно-ягодникового подзона северной тайги. // Международный научно-исследовательский журнал. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2020. № 8 (98). Ч. 1. С. 186-191.
13. Козубова Г.М. Леса Республики Коми / Под ред. Г.М. Козубова, А.И. Таскаева. М.: Издательско-продюсерский центр «Дизайн. Информация. Картография», 1999. 332 с.
14. Основные положения по лесовосстановлению и лесоразведению в лесном фонде Российской Федерации: утв. приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 27 декабря 1993 г. № 344.
15. Ведерников Е.А., Залесов С.В., Залесова Е.С. и др. Обеспеченность подростом спелых и перестойных темнохвойных насаждений Пермского края / Е.А. Ведерников, С.В. Залесов, Е.С. Залесова, А.Г. Магасумова, О.В. Толкач // Лесной журнал. 2019. № 3. С. 32-42. EDN: SAZQAB
16. Нгуен Ван Зинь, Шагов А.Г., Ву Ван Хунг. Особенности самовозобновления сосны обыкновенной // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы II Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 24-26 мая 2017 г. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2017. Т. 1. С. 40-42.
17. Лейнонен Т., Турттайнен М., Сиеккинен А. Лесовосстановление на Северо-Западе России и сравнение с Финляндией. Комментарии финских специалистов: Пер. с фин. С. Лейнонен. Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии, 2009. 40 с.

References

1. Storozhenko V.G. Natural Regeneration in Native Mixed-Age Pine Forests of the European Taiga of Russia // Forestry Bulletin, 2019. Vol. 23. No. 5. P. 30-37.
2. Efa D.E. Reforestation on clearings in the northern taiga subzone of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra / D.E. Efa // Bulletin of Biotechnology: scientific journal. 2018. – No. 1 URL: <http://bio/beonrails.ru/2018/1/144>. (Date of access: 26.12.2025).
3. Atlas of the Komi Republic. – Moscow: Feoria, 2011. 448 p.
4. Forest Plan of the Komi Republic, approved by Decree of the Head of the Komi Republic dated May 1, 2020, No. 106-r.
5. Forest Management Regulations of the Sosnogorsk Forestry District of the Komi Republic, approved by Order of the Ministry of Industry, Natural Resources, Energy and Transport of the Komi Republic dated December 15, 2017, No. 2809/1.
6. Instructions for the Preservation of Undergrowth and Young Growth of Commercially Valuable Species During Logging Site Development and Acceptance of Cleared Areas from Forest Users with Implemented Reforestation Measures, approved by Order of the Ministry of the Timber Industry of the USSR in 1984, No. 456.
7. Project for the Organization and Development of Forestry of the Sosnogorsk Mechanized Forestry Enterprise of the Ministry of Forestry of the Komi ASSR of the Ministry of Forestry of the RSFSR. Vologda, 1982. 582 p.
8. GOST 56.01.11-89 “Forest Management. Terms and Definitions”.
9. Project for the Organization and Management of Forestry of the Sosnogorsk Forestry Enterprise of the Forestry Committee of the Komi Republic. Explanatory Note. Vologda, 1995. 227 p.
10. Nguyen Van Zin. Natural regeneration of Scots pine in forest plantations / Nguyen Van Zin A.G. Shakhov // Environmental problems of the Arctic and northern territories: interuniversity collection of scientific papers. – Arkhangelsk, 2016. Issue 19. P. 55-57.
11. Instructions for the Preservation of Undergrowth and Young Growth of Commercially Valuable Species During Logging Site Development and Acceptance of Cleared Areas from Loggers with Implemented Reforestation Measures, approved by Order of the USSR State Committee for Forestry (Gosleskhoz) dated December 8, 1983, No. 147.
12. Bashegurov K.A., Belov L.A., Zalesova E.S., Zalesov S.V. Forestry efficiency of soil mineralization in the conditions of the green moss-berry pine forest of the northern taiga subzone. Yekaterinburg: Ural State Forestry Institute. Univ., International Scientific Research Journal, 2020, No. 8 (98), Part 1 (August), P. 186-191.
13. Kozubova G.M. The Forests of the Komi Republic / Edited by G.M. Kozubov, A.I. Taskayev / G.M. Kozubov, A.I. Taskayev, S.V. Degteva, V.A. Martynenko, I.V. Zaboeva, K.S. Bobkova, E.P. Galenko – Moscow: Publishing and Production Center “Design. Information. Cartography”, 1999. – 332 p.
14. Basic Provisions for Reforestation and Afforestation in the Forest Fund of the Russian Federation, approved by Order of the Federal Forestry Service of Russia dated December 27, 1993, No. 344.
15. Vedernikov E.A., Zalesov S.V., Zalesova E.S., Magasumova A.G., and Tolkach O.V. The Availability of Undergrowth in Mature and Overmature Dark Coniferous Plantations in the Perm Region // Lesnoy Zhurnal. 2019. No. 3. P. 32-42.
16. Nguyen Van Sin A.G. Shagov, Vu Van Hékk. Eiginleikar sjálfsendurnýjunar á algengum furu / / Skógum Rússlands: stjórnmal, iðnaður, vísindi, menntun: Málsmeðferð Á li Alþjóðlegu Vísinda-og Tækniráðstefnunni. Ráðstefna, Sankti Pétursborg, 24. – 26. Maí 2017, Sankti Pétursborg: Forlag Tækniháskólans Í Sankti Pétursborg, 2017. Vol. 1. bls. 40-42

18. Залесова Е.С., Белов Л.А., Залесов С.В. и др. Влияние типа леса и полноты древостоев на обеспеченность подростом спелых и перестойных сосняков подзоны северной тайги / Е.С. Залесова, Л.А. Белов, С.В. Залесов, Ф.Т. Тимербулатов, А.И. Чермных // Международный научно-исследовательский журнал. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2019. № 11 (89). Ч. 2. С. 37-41. EDN: ZLJTUQ

19. Методические указания по планированию, проектированию, приемке, инвентаризации, списанию объектов лесовосстановления и лесоразведения и оценке эффективности мероприятий по лесовосстановлению и лесоразведению: Монография. М.: ФГУ ВНИИЛМ, 2011. 98 с. EDN: QLCJXX

20. Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления: приказ Минприроды России от 29 декабря 2021 г. № 1024. URL: <https://docs.cntd.ru/document/728111110>

Информация об авторах

Вера Александровна Савченкова, д-р с.-х. наук, профессор кафедры «Лесные культуры, селекция и дендрология» Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана; Orcid: 0000-0001-8593-7887; ResearcherID: Y-3167-2019; ResearcherID: Y-3167-2019; SPIN (РИНЦ) 5226-3490; AuthorID: 426848; v9651658826@yandex.ru

Александр Алексеевич Камашев, аспирант кафедры «Лесные культуры, селекция и дендрология» Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана; aakamashev@rambler.ru

Вклад авторов

В.А. Савченкова – общее научное руководство, постановка цели и задач исследования; разработка концепции; формулирование выводов.

А.А. Камашев – работа с источниками литературы и подготовки первичной библиографии, участие в обсуждении результатов.

Поступила в редакцию / Received 13.01.2026

Поступила после рецензирования / Received 18.03.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 06.04.2026

17. Leinonen T., Turtainen M., Siikinen A. Forest Restoration in North-West Russia and Comparison with Finland. Comments by Finnish Experts / Translated from Finnish by S. Leinonen. Joensuu. Finnish Forest Research Institute, 2009. 40 p.

18. Zalesova E.S., Belov L.A., Zalesov S.V., Timerbulatov F.T., Chermnykh A.I. Influence of forest type and abundance of stands on forest availability of ripe and overgrown pine forests of the northern taiga subzone. Yekaterinburg: Ural State Forestry Institute. Univ., International Scientific Research Journal, 2019, No. 11 (89), Part 2 (November), P. 37-41.

19. Methodological Guidelines for Planning, Designing, Acceptance, Inventory, Write-off of Reforestation and Afforestation Objects, and Assessment of the Effectiveness of Reforestation and Afforestation Measures, developed by VNIILM (All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization) – Department of Reforestation, Seed Science and Mechanization, 2011.

20. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated December 29, 2021, No. 1024 “On Approval of the Rules for Reforestation, the Form, Composition, Procedure for Approving a Reforestation Project, Grounds for Refusal of its Approval, as well as Requirements for the Electronic Format of the Reforestation Project”.

Information about the authors

Vera A. Savchenkova, D.Ss (Agro), professor of the Department of Forest Cultures, Breeding and Dendrology, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University; Orcid: 0000-0001-8593-7887; ResearcherID: Y-3167-2019; ResearcherID: Y-3167-2019; SPIN (RSCI) 5226-3490; AuthorID: 426848; v9651658826@yandex.ru

Alexander A. Kamashev, postgraduate student of the Department of Forest Cultures, Breeding and Dendrology of the Mytishchi branch of the Bauman Moscow State Technical University; aakamashev@rambler.ru

Contribution of the authors

V.A. Savchenkova – general scientific supervision, setting the goal and objectives of the study; concept development; formulation of conclusions.

A.A. Kamashev – work with sources of literature and preparation of primary bibliography, participation in the discussion of the results.

Оригинальная статья

УДК 630*2:(470.62/.67)

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-133-138>



ВИДОВОЙ СОСТАВ, ВСТРЕЧАЕМОСТЬ И ЧИСЛЕННОСТЬ ПОДЛЕСКА ПОД ПОЛОГОМ ВЫСОКОГОРНЫХ КЛЕНОВНИКОВ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Х.М. Хетагуров^{1✉}, И.А. Николаев², А.В. Грязькин³, А.Б. Базаев⁴, Э.Р. Калайджян⁵

^{1,2} Северо-Осетинский государственный университет имени К.Л. Хетагурова; г. Владикавказ, Российская Федерация

^{3,5} Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова; г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ Горский государственный аграрный университет; г. Владикавказ, Российская Федерация

¹ zaz81@inbox.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2684-897X>

² bootany@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2379-7601>

³ lesovod@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>

⁴ bazanvar@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0979-3858>

⁵ rafikovna002@mail.ru

Аннотация. Цель исследований – установление видового состава и структуры подлеска в кленовниках по вертикальным поясам. Представлен массовый материал по видовому составу подлесочных пород, произрастающих под пологом высокогорных кленовников на северных макросклонах Кавказа. Нижний пояс высокогорных кленовников расположен на высоте 800-1100 м. Самая высокая точка верхнего пояса кленовников расположена на 2100 м над уровнем моря – урочище Цей на территории Республики Северная Осетия – Алания. Древостой на 90-99% состоит из клена высокогорного (*Acer trautvetteri* Medw.). В подросте – единичные экземпляры ибльма, ясеня и двух видов клена. Подлесок представлен следующими видами: бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosa* Scop.), бузина красная (*Sambucus racemosa* L.), крушина ломкая (*Frangula alnus* Mill.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), смородина Биберштейна (*Ribes biebersteinii* Berl. ex DC), шиповник Биберштейна (*Rosa biebersteiniana* Tratt.). Показано, что численность подлеска под пологом высокогорных кленовников не превышает 600 экз/га. В составе живого напочвенного покрова выделено более 10 видов сосудистых растений.

Ключевые слова: Северный Кавказ, высокогорные кленовники, подлесок, видовой состав, встречаемость

Для цитирования: Хетагуров Х.М., Николаев И.А., Грязькин А.В., Базаев А.Б., Калайджян Э.Р. Видовой состав, встречаемость и численность подлеска под пологом высокогорных кленовников Северного Кавказа. Природообустройство. 2026;Т.19(2):133-138. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-133-138>

Original article

SPECIES COMPOSITION, FREQUENCY AND NUMBER OF UNDERWOOD UNDER THE CANOPY OF THE HIGH-MOUNTAIN MAPLE FORESTS OF THE NORTH CAUCASUS

К.М. Khetagurov^{1✉}, I.A. Nikolaev², A.V. Gryazkin³, A.B. Bazaev⁴, E.R. Kalaijyan⁵

^{1,2} North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov, Vladikavkaz, Russian Federation

^{3,5} St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, St. Petersburg, Russian Federation

⁴ Gorsky State Agrarian University, Vladikavkaz, Russian Federation

¹ zaz81@inbox.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2684-897X>

² bootany@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2379-7601>

³ lesovod@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>

⁴ bazanvar@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0979-3858>

⁵ rafikovna002@mail.ru

Abstract. The article presents mass data on the species composition of undergrowth species growing under the canopy of high-altitude maple forests on the northern macroslopes of the Caucasus. The lower belt of high-altitude maple forests is located at an altitude of 800-1100 m. The highest point of the upper belt of maple forests is located at 2100 m above sea level in the Tsey tract in the Republic of North Ossetia. The forest stands consist of 90-99% of *Acer trautvetteri* Medw. In the younger generation,

there are single species of elm, ash, and two species of maple. The undergrowth is represented by the following species: *Euonymus verrucosa* Scop., *Frangula alnus* Mill., *Sorbus aucuparia* L., *Ribes biebersteinii* Berl. ex DC, *Rosa biebersteiniana* Tratt. It has been shown that the number of undergrowth under the canopy of high-altitude maple forests does not exceed 600 specimens per hectare. More than 10 species of vascular plants have been identified in the living ground cover. The purpose of this study is to identify differences in the species composition of the undergrowth in maple forests across vertical zones.

Keywords: North Caucasus, high-altitude maple forests, undergrowth, species composition, occurrence

For citation: Khetagurov Kh.M., Nikolaev I.A., Gryazkin A.V., Bazaev A.B. and Kalaydjian E.R. . Species composition, occurrence, and abundance of undergrowth under the canopy of high-altitude maple forests in the North Caucasus. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(2):133-138. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-133-138>

Введение. На склонах разной крутизны и экспозиции кавказских гор произрастает множество реликтов и эндемичных видов [1-12]. Клен Траутфеттера, или клен высокогорный (*Acer trautvetteri* Medw.), простирается широкой полосой по северным склонам Кавказских гор включая территорию большинства республик Северного Кавказа [2, 4, 5, 7]. Естественный ареал захватывает территорию Дагестана, Армении, Азербайджана, Грузии, Турции [2, 4, 7, 13, 14].

Немногочисленные публикации о клене высокогорном содержат данные, как правило, по одному району [1-3]. Наиболее полный перечень мест произрастания *Acer trautvetteri* в разных районах Большого Кавказа представлен в статье Л.Б. Махатадзе более полувека назад [4]. Современное состояние высокогорных кленовника весьма подробно представлено в кандидатской и докторской диссертациях Х.М. Хетагурова [13, 14]. В публикациях других авторов клен Траутфеттера характеризуется бегло, без детализации условий места произрастания и без характеристики структуры фитоценозов с преобладанием этого вида клена в составе древостоев [1, 12, 15].

Практически все публикации за последние 30 лет о клене Траутфеттера вышли из-под пера авторов представленной работы. Первое обобщение материалов о клене Траутфеттера было сделано в 2006 г. в кандидатской диссертации Х.М. Хетагурова. Более объемный материал на суд специалистов по Кавказу был представлен в 2018 г. (докторская диссертация Х.М. Хетагурова). Из этого следует, что нет специалистов по *Acer trautvetteri* как на Кавказе, так и за рубежом, о чем можно судить по отсутствию соответствующих публикаций.

Известно, что первопроходцем в исследованиях, связанных с кленом высокогорным, был Я.С. Медведев. Еще в далеком 1880 г.

он дал детальную характеристику этой новой лесообразующей породы [5]. По его мнению, данный вид клена существенным образом отличается от других его видов не только по форме листовой пластинки, но и по многим другим признакам: по форме соцветий, плодов и по их окраске, по свойствам древесины, внешнему виду коры. На отличительные признаки клена высокогорного по сравнению с другими видами указывают и другие исследователи [1, 4, 11, 12, 16]. Особенности клена Траутфеттера (*Acer trautvetteri* Medw.) в свое время изучали зарубежные исследователи Е. Schulz [11], Е. Wolf [12], М. Dodru [17].

В качестве особенностей горного клена исследователи отмечают морозостойкость и влаголюбивость, требовательность к плодородию почвы и светолюбивость. Древесина у него светлая, годовичные кольца слабо заметны. Сахаристость сока в зависимости от почвенно-грунтовых условий колеблется в диапазоне от 0,9 до 1,3% [13, 14].

Высокогорные кленовники Кавказа и по сегодняшний день остаются малоизученными, география распространения окончательно не установлена [3, 14, 16]. Видовой состав растительности под пологом высокогорных кленовников практически не исследован [14].

Цель исследований: установление видовой состава и структуры подлеска в кленовниках по вертикальным поясам.

Материалы и методы исследований. В качестве объекта исследований послужили высокогорные кленовники Северного Кавказа, в составе которых доминирует клен Траутфеттера, или клен высокогорный (*Acer trautvetteri* Medw.). Все объекты (опытные лесные участки) расположены на северных макросклонах Кавказских гор. Кленовники на объектах исследований произрастают на высоте от 1100 до 1900 м над уровнем моря.

Полевые работы по учету нижних ярусов растительности осуществлялись в соответствии с методикой, разработанной кафедрой лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. На методику, использованную в ходе исследований, получен патент Российской Федерации [18].

Учет растительности в кленовниках производили круговыми площадками. Учетные площадки примыкали друг к другу, поэтому получалась сплошная учетная лента. При этом предварительная разметка учетных ходов и центров учетных площадок не проводилась. Достоверность получаемых результатов и требуемая точность работ достигались необходимым количеством площадок, каждая из которых составляет 10 м².

Для характеристики сходства и различий в видовом составе растительности двух сравниваемых объектов использовали коэффициент Жаккара (Кж) [19]. Величину этого коэффициента определяли с использованием формулы:

$$K_{ж} = B / (A + B - B),$$

где А – число видов на первом участке; В – число видов на втором участке; В – совпадающие виды на сравниваемых участках.

Результаты и их обсуждение. При обследовании высокогорных кленовников и характеристике распространения кленовых лесов были выделены вертикальные пояса. Нижний

пояс распространения клена Траутфеттера расположен на высоте до 1300 м над уровнем моря. Верхний пояс кленовников расположен выше 1600 м над уровнем моря.

Фитоценозы на опытных участках представлены одноярусными древостоями с разной численностью подроста и подлеска. В составе древостоя и подроста, кроме клена Траутфеттера (*Acer trautvetteri* Medw.), встречаются ильм горный (*Ulmus glabra* Huds.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.). В нижнем поясе в составе кленовников встречаются граб обыкновенный (*Carpinus betulus* L.) и липа крупнолистная (*Tilia platyphyllos* Scop.).

Общие сведения и основные характеристики фитоценозов по объектам исследований представлены в таблице 1. Опытный участок № 1 расположен в нижнем поясе распространения кленовников (Кобан, 1100 м над уровнем моря). Опытный участок № 2 подобран на высоте 1600 м над уровнем моря. Опытный участок № 3 расположен в урочище Цей на высоте 1900 м над уровнем моря.

Установлено, что видовой состав подлесочных пород зависит от местоположения кленовника, высоты над уровнем моря, почвенно-грунтовых условий. В верхнем поясе подлесок представлен главным образом смородиной Биберштейна (*Ribes biebersteinii* Berl. ex DC.) и бузиной красной (*Sambucus racemosa* L.). На хорошо освещенных местах единично встречаются шиповник

Таблица 1. Общие сведения об объектах исследований

Table 1. General information about the research objects

Характеристики	Номер объекта исследований / The number of the research object		
	1	2	3
Состав древостоя, % / Composition of the stand, %	98Клт1Кло1Яс / 98Klt1Klo1Yas	99Клт1Кло / 99Klt1Klo	87Клт8Яс2Кло 1Гр1Ил1Лп / 87Klt8Yas2Klo1Gr 1Ilm 1Lp
Состав подроста, % / Composition of the young generation, %	100Клт / 100Klt	90Клт10Кло / 90Klt10Klo	31Ил28Яс26Кло 15Клт / 31 Ilm 28Yas 26Klo 15Klt
Сомкнутость крон, % / Crown density, %	91	88	95
Экспозиция склона / Slope exposure	С / N	С / N	С / N
Крутизна склона, град. / Slope steepness, degrees	30	35	40

Примечание. Гр – граб обыкновенный (*Carpinus betulus* L.); Ил – ильм (*Ulmus glabra* Huds.); Клт – клен Траутфеттера (*Acer trautvetteri* Medw.); Кло – клен остролистный (*Acer platanoides* L.); Лп – липа крупнолистная (*Tilia platyphyllos* Scop.); Яс – ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.).

Источник: составлено авторами по результатам исследований

Note: Gr – *Carpinus betulus* L., Ilm – *Ulmus glabra* huds., Clt – *Acer trautvetteri* Medw., Clo – *Acer platanoides* L., Lp – *Tilia platyphyllos* Scop., Yas – *Fraxinus excelsior* L.

Source: compiled by the authors based on research results

колючейший (*Rosa spinosissima* L.) и жимолость альпийская (*Lonicera alpigena* L.), жимолость козья (каприфоль) – *Lonicera caprifolium* L.

В среднем поясе, под пологом кленовников, кроме указанных выше, встречаются бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosa* Scop.) и бересклет европейский (*Euonymus europaeus* L.). Нижний пояс кленовников характеризуется наибольшим разнообразием видов во всех компонентах лесного фитоценоза. Кроме видов, указанных выше, здесь в составе подлеска произрастают крушина ломкая (*Frangula alnus* Mill.), лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.) и колхидская (*Corylus colchica* Albov.). Встречаются также рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), шиповник Биберштейна (*Rosa biebersteiniana* Tratt.), несколько видов бересклета: кроме бересклетов бородавчатого (*Euonymus verrucosus* Scop.), европейского (*Euonymus europaeus* L.), встречается бересклет широколистный (*Euonymus latifolius* (L.) Mill.), бересклет карликовый (*Euonymus nanus* M. Bieb.) [28, 29]. Лишь на отдельных парцеллах зафиксировано наличие двух видов шиповника: шиповник собачий (*Rosa canina* L.), шиповник колючейший (*Rosa spinosissima* L.). В небольшом количестве в кленовниках встречается жимолость козья (каприфоль) – *Lonicera caprifolium* L., калина обыкновенная – *Viburnum opulus* L., рододендрон желтый – *Rhododendron luteum* Sweet. Кроме указанных видов, под пологом кленовников

нижнего пояса изредка встречаются черемуха обыкновенная (*Prunus padus* L.), волчегодник обыкновенный (*Daphne mezereum* L.) и несколько видов ивы – *Salix*.

В ходе исследований было выявлено, что в среднем поясе кленовых лесов численность подроста и подлеска существенно меньше, чем под пологом кленовников верхнего и нижнего поясов (табл. 2). Это связано с тем, что в данных условиях преобладают парковые кленовники – чистые по составу, редкостойные древостои. Под пологом редкостойных древостоев подрост и подлесок угнетаются мощным травостоем высотой более 2 м.

Живой напочвенный покров под пологом парковых кленовников – многоярусный; проективное покрытие в большинстве случаев составляет около 100%. Травостой характеризуется высокой продуктивностью. В травяном покрове господствует высокотравье из числа зонтичных. Видовой состав живого напочвенного покрова представлен более 10 видами однолетних и многолетних сосудистых растений. Видовой состав мхов и лишайников в ходе исследований не устанавливался.

Как показано выше, видовой состав подлеска по вертикальным поясам существенно различается. Величина коэффициента Жаккара для верхнего и нижнего поясов составляет 0.25, для верхнего и среднего поясов – 0.30, а для среднего и нижнего поясов – 0.50.

Таблица 2. Состав и численность подлеска по вертикальным поясам кленовников

Table 2. Composition and number of undergrowth in vertical zones of maple forests

Пояс кленовых лесов / Maple forest zone	Состав подлеска, % / Composition of undergrowth, %	Численность, тыс/га / Number, thousand / ha
Верхний / Upper	49См 33Бк 13Жим 6Шип / 48См 33 Вuz 13Zhim 6Ship	0,7
Средний / Middle	41См 28Бк 12Кл 11Шип 6Жим 2Бер / 41См 28Вuz 12Кл 11Ship 6Zhim 2Ber	0,3
Нижний / Lower	28См 23Бер 14Рб 12Кл 11Шип 3Бк 2Волч 2Кл 2Лещ 1Жим, 1Крш 1Черм / 28Sm 23Ber 14Rb 2Vol 12Kl 11Ship 3Bk 2Kl 2Leshch 1Zhim, 1Krsh 1Chrm	2,3

Примечание. Бер – бересклет; Бк – бузина; Вол – волчегодник; Жим – жимолость; Кл – калина; Крш – крушина; Лещ – лещина; Рб – рябина; См – смородина; Чер – черемуха Шс – шиповник.

Источник: составлено авторами по результатам исследований.

Note: Ber – euonymus, Bk – elderberry, Zhim – honeysuckle, Kl – viburnum, Krsh – buckthorn, Leshch – hazel, Rb – rowan, Sm – currant, Cher – bird cherry, Ship – rosehip, Vol

Source: compiled by the authors based on research results.

Выводы

Основная часть публикаций о клене Трафеттера относится к прошлому веку. По составу растительности нижних ярусов под пологом

высокогорных кленовников публикации единичны; актуальные данные отсутствуют. В ходе исследований были выявлены существенные различия по видовому составу и численности

подлесочных пород. Максимальные различия выявлены по видовому составу подлеска в верхнем и нижнем поясах произрастания кленовников; коэффициент общности видов составляет 0.25.

Таким образом, совпадает только 25% видов. Доминирующие виды кустарников под пологом кленовников верхнего пояса – смородина Биберштейна (*Ribes biebersteinii* Berl. ex DC.) и бузина красная (*Sambucus racemosa* L.).

Список использованных источников

1. Вацадзе Г. Вегетативное размножение клена высокогорного и граба кавказского в условиях Л534 // Заповедники Грузии. Тбилиси, 1969. Т. 1. С. 19-36.
2. Деревья и кустарники Северного Кавказа / Под ред. А.И. Галушко. Нальчик: Кабардино-Балкарское книжное издательство, 1967. 534 с.
3. Дорошина Г.Я., Николаев И.А., Хетагуров Х.М. Мхи сообществ *Acer trautvetteri* Medw. в Северной Осетии // Актуальные проблемы экологии и сохранения биоразнообразия России и сопредельных стран. Владикавказ: ИПО Северо-Осетинского государственного университета им. К.Л. Хетагурова, 2014. С. 8-11.
4. Махатадзе Л.Б. *Acer trautvetteri* Medw // Дендрофлора Кавказа. Тбилиси, 1970. Т. V.
5. Медведев Я.С. Кавказский подальпийский клен (*Acer Trautvetteri*) // Известия Кавказского общества любителей естествознания и Альпийского клуба. Кн. 2. 1880. С. 9-11.
6. Осипов В.Е. Лещина. М.: Агропромиздат, 1986. 63 с.
7. Середин Р.М. Флора и растительность Северного Кавказа. Краснодар: Издательство КГУ, 1979. 286 с.
8. Буданцев Л.Ю. Семейство бересклетовые (*Celastraceae*) // Жизнь растений / Под ред. А.Л. Тахтаджяна. М.: Просвещение, 1981. Т. 5. Ч. 2. Цветковые растения. С. 313-316.
9. Бузунова И.О. Роза, Шиповник – *Rosa L* // Флора Восточной Европы = Flora Europae Orientalis: В 11 т. / Отв. ред. Н.Н. Цвелёв. СПб.: Мир и семья: Изд-во СПХФА, 2001. Т. 10. Покрыгосеменные: Двудольные: [Магнолиевые – Истовые]. 670 с.
10. Шиманович Е.И. Бересклет. М.: ВО «Агропромиздат», 1987. 64 с.
11. Schulz E. Blüten morphologische und biologische Untersuchungen bei *Acer pseudoplatanus* L. und *Acer platanoides* L. // Der Züchter, 1. 1960. Pp. 14-34.
12. Wolf E. *Acer trautvetteri* Medw. – Kaukasischer Hochgebirgsahorn // Gartenflora, 40. Berlin, 1981. Pp. 263-266.
13. Хетагуров Х.М. Особенности структуры и проблемы воспроизводства высокогорных кленовников Северной Осетии – Алании: Дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2006. 168 с.
14. Хетагуров Х.М. Структурная организация и ресурсы высокогорных кленовников Центрального Кавказа: Дис. ... д-ра биол. наук. Владикавказ, 2018. 309 с.
15. Фирсов Г.А., Ткаченко К.Г., Трофимова А.С. Клены (*Acer L.*) Ботанического сада Петра Великого Ботанического института им. В.Л. Комарова Российской академии наук // Полевой журнал биолога. 2021. Т. 3, № 4. С. 357-369.
16. Хетагуров Х.М. Возобновительный потенциал клена Траутфеттера в горных лесах Республики Северная Осетия – Алания // Лесной журнал. 2017. № 1. С. 30-39. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.30.
17. Doğru M. Planning and Management of Forest Resources In Turkey (Draft) // Assistance For The Preparation of a National Programme for Turkey. 2001. 61 p.

Полученные результаты могут применяться при выполнении сравнительного анализа видового состава растительности в лесных формациях различного состава и разной географии. Для горных лесов такие сравнения являются еще более востребованными, чем для равнинных, что связано с труднодоступными условиями произрастания высокогорных кленовников.

References

1. Vatsadze G. Vegetative reproduction of high mountain maple and Caucasian hornbeam in conditions of L534 // Nature Reserves Georgia. Tbilisi, 1969. Vol. 1. pp. 19-36.
2. Trees and Shrubs of the North Caucasus / Ed. by Galushko A.I. Nalchik: Kabardino-Balkar Publishing House, 1967. 534 p.
3. Doroshina G.Ya., Nikolaev I.A., Khetagurov Kh.M. Mosses of *Acer trautvetteri* Medw. Communities in North Ossetia // Actual Problems of Ecology and Biodiversity Conservation in Russia and Adjacent Countries. Vladikavkaz: IPO of North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov 2014. Pp. 8-11.
4. Makhatadze L.B. *Acer trautvetteri* Medw. // Dendroflora of the Caucasus, vol. V. Tbilisi, 1970.
5. Medvedev Ya.S. The Caucasian Subalpine Maple (*Acer Trautvetteri*) // Proceedings of the Caucasian Society of Natural Science Lovers and the Alpine Club. Book 2, 1880. P. 9-11.
6. Osipov V.E. Leschina. M.: Agropromizdat, 1986. 63 p.
7. Seredin R.M. Flora and Vegetation of the North Caucasus / R.M. Seredin. – Krasnodar: KSU Publishing House, 1979. 286 p.
8. Budantsev L.Y. The family of Beresclataceae (Celastraceae) // Plant life. In 6 volumes. / under the editorship of A.L. Takhtajan. M.: Prosvshchenie, 1981. Vol. 5. Part 2. Flowering Plants. Pp. 313-316.
9. Buzunova I.O. Rose, Rosehip – *Rosa L* // Flora of Eastern Europe = Flora Europae Orientalis: in 11 vols. / resp. ed. and ed. vol. N.N. Tsvel'yov. – St. Petersburg: Mir i semya: SPKhFA Publishing House, 2001. Vol. 10: Angiosperms: Dicotyledons: [Magnoliaceae – Isolepidaceae]. 670 p. ISBN 5-8085-0122-9. Pp. 329-361.
10. Shimanovich E.I. Berezsklet. – M.: VO "Agropromizdat", 1987. 64 p.
11. Schulz E. Blütenmorphologische und biologische Untersuchungen bei *Acer pseudoplatanus* L. und *Acer platanoides* L. // Der Züchter, 1. 1960. P. 14-34.
12. Wolf E. *Acer trautvetteri* Medw. – Kaukasischer Hochgebirgsahorn // Gartenflora, 40. – Berlin, 1981. P. 263-266.
13. Khetagurov Kh.M. Features of the structure and problems of reproduction of high-altitude maple forests in North Ossetia-Alania: dissertation ... Candidate of Biological Sciences: 03.03.02. Khetag Muratovich Khetagurov. St. Petersburg, 2006. 168 p.
14. Khetagurov Kh.M. Structural organization and resources of high-altitude maple forests in the Central Caucasus: dissertation ... Doctor of Biological Sciences: 03.02.14. Khetag Muratovich Khetagurov. – Vladikavkaz, 2018. 309 p.
15. Firsov G.A., Tkachenko K.G., Trofimova A.S. Maples (*Acer L.*) Botanical Garden of Peter the Great of the V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences: [arch. 17 January 2023] // Field Journal of a Biologist. 2021. Vol. 3, No. 4. Pp. 357-369.
16. Khetagurov H.M. The renewable potential of the Trautvetter maple in the mountain forests of the Republic of North Ossetia-Alania // Lesn. zhurn. 2017. № 1. pp. 30-39. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.30.

18. Грязькин А.В. Способ учета подроста: Пат. 2084129 Российской Федерация, МКИ С 6 А 01 G 23/00. № 94022328/13. заяв. 10.06.94; опубл. 20.07.1997, Бюл. № 20.

19. Jaccard P. The distribution of the Flora in the alpine zone // *New Phytol.* 1912. № 11. Pp. 37-50.

Информация об авторах

Хетаг Муратович Хетагуров, д-р биол. наук, профессор; Researcher ID: AAI-6375-2021. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2684-897X>; zaz81@inbox.ru

Игорь Анатольевич Николаев, канд. биол. наук, доцент; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2379-7601>; bootany@yandex.ru

Анатолий Васильевич Грязькин, д-р биол. наук, профессор; Researcher ID: C-6699-2018; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>; lesovod@bk.ru

Анвар Батразович Базаев, канд. биол. наук, доцент; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0979-3858>; bazanvar@yandex.ru

Эвелина Рафиковна Калайджян, аспирант; 194021; rafikovna002@mail.ru

Критерии авторства: Все авторы совместно выполнили теоретические и численные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Received 12.09.2025

Поступила после рецензирования / Received 19.03.2026

Принята к публикации / Accepted 21.03.2026

17. Dođru M., Planning and Management of Forest Resources In Turkey (Draft) / M. Dođru // Assistance For The Preparation of a National Programme for Turkey. 2001. 61 p.

18. Gryazkin A.V. A method for accounting for undergrowth. Pat. 2084129 Russian Federation, MКИ С6 А 01 G 23/00. No. 94022328/13; Appl. 10.06.94; Pub. 20.07.97, Bull. No. 20.

19. Jaccard P. The distribution of the Flora in the alpine zone / P. Jaccard // *New Phytol.* 1912. № 11. PP. 37-50.

Information about the authors

Khetag M. Khetagurov, DSs (Bio), professor; Researcher ID: AAI-6375-2021. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2684-897X>; zaz81@inbox.ru

Igor A. Nikolaev, CSs (Bio), associate professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2379-7601>; bootany@yandex.ru

Anatoliy V. Gryazkin, DSs (Bio), professor; Researcher ID: C-6699-2018; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>; lesovod@bk.ru

Anvar B. Bazaev, CSs (Bio), associate professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0979-3858>; bazanvar@yandex.ru

Evelina R. Kalaijyan, post graduate student, 194021, rafikovna002@mail.ru

Authorship criteria: All authors jointly performed theoretical and numerical studies, on the basis of which they summarized and wrote a manuscript. All authors equally participated in the writing of the article.

Оригинальная статья
УДК 504.54.062.4:726.71
<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-139-144>



КОМПОЗИЦИОННАЯ И ЛАНДШАФТНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ МОНАСТЫРСКИХ КОМПЛЕКСОВ

М.Г. Варгузина^{1✉}, И.К. Лукина²

^{1,2}ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»; г. Воронеж, Российская Федерация

¹manushik017@mail.ru; ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-6964-8564>

²irinakimovna@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7845-7890>

Аннотация. Цель исследований – оценка исторического формирования функционала монастырских комплексов и анализ основных принципов размещения монастырских комплексов с точки зрения их композиционных решений и ландшафтных характеристик. В ходе исследований использовался комплексный системно-ландшафтный метод с привлечением историко-культурного анализа – изучение архивных материалов, карт и исторических документов, связанных с архитектурой монастырских комплексов. Структура объемно-пространственной композиции территорий монастырей всегда подчинялась определенным правилам и канонам, которые в свою очередь базировались на религиозных соображениях. С точки зрения ландшафтно-функционального подхода монастыри издавна располагались в местах, обеспечивающих, с одной стороны, изоляцию, а с другой – связь с окружающим миром. При этом использование природных ландшафтов – таких, как реки, леса и холмы, способствовало созданию уникальной ауры уединения и покоя, которая присуща монашеской жизни. Эти особенности заложили основу для развития монастырских комплексов, где пространство организовано таким образом, что каждый элемент: церкви, жилые корпуса, хозяйственные постройки, сады – тесно связан с другим и отражает иерархию духовной жизни. Такая четко выстроенная композиционная система пространственных элементов, имеющих определенное символическое значение, способствует эффективной организации монашеской жизни и служит отражением внутреннего мира монахов, их стремлений и молитвенной сосредоточенности. Развитие монастырей на протяжении веков формировало особые типы ансамблей, где баланс между природой и архитектурой становился наглядным символом гармонии телесного и духовного. Исходя из результатов исследований, можно сделать вывод о том, что композиционная и ландшафтно-функциональная организация пространства монастырей является результатом многовекового симбиоза между природой, архитектурой и духовной жизнью. При этом ландшафт выступает в качестве активного фактора, влияющего на восприятие пространства и создающего условия для религиозного уединения.

Ключевые слова: природный ландшафт, композиция, функциональная особенность, монастырский комплекс, территориальное размещение, планировка, архитектура

Для цитирования: Варгузина М.Г., Лукина И.К. Композиционная и ландшафтно-функциональная особенности размещения территории монастырских комплексов. Природообустройство. 2026;Т.19(2):139-144. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-139-144>

Scientific article

COMPOSITIONAL AND LANDSCAPE-FUNCTIONAL FEATURES OF THE LOCATION OF THE TERRITORY OF MONASTERY COMPLEXES

M.G. Varguzina^{1✉}, I.K. Lukina²

^{1,2}Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation

¹manushik017@mail.ru; ORCID:0009-0001-6964-8564

²irinakimovna@mail.ru

Abstract. The purpose of the study is to evaluate the historical formation of the functional of monastery complexes and to analyze the basic principles of the placement of monastic complexes in terms of their compositional solutions and landscape characteristics. The study used a comprehensive system-landscape **method**, combined with historical and cultural analysis, including the examination of archival materials, maps, and historical documents related to the architecture of monastic complexes. The structure of the volumetric and spatial composition of monastic territories has always been subject to specific rules and canons, which were

based on religious considerations. From a landscape-functional perspective, monasteries have long been located in places that provide both isolation and connection to the outside world. The use of natural landscapes, such as rivers, forests, and hills, has contributed to the unique aura of solitude and tranquility that characterizes monastic life. These features laid the foundation for the development of monastic complexes, where the space is organized in such a way that each element – churches, residential buildings, outbuildings, and gardens – is closely connected to each other and reflects the hierarchy of spiritual life. This well-structured compositional system of spatial elements, which have a specific symbolic meaning, contributes to the effective organization of monastic life and serves as a reflection of the monks' inner world, their aspirations, and their prayerful focus. Over the centuries, the development of monasteries has led to the creation of unique types of ensembles, where the balance between nature and architecture becomes a visual symbol of the harmony between the physical and the spiritual. Based on the research results, it can **be concluded** that the compositional and landscape-functional organization of the monasteries' spaces is the result of centuries-old symbiosis between nature, architecture, and spiritual life. In this context, the landscape acts as an active factor that influences the perception of space and creates conditions for religious solitude.

Keywords: natural landscape, composition, functional feature, monastery complex, territorial location, layout, architecture

For citation: Varguzina M.G., Lukina I.K. Compositional and landscape-functional features of the location of the territory of monastery complexes. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):139-144. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-139-144>

Введение. Стремясь сформулировать общенациональную идеологию, мы часто обращаемся к истории страны. Поэтому сегодняшний всплеск интереса к архитектуре монастырей как к части исторического наследия понятен. Ведь уникальные исторические пространства России в течение многих лет формировались на основе монастырских комплексов, их ландшафтно-композиционных особенностей.

Большинство исследователей монастырских комплексов рассматривают исключительно планировочные, объемно-пространственные и композиционные особенности территорий вне связи с окружающим ландшафтом. Авторы же данной статьи, напротив, выдвинули гипотезу о ландшафте как о равноправном компоненте архитектурно-планировочного решения любого монастыря.

Цель исследований: оценка исторического формирования функционала монастырских комплексов и анализ основных принципов размещения монастырских комплексов с точки зрения их композиционных решений и ландшафтных характеристик.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- изучение исторического контекста и эволюции архитектуры монастырей;
- изучение принципов внутренней планировки монастырских комплексов и их соответствие функциональным требованиям;
- изучение влияния природного окружения на размещение и архитектуру монастырских комплексов.

Для анализа архитектурных объектов традиционно используется системный метод.

Но в связи с тем, что в данных исследованиях рассматриваются ландшафтные компоненты, авторами был применен комплексный системно-ландшафтный метод.

Объектом изучения являются монастыри Воронежской области. Предмет исследования – планировочная и композиционная структура монастырских комплексов.

Изучение и сохранение композиционных и ландшафтных особенностей монастырских территорий создают основу для укрепления культурного и исторического наследия, а также для актуализации их современного значения. Данные исследования позволяют не только лучше понять прошлое, но и обозначить возможные пути интеграции традиционной монастырской архитектуры и исторических планировочных решений в современную архитектуру.

В истории планировки русского православного монастыря важным аспектом являлось гармоничное взаимодействие с окружающей природой. При планировании учитывались все компоненты ландшафта: реки, леса, холмы, которые не просто выступали фоном, а становились неотъемлемой частью всей архитектурной концепции. Возле водоемов создавались тихие уголки для молитв и созерцаний, а леса обеспечивали монастырю автономность и защиту. Таким образом, природа в какой-то мере становилась соучастником монашеской жизни, создавая тем самым идеальные условия для уединения и духовного развития.

Анализ литературы позволяет говорить о том, что архитектурный ансамбль каждого монастыря проектировался с максимальным учетом культурно-исторических особенностей местности.

Например, в северных регионах, где зима долгая и суровая, монастырские комплексы располагали так, чтобы снизить воздействие ветра, тем самым максимально обеспечив теплоизоляцию. В южных регионах акцент делался на защите от палящего солнца и обеспечении возможности проветривания и вентиляции помещений. Однако несмотря на климатические различия, неизменно важным оставалось сохранение традиционного стиля, когда каждый элемент – от калитки до куполов – имел определенное символическое значение и каноническое обоснование.

Центр любого монастырского комплекса олицетворяет центральный храм как духовное сердце обители. Центральные храмы всегда становились наиболее величественными и нарядными строениями, которые задавали общий вектор и порядок остальной застройки комплекса. Как правило, вокруг центрального храма размещались келейные корпуса, трапезные и хозяйственные постройки. Такое расположение позволяло сформировать своеобразную укрепленную крепость, предназначение которой заключалось в защите обители не только от внешних угроз, но и от мирских соблазнов. Совокупность всех этих элементов создавала уникальную пространственную организацию, способствующую полноценной монашеской жизни согласно православным традициям.

Все вышесказанное является справедливым и в отношении воронежских монастырских комплексов.

Результаты и их обсуждение. Интерес к изучению композиционных и ландшафтно-функциональных особенностей размещения территории монастырских комплексов обусловлен несколькими факторами.

Во-первых, монастырские комплексы зачастую являются важными памятниками истории и культуры, которые отражают не только духовные, но и архитектурно-художественные ценности своего времени. Изучение планировки и расположения монастырских комплексов позволяет лучше понять исторический контекст и культурную значимость данных объектов [1].

Во-вторых, исследование композиционных особенностей монастырей позволяет выделить разнообразие стилей и архитектурных решений, которые были присущи не только определенному периоду, но и региону [2].

В-третьих, экологическая и ландшафтная составляющая монастырских комплексов делает их интересными объектами для изучения с точки зрения устойчивого использования природных ресурсов и адаптации к природным условиям [3].

Монастыри являются хранителями культурного и исторического наследия, а их архитектура часто содержит элементы, отражающие местные традиции и особенности. Например, использование местных материалов и технологий строительства, а также декоративные элементы, характерные для данного региона, создают уникальный облик монастыря. Это позволяет сохранять и передавать культурные традиции через поколения, усиливая связь между прошлым и настоящим [4].

Рассматривая особенности русского монастырского строительства, можно сделать однозначный вывод о том, что ландшафт выполнял часто не эстетическую, а больше сакральную роль, создавая тем самым гармонию между архитектурой и природой. Будущее расположение монастырей выбиралось очень тщательно: высокие холмы, виды на долины и реки – все это служило символическим проявлением устремления к Богу. Однако большая часть монастырских комплексов была утрачена в 20-30-е гг. XX в., а некоторые преобразованы в разные ландшафтно-архитектурные объекты: детские и этнографические парки, скверы и т.п. [5].

Всего с начала XVII по начало XX вв. на территории современной Воронежской области в разное время официально действовало 20 монастырей [6]. Монастыри представляли собой важные духовные и культурные центры, оказывавшие значительное влияние на развитие региона. Каждый из них имел свою уникальную историю и особенности, отражая разнообразие духовной жизни, характерной для российского православия того времени. Некоторые из монастырей были основаны в период активного освоения южных территорий, когда Воронежский край играл ключевую роль в защите рубежей государства и развитии новых земель. К настоящему времени на территории области сохранилось 8 монастырей.

Первые деревянные храмы в Воронежском крае символизировали начало основательного духовного и культурного развития региона. Эти небольшие постройки клетского типа отличались простотой и скромностью форм. Строительство храмов в значительной степени зависело от общинных усилий: каждая деревня или поселение объединялись для сооружения молитвенного дома. Каменное строительство церквей началось в последней трети XVII в. в Воронеже [7].

Как один из самых ранних, можно выделить Борщевский Троицкий (мужской) монастырь, располагавшийся в районе бывшей главной площади села Борщево Хохольского района Воронежской области. Борщевский Троицкий монастырь, как свидетельствуют архивные документы, был

основан в XVII в. [8]. Его создание связано с периодом активного распространения православия на русских землях и стремлением местных общин укрепить духовные устои. Монастырь, расположенный в живописной местности на берегу реки Дон, стал важным центром религиозной и культурной жизни в регионе (рис. 1).

Архитектурный ансамбль обители включал в себя несколько деревянных и каменных построек, среди которых выделялись главный храм в честь Святой Троицы и братские кельи. Ландшафтно-функциональная структура монастыря сочетала в себе элементы русского монастырского зодчества и благоустройства территории, что создавало гармоничную среду. Главной композиционной особенностью монастыря являлась интеграция его территории в природные ландшафты. В настоящее время все постройки данного комплекса утрачены [9].

Толшевский Спасо-Преображенский (бывший мужской) монастырь расположен в лесу поселка Толши на правом берегу реки Усмань (рис. 2).

В настоящее время монастырский комплекс располагается на участке прямоугольной формы, немного вытянутого к реке. От реки монастырский двор отделен невысокой кирпичной оградой; построек сохранилось немного.

Коротоякский Вознесенский (мужской) монастырь был расположен на правом берегу реки Дон ниже села Коротояк (рис. 3).

Основанный в 1682 г., монастырь стал важным центром духовного просвещения и культурного развития, однако в конце XVII в. был упразднен по приказу Петра Первого. Монастырь находился в живописной местности, характерной для средней полосы России. Ландшафт этой местности представлял собой сочетание реки, холма и лесного массива, которые в то время создавали умиротворяющую и уединенную атмосферу вокруг монастыря [10].

Близость к реке Дон добавляла особый колорит: извилистые берега, зеленые луга и местами отвесные склоны создавали динамичный пейзаж. Холмистая местность вокруг монастыря возвышала его над уровнем реки и открывала панорамный вид на окрестности. Сегодня монастырь представляет собой полуразрушенное здание (рис. 4).

Рассмотрим функциональные особенности монастырского пространства, которые условно можно подразделить на внутримонастырские, расположенные внутри стен обители, и на внемонастырские.

Внутримонастырские элементы представляют собой архитектурные и природные структуры,

которые формируют сердце обители и служат для поддержания духовной жизни монастырской братии [12]. Это прежде всего храм, вокруг которого строится вся монастырская жизнь. Внутренний храм является местом, где происходят богослужения, молитва и церковные таинства. К тому же в обители обычно присутствуют и другие помещения – такие, как трапезная, келейные корпуса, библиотека и больничные помещения [13].

Обособленность монастыря обеспечена его стенами, которые считаются символом отделения от мирской суеты и способом защиты духовного пространства обители, создавая при этом

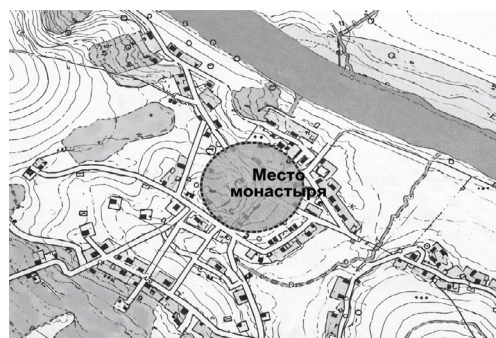


Рис. 1. Схема местоположения монастыря в структуре с. Борщёво

Fig. 1. Scheme of the location of the monastery in the structure of the village of Borshchevo

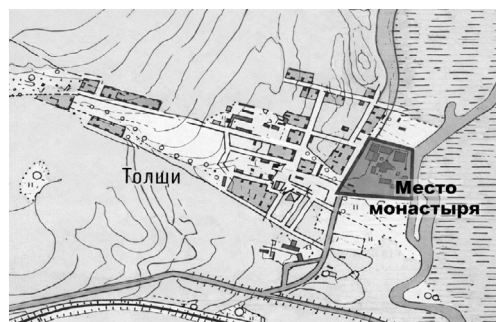


Рис. 2. Местоположение в п. Толши

Fig. 2. Location in the village of Tolshi

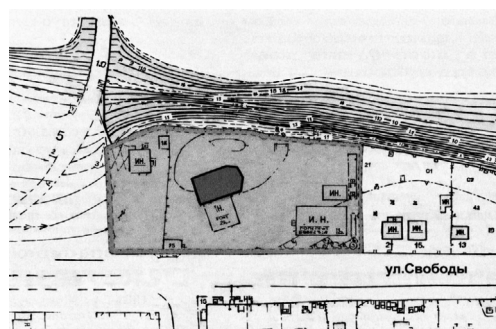


Рис. 3. Схема расположения Коротоякского Вознесенского (мужского) монастыря в структуре ландшафта

Fig. 3. Layout of the Korotoyaksky Ascension Monastery (men's) in the landscape structure



Рис. 4. Фотографии монастыря
в начале XX в. и в настоящее время
(фото с сайта:

<https://vif-vrn.ru/viewtopic.php?t=739>)

Fig. 4. Photo of the monastery at the beginning
of the XX century and at the present time
(photo from the

<https://vif-vrn.ru/viewtopic.php?t=739> website)



Рис. 5. Макет монастырского комплекса [11]

Fig. 5. Model of the monastery complex [11]

особую атмосферу внутреннего мира. Внутри комплекса находятся сады и огороды, которые

Список использованных источников

1. Субботин О.С. Архитектура православных храмов при высших образовательных учреждениях // Жилищное строительство. 2018. № 1-2. С. 10-15
2. Михайлова Т.А. Из истории сохранения и изучения памятников старины в России // Материалы Всероссийской научной конференции «Усадебные парки Русской провинции: Проблемы сохранения и использования» (9-11 октября 2003 г.). Великий Новгород, 2003. С. 212-220
3. Петров-Спиридонов Н.А., Коротаев Н.А. Формирование и эволюция пространственной организации русских православных монастырей // АМГТ. 2018. № 2 (43). С. 62-86
4. Варгузина М.Г. Особенность создания композиционных объектов озеленения на территории монастырских комплексов // Энергоресурсосберегающие и экологически безопасные технологии лесопромышленного комплекса: Материалы Международной научной конференции ученых и студентов (г. Воронеж, 26 сентября 2024 г.). Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2024. С. 19-25. DOI: 10.58168/E-SEFTFI2024_19-25

предназначены для труда монахов [14]. Труд в саду или в огороде позволяет достичь гармонии с природой и воспитать терпение и смирение.

В перечень внемонастырских элементов входят те территории и сооружения, которые находятся за пределами основных стен монастыря: скиты, уединенные кельи для подвижников, а также кладбище, вписанное, как правило, в общий ландшафт монастыря [15].

Выводы

Ландшафт в размещении территорий монастырских комплексов не просто играет роль природного фона, а выступает активным фактором, влияющим на восприятие пространства и создающим условия для религиозного уединения.

Функциональная особенность монастырского пространства, хотя и ограничена внешними стенами, включает в себя многочисленные элементы внутренней и внешней жизни, которые дополняют друг друга. Эти элементы создают сложную картину, в которой строения и природные элементы, взаимодействуя, формируют уникальную среду, благоприятствующую духовному росту и углублению веры. Независимо от того, находятся они внутри или снаружи стен, все составляющие монастыря вносят свой вклад в культивацию внутреннего мира его обитателей.

Исследование данных аспектов с учетом требований современного мира позволяет не только лучше понять прошлое, но и обозначить возможные пути интеграции традиционной монастырской архитектуры и планировочных решений с новыми тенденциями в области архитектуры и урбанистики. Тщательное сохранение и адаптация монастырских комплексов могут придать новый импульс их развитию, сохраняя при этом духовную и культурную идентичность.

Reference

1. Subbotin O.S. Architecture of Orthodox churches at higher educational institutions // Housing construction. 2018. vol. 1-2. P. 10-15
2. Mikhailova T.A. From the history of preservation and study of ancient monuments in Russia // Materials of the All-Russian scientific conference "Manor parks of the Russian province: Problems of conservation and use", October 9-11, 2003. Veliky Novgorod, 2003. P. 212-220.
3. Petrov-Spiridonov N.A., Korotaev N.A. Formation and the evolution of the spatial organization of Russian Orthodox monasteries // АМГТ. 2018. vol. 2 (43). P. 62-86
4. Varguzina M.G. The peculiarity of creating composite landscaping facilities on the territory of monastery complexes // Energy-saving and environmentally safe technologies of the timber industry: Proceedings of the International Scientific Conference of Scientists and Students, Voronezh, September 26, 2024. Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2024. P. 19-25. DOI: 10.58168/E-SEFTFI2024_19-25

5. Подколзин В.В. Историко-культурное наследие Воронежской области. Воронеж: Воронежский государственный педагогический университет, 2003. 120 с.

6. Памятники истории и культуры Воронежской области. Воронеж, 1986. 228 с.

7. Гревцова В.В., Леонова В.А. Изучение травянистой растительности Свято-Спасского женского монастыря в селе Костомарово Воронежской области // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2019. № 3. С. 64-71. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-3-64-71

8. Малиенко О.В., Сокольская О.Б. Особенности ландшафтно-архитектурной организации храмов и монастырей: отечественный опыт // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 1-2 (79). С. 109-111. DOI: 10.23670/IRJ.2019.79.1.051

9. Дьяков М.Ю., Кригер Л.В. Эволюция архитектурных форм в храмовом строительстве Воронежской области. Воронеж, 2011. 128 с.

10. Материалы Свода памятников истории и культуры РФ. Воронежская область. Каменский, Каширский, Ольховатский, Острогжский, Подгоренский районы. М.: Российский институт культурологии, 1993. Вып. 2. Ч. 2. 128 с.

11. Вергунов А.П. Монастыри. Природа и люди. М.: Изд-во журнала «Москва», 2006. 621с.

12. Маркарян Иеромонах Дометий Д. Некоторые особенности архитектурно-ландшафтного комплекса древнерусского монастыря // Вестник РГГУ. Серия «Философия. Социология. Искусствоведение». 2018. № 3 (13). С. 99-110. DOI: 10.28995/2073-6401-2018-3-99-110

13. Кукушкина В.А. Особенности ландшафтно-архитектурной организации прихрамовой территории // Развитие креативности личности в современном цифровом мультикультурном пространстве: Сборник материалов Международной научно-практической конференции (г. Елец, 14 апреля 2022 г.). Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2022. С. 288-291

14. Иванова Л.И. К реконструкции сакрального ландшафта // Проблемы градостроительной реконструкции: Сборник статей. Самара: Самарский государственный технический университет, 2019. С. 67-73

15. Петров-Спиридонов Н.А. К вопросу музеефикации исторически значимых архитектурно-ландшафтных территорий Европейской части России, включающих монастыри и храмы // Жизнь Земли. 2016. Т. 38, № 1. С. 68-79

Информация об авторах

Мануш Гагиковна Варгузина, доцент кафедры лесоведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»; ORCID: 0009-0001-6964-8564; SPIN-код: 2134-8080; AuthorID: 973445; manushik017@mail.ru

Ирина Кимовна Лукина, канд. с.-х. наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Лесной факультет, Кафедра ландшафтной архитектуры и почвоведения; orcid.org/0000-0002-7845-7890; SPIN-код: 1154-3252, AuthorID: 615630; irinakimovna@mail.ru

Вклад авторов

М.К. Варгузина – разработка концептуального замысла исследования, разработка структуры статьи, методического подхода исследования, оформление графических материалов и подготовка рукописи к публикации.

И.К. Лукина – участвовала в проверке логики изложения, редактировании текста и научной корректировке рукописи.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 08.07.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 23.03.2026

Принята к публикации / Accepted for publication 23.03.2026

5. Podkolzin V.V. Historical and cultural heritage of the Voronezh region. Voronezh: Voronezh State Pedagogical University, 2003. 120 p.

6. Historical and cultural monuments of the Voronezh region. Voronezh, 1986. 228 p.

7. Grevtsova V.V., Leonova V.A. Study of the herbaceous vegetation of the Holy Savior Convent in the village of Kostomarovo, Voronezh region // MGUL Bulletin is a Forest bulletin. 2019. vol. 3. P. 64-71. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-3-64-71

8. Maliyenko O.V., Sokolskaya O.B. Features of landscape and architectural organization of temples and monasteries: domestic experience // International Scientific Research Journal. 2019. vol. 1-2(79). P. 109-111. DOI: 10.23670/IRJ.2019.79.1.051

9. Dyakov M.Y., Krieger, L.V. The evolution of architectural forms in the temple construction of the Voronezh region. Voronezh, 2011. 128 p.

10. Materials of the Collection of historical and cultural monuments of the Russian Federation. Voronezh region. Kamensky, Kashirsky, Olkhovatsky, Ostrogzhsky, Podgorensky districts. Moscow: Russian Institute of Cultural Studies, 1993. Issue 2. Part 2. 128 p.

11. Vergunov A.P. Monasteries. Nature and people. Moscow: Publishing House of the Journal. "Moscow", 2006. 621 p.

12. Hieromonk Dometian Markarian D. Some features of the architectural and landscape complex of the Ancient Russian monastery / D. Dometian Markarian Hieromonk // Bulletin of the Russian State University of Economics. Series: Philosophy. Sociology. Art history. 2018. vol. 3(13). P. 99-110. DOI: 10.28995/2073-6401-2018-3-99-110.

13. Kukushkina V.A. Features of the landscape and architectural organization of the temple territory // Development of personal creativity in the modern digital multicultural space: collection of materials of the International Scientific and Practical Conference, Yelets, April 14, 2022. Yelets: Yelets State University named after I.A. Bunin, 2022. pp. 288-291.

14. Ivanova L.I. Towards the reconstruction of the sacred landscape // Problems of urban reconstruction: Collection of articles / Samara State Technical University. Samara: Samara State Technical University, 2019. P. 67-73.

15. Petrov-Spiridonov N.A. On the issue of museumification of historically significant architectural and landscape territories of the European part of Russia, including monasteries and temples // Life of the Earth. 2016. Vol. 38, vol. 1. P. 68-79.

Information about the authors

Manush G. Varguzina, associate professor of the department of wood science, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov; ORCID: 0009-0001-6964-8564; SPIN-code: 2134-8080; AuthorID: 973445; manushik017@mail.ru

Irina K. Lukina, CSs (Agro), associate professor of the department of landscape architecture and soil science, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Faculty of forestry, Department of landscape architecture and soil science; orcid.org/0000-0002-7845-7890; SPIN-code: 1154-3252, AuthorID: 615630; irinakimovna@mail.ru

Contribution of the authors

M.K. Varguzina – development of the conceptual concept of the study, development of the structure of the article, methodological approach of the study, design of graphic materials and preparation of the manuscript for publication.

I.K. Lukina – participated in checking the logic of the presentation, editing the text and scientific correction of the manuscript.

Оригинальная статья

УДК 630*453

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-145-152>



ТАКСАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОВРЕЖДЕННЫХ КОРОЕДОМ-ТИПОГРАФОМ ЕЛОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ ПОДМОСКОВЬЯ

Д.Ю. Гостева¹, А.В. Лебедев²✉

^{1,2} ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация

¹ <https://orcid.org/0009-0000-1853-4762>, gosteva@rgaumcxa.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>; alebedev@rgau-msha.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований антропогенных, биотических и абиотических факторов, обуславливающих массовое усыхание еловых насаждений на территории Московской области. Особое внимание уделено повреждению ельников короедом-типографом (*Ips typographus* L.), провоцирующим ослабление древостоев с последующим накоплением сухостойной, ветровальной и буреломной древесины. Цель исследований – оценка лесоводственно-таксационных показателей еловых насаждений Московской области, поврежденных короедом-типографом, на основе данных наземных обследований. На землях государственного лесного фонда Подмосковья заложено 19 пробных площадей, на которых определены основные таксационные показатели насаждений и рассчитана средневзвешенная категория санитарного состояния (СКС). Поврежденные древостои характеризуются высоким классом бонитета, относительной полнотой 0,2-0,6 ед., запасом древесины от 104 до 419 м³/га и возрастом 45-120 лет. Отмечено, что спелые и перестойные насаждения характеризуются неудовлетворительным санитарным состоянием. Наиболее сильная зависимость выявлена между процентом заселенности короедом-типографом деревьев ели и средней категорией состояния ($r = 0,91$). Наблюдается значительный рост доли деревьев 5-й категории санитарного состояния: с 27,4% в сильно ослабленных до 91,3% в погибших древостоях. Исследования подчеркивают необходимость проведения своевременного наземного лесопатологического мониторинга для выявления очагов вредителя, назначения санитарно-оздоровительных мероприятий для повышения санитарного состояния лесных насаждений Московской области и предотвращения их гибели.

Ключевые слова: короед-типограф, еловые древостои, санитарное состояние, таксационные показатели, Московская область

Для цитирования: Гостева Д.Ю., Лебедев А.В. Таксационные показатели поврежденных короедом-типографом еловых древостоев Подмосковья. Природообустройство. 2026;Т.19(2):145-152. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-145-152>

Scientific article

FOREST STAND INDICATORS OF SPRUCE STANDS DAMAGED BY THE BARK BEETLE IN THE MOSCOW REGION

D.Yu. Gosteva¹, A.V. Lebedev²✉

^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov; Moscow, Russian Federation

¹ <https://orcid.org/0009-0000-1853-4762>, gosteva@rgaumcxa.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>; alebedev@rgau-msha.ru

Abstract. Presented are the findings of a study on anthropogenic, biotic and abiotic factors contributing to the mass dieback of spruce stands within the Moscow Region. Particular attention is given to the damage inflicted on spruce forests by the European spruce bark beetle (*Ips typographus* L.), which leads to the weakening of tree stands and the subsequent accumulation of deadwood, windthrow and windbreak. The research objective is an assessment of silvicultural and taxation characteristics of bark beetle-damaged spruce stands in the Moscow Region, based on ground survey data. On the lands of the state forest fund of the Moscow Region, 19 sample plots have been established. The main taxation characteristics of the stands were determined on these plots, and the weighted average sanitary condition category (SCC) was calculated. The damaged stands are characterized by high class of bonitet, relative stand density ranging from 0.2 to 0.6 units, timber volumes between 104 and 419 m³/ha, and ages of 45 to 120 years. It was noted that mature and overmature stands exhibit unsatisfactory sanitary conditions. A strong

correlation was identified between the percentage of spruce trees colonized by bark beetle and the mean sanitary condition category ($r = 0.91$). A significant increase was observed in the proportion of trees assigned to the 5th sanitary category – rising from 27.4% in severely weakened stands to 91.3% in dead stands. The study underscores the necessity of implementing timely ground-based forest pathological monitoring to detect pest outbreak foci and prescribe sanitation and forest health improvement measures. This is critical for enhancing the sanitary condition of forest stands in the Moscow Region and preventing their mortality.

Keywords: bark beetle, spruce stands, sanitary condition, forest stand indicators, Moscow region

For citation: Gosteva D.Yu., Lebedev A.V. Forest stand indicators of spruce stands damaged by the bark beetle in the Moscow region. *Privodoobustroystvo*. 2026;19(2):145-152. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-145-152>

Введение. Среди основных факторов, вызывающих ослабление и усыхание еловых насаждений Подмоскovie, можно выделить антропогенное воздействие, последствия опасных гидрометеорологических явлений, нерациональное лесопользование, повреждение болезнями и заселение стволовыми вредителями ослабленных деревьев [1, 2]. Хозяйственная деятельность человека оказывает существенное влияние на леса Подмоскovie, что проявляется в загрязнении атмосферного воздуха токсичными выбросами промышленных предприятий и автотранспорта, утилизации бытового и строительного мусора на землях лесного фонда, стремительном расширении городских территорий, нарушении правил пожарной и санитарной безопасности в лесах и др. [3].

Кроме того, в условиях изменения климата отмечается увеличение частоты аномальных погодных явлений (засуха, паводки, ураганные ветры, смерчи, стихийные пожары и др.), что негативно сказывается на устойчивости ели к неблагоприятным факторам окружающей среды и влечет за собой образование большого количества ветровальной и буреломной древесины на территории государственного лесного фонда [4, 5].

Введение ограничений на проведение в защитных лесах сплошных рубок спелых и перестойных насаждений с целью заготовки древесины способствовало увеличению доли перестойных насаждений и в последующем – аккумуляции сухостойной и валежной древесины, что в свою очередь привело к повышению уровня захламленности лесных территорий [6].

В рамках действующего лесного законодательства осуществление лесохозяйственных мероприятий осложнено в связи с длительным процессом оформления необходимых документов. Это приводит к значительной задержке в проведении санитарно-оздоровительных мероприятий, что снижает их эффективность и своевременность [7]. При проведении работ по лесовосстановлению на участках, вышедших из-под сплошных санитарных рубок, пренебрегаются такие почвенные характеристики, как плодородие и водный

режим почв, а также структура почвенного горизонта, что приводит к истощению почвы и служит причиной деструкции ельников. Кроме того, в ходе создания насаждений необходимо отдавать предпочтение смешанным древостоям ввиду отсутствия внутривидовой конкуренции и устойчивости к неблагоприятным факторам среды [8].

Лесные культуры ели более подвержены заражению корневой губкой и опенком, что снижает их устойчивость к стволовым вредителям. В насаждениях естественного происхождения, сформированных в результате естественного отбора, ель обладает повышенной устойчивостью к процессам усыхания. Эта разница объясняется адаптивными механизмами, выработанными в естественных экосистемах [2].

Серьезную угрозу для спелых еловых древостоев представляет корневая губка (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.). У ели губка быстро распространяется в корнях и переходит в ствол, образуя центральную гниль на высоте до 10 м [9]. Вызванное грибом инфекционное заболевание часто развивается латентно, оставаясь незаметным на протяжении долгого времени ввиду биологических особенностей породы. Ослабленные деревья становятся мишенью для стволовых вредителей. Их деятельность в зонах медленно развивающейся инфекции приводит к ускоренному отмиранию деревьев, стремительному образованию сухостоя и последующей деградации древостоев [10].

Рассмотренные абиотические, биотические и антропогенные факторы способствуют ослаблению древостоев, снижая их устойчивость к стволовым вредителям. В результате деятельности короеда-типографа и увеличения его численности происходит массовое усыхание ельников, накопление патологического отпада и ухудшение санитарного состояния лесов. В результате леса утрачивают свою защитную функцию [2, 11, 12].

В настоящее время наиболее распространенным вредителем, провоцирующим усыхание еловых лесов Московской области, является представитель семейства

Долгоносики (*Curculionidae*) – короед-типограф (*Ips typographus* Linnaeus) [12, 13]. Короед-типограф – это небольшое насекомое, длина тела которого достигает 5,5 мм, ширина – около 2 мм. Преимущественно поражает ель европейскую (*Picea abies* (L.) H. Karst.), ель сибирскую (*P. obovata* Ledeb.), ель аянскую (*P. jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carriere) и ель восточную (*P. orientalis* (L.) Peterm.). Насекомое отличается широким ареалом распространения и способно адаптироваться к различным экологическим условиям при наличии кормовой базы в виде соответствующих древесных пород. Короед заселяет ветровальные и буреломные деревья, лесоматериалы, хранящиеся на складах, порубочные остатки на лесосеках, ослабленные под воздействием ветра и солнечной радиации деревья вдоль стен леса, больные и ослабленные деревья. В подобных условиях формируются очаги массового размножения короеда, что нередко приводит к усыханию еловых насаждений [2, 14].

Проблема гибели еловых лесов Подмосковья привлекает внимание ученых с конца XIX в. Первое упоминание о массовом усыхании ели в Европейской части России относится к периоду с 1881 по 1883 гг. и связано с вспышками массового размножения короеда-типографа. Низкая температура воздуха и позднее наступление весны в 1884 г. спровоцировали остановку распространения короеда, и усыхание ели прекратилось [13].

Вследствие засухи, наблюдавшейся в 1891 г., начался новый период усыхания еловых лесов, который продолжался до 1893 г. Массовый ветровал, вызванный сильными ураганскими ветрами, привел к вывалу деревьев, что спровоцировало вспышку массового размножения короеда [15]. Новый засушливый период начался в Центральной России осенью 1920 г., что вызвало очередную волну массового размножения короеда и привело к усыханию еловых лесов в период с 1921 по 1925 гг. Уменьшение количества атмосферных осадков в сочетании с повышением среднегодовой температуры воздуха в период с 1938 по 1939 гг. вызвало катастрофическое усыхание еловых лесов в Московской области и способствовало распространению короеда. Вспышка численности вредителя продолжалась до 1943 г. В конце 1990-х и в начале 2000-х гг. на территории Московской области был зафиксирован очередной эпизод усыхания еловых древостоев старше 70 лет, сопровождавшийся вспышкой типографа. Однако в результате снижения численности вредителя в 2005 г. интенсивность усыхания ели в регионе значительно уменьшилась [2]. Последний случай

масштабного усыхания ели в Европейской части России пришелся на 2010-2014 гг. Ослабление и последующее усыхание древостоев были вызваны сочетанием климатических, энтомогенных и антропогенных факторов [16-18]. Гибель еловых насаждений от короеда-типографа за период 2011-2013 гг. наблюдалась во всех лесничествах Подмосковья.

На сегодняшний день наибольшую часть общей площади погибших насаждений занимают территории, пострадавшие от насекомых-вредителей, – 36641,1 га, или 79,3% [19]. Подавляющая доля этих повреждений (97%, или 35797,9 га) связана с еловыми древостоями, погибшими в результате повреждения короедом [20].

В условиях накопления перестойных еловых насаждений возрастает риск быстрого распространения короеда-типографа, что требует своевременного наземного мониторинга на основе таксационных показателей древостоя. Анализ таксационных показателей позволяет выявить потенциальные очаги размножения вредителя и принять своевременные меры по защите лесных насаждений и борьбе с вредителем. Современные методы дистанционного зондирования Земли в сочетании с наземной таксацией повышают точность выявления очагов размножения короеда-типографа [21].

Цель исследований: оценить лесоводственно-таксационные показатели еловых насаждений Московской области, поврежденных короедом-типографом, по данным наземных исследований.

Материалы и методы исследований. Объектом исследований являлись еловые насаждения Московской области, поврежденные короедом-типографом (*Ips typographus* L.). Данными для отбора поврежденных участков явились акты лесопатологического обследования, проведенного на землях государственного лесного фонда Московской области. Отбирались участки, охватывающие процент заселения короедом-типографом от самого минимального до самого максимального, а также учитывалась средняя категория состояния насаждений: от ослабленных до погибших. В ходе полевых работ было заложено 19 пробных площадей (рис. 1), на которых определялись основные таксационные показатели древостоя (состав, средняя высота и диаметр, возраст, полнота, тип леса, класс бонитета и запас). Также визуальным способом определялся процент заселенности деревьев стволовым вредителем и устанавливалась категория санитарного состояния деревьев ели с применением диагностических признаков (в соответствии с критериями

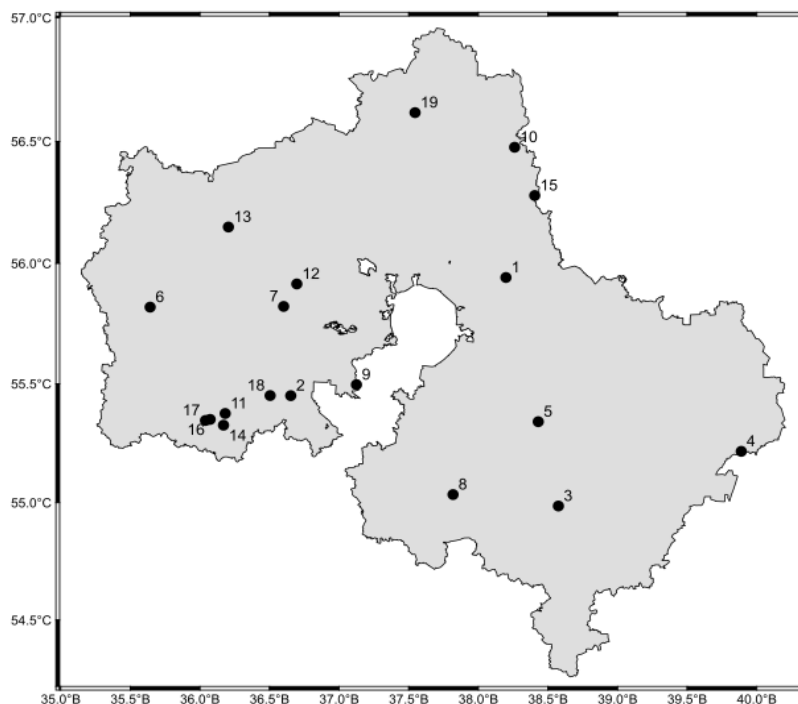


Рис. 1. Расположение пробных площадей на территории Московской области
(номера пробных площадей соответствуют данным таблицы)

Fig. 1. Location of sample plots on the territory of the Moscow Region
(numbers of sample plots correspond to Table 1)

Таблица 1. Таксационная характеристика древостоев пробных площадей
Table 1. Taxation characteristics of forest stands of sample plots

№	Формула состава / Composition formula	Возраст, лет / Age, years	Средняя высота, м / Average height, m	Средний диаметр, см / Average diameter, cm	Полнота, ед. / Fullness, units	Класс бонитета / Bonitet class	Тип леса ** / Forest type **	Запас, м ³ /га / Stock, m ³ /ha	СКС* / SMC*
1	4Е2Е1С2Б1ОС	80	24	24	0,5	1	ЕСЛШ	261	2,50
2	5Е2Б2С1ОС	90	26	26	0,5	1	ЕСЛШ	340	2,56
3	6Е4Б+ИВД	45	22	30	0,5	1а	ЕСЛШ	283	2,67
4	5Е4С1Б	95	26	30	0,5	1	ЕЧРМ	304	3,24
5	8С2Е+Б	79	28	24	0,5	1	ЕСЛШ	360	3,20
6	5Е3ОС1Б1С	85	26	32	0,5	1	ЕЧРШ	306	2,76
7	6Е3Б1ОС	95	30	30	0,2	1	ЕЧРШ	146	2,85
8	8Е1С1Б+Е	85	26	32	0,6	1	ЕСЛШ	379	4,50
9	5Е5Б	59	25	26	0,6	1а	ЕСЛШ	401	2,76
10	6Е3ОС1Б+ОЛС	95	28	30	0,5	1	ЕСЛШ	325	2,33
11	5Е2ОС2Б1С	100	28	34	0,6	1	ЕЧРШ	402	3,26
12	5Е3ОС2Б	110	28	26	0,4	1	ЕСЛШ	340	2,67
13	8Е1Б1ОС+ОЛС	95	27	38	0,6	1	ЕЧРШ	380	5,00
14	8Е1Б1ОС	80	26	29	0,6	1	ЕЧРШ	380	4,42
15	6Е1С3Б+ОС	80	27	28	0,6	1	ЕСЛШ	369	2,72
16	8Е1Б1ОС	120	31	36	0,5	1	ЕЧРШ	419	4,04
17	6Е3ОС1Б	85	27	24	0,6	1	ЕЧРШ	372	3,89
18	7Е2Б1ОС	85	27	24	0,2	1	ЕСЛШ	104	3,93
19	4Е2Е2Б2ОС+С	95	29	34	0,4	1	ЕСЛШ	309	2,46

Примечание: * Е – ель, С – сосна, Б – береза, ОС – осина, ИВД – ива древовидная, ОЛС – ольха серая; ** ЕСЛШ – ельник сложный широколиственный, ЕЧРШ – ельник черничный широколиственный, ЕЧРМ – ельник черничный мелколиственный; *** СКС – средняя категория состояния ели.

Note: * E – spruce, S – pine, B – birch, OS – aspen, IVD – tree willow, OLS – gray alder; ** ESLSH – compound broad-grass spruce, ECHRSB – broad-grass bilberry spruce, ECHRM – small-grass bilberry spruce; SMC is the middle category of the condition of the spruce.

из Постановления Правительства РФ от 9 декабря 2020 г. № 2047 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах»). Средневзвешенная категория состояния (СКС) для елового древостоя ($K_{cp.}$) рассчитывалась по формуле:

$$K_{cp.} = \sum (P_1 \times K_i) / 100 \text{ г,}$$

где P_1 – доля каждой категории санитарного состояния, % от запаса древесины деревьев древесной породы; K_i – категория санитарного состояния дерева.

Результаты и их обсуждение. Сводная таксационная характеристика древостоев приведена в таблице. Древостои – смешанные, в основном с преобладанием ели, возраст – от 45 до 120 лет, относительная полнота – от 0,2 до 0,6 ед., преобладающий класс бонитета – I. Запас древесины на 1 га – от 104 до 419 м³. Типы леса, в которых заложены пробные площади (ельник сложный широколиственный, ельник черничный широколиственный, ельник черничный мелколиственный), являются типичными для произрастания высокопродуктивных ельников в зоне хвойно-широколиственных лесов Европейской части России. Древостои пробных площадей, как правило, имеют упрощенную структуру, что указывает на их пониженную биологическую устойчивость [6].

Тепловая карта корреляции лесоводственно-таксационных показателей насаждений, поврежденных короедом-типографом, представлена на рисунке 2. Анализ тепловой карты позволил выявить ряд значимых взаимосвязей таксационных характеристик еловых насаждений. Наиболее выраженная зависимость наблюдается между процентом заселенности деревьев короедом и средней категорией состояния ели ($r = 0,91$). Это свидетельствует о том, что массовое заселение короедом напрямую ведет к ухудшению состояния еловых древостоев Московской области. Кроме того, прослеживается умеренная положительная корреляция между СКС ели и ее долей в формуле состава древостоя ($r = 0,66$), а также со средним диаметром древостоя ($r = 0,34$).

Таким образом, наиболее уязвимыми к короеду-типографу стоит считать чистые ельники с наличием крупномерных деревьев.

На рисунке 3 представлено распределение числа деревьев ели, %, по категориям санитарного состояния в насаждениях с разной степенью повреждений. Анализ охватывает 4 группы: ослабленные (рис. 3а), сильно ослабленные (рис. 3б), усыхающие (рис. 3в) и погибшие (рис. 3г) насаждения. Для ослабленных насаждений характерно преобладание 2-й (38,7%) и 3-й (37,5%) категорий, что указывает на повреждения неблагоприятными факторами с явно выраженными

признаками ухудшения состояния. В группе сильно ослабленных наблюдается равномерное распределение: 1-я категория составляет 22,6%; 2-я категория – 26,6%, 3-я категория – 23,4%; 5-я категория – 27,4%, что демонстрирует разнородность данной группы. Наблюдается тенденция возрастания процента деревьев, относящихся к 5-й категории санитарного состояния, среди усыхающих и погибших насаждений. В группе усыхающих эта доля составляет 68,0%, тогда как среди погибших показатель возрастает до 91,3%. Диаграмма наглядно отражает, что по мере деградации насаждений происходит ухудшение санитарного состояния.

Результаты проведенного анализа лесоводственно-таксационных показателей ельников Московской области позволили выявить наиболее уязвимые к повреждению короедом-типографом типы лесных насаждений в современных условиях. Наши выводы согласуются с выводами ранее проведенных исследований в других регионах. В процессах естественного ослабления

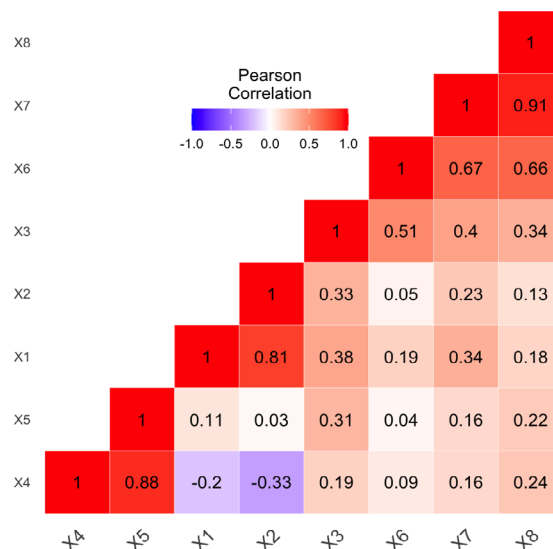


Рис. 2. Тепловая карта корреляции лесоводственно-таксационных показателей насаждений, поврежденных короедом-типографом:

X1 – возраст, лет; X2 – средняя высота, м; X3 – средний диаметр, см; X4 – относительная полнота, ед.; X5 – запас древесины на 1 га, м³; X6 – доля ели в запасе, %; X7 – заселено (отработано) короедом деревьев ели, %; X8 – средняя категория состояния ели)

Fig. 2. Heat map of correlation of silvicultural and taxation indicators of stands damaged by bark beetle typographer

(X1 – age, years; X2 – average height, m; X3 – average diameter, cm; X4 is the relative completeness, units; X5 – wood stock per 1 ha, m³; X6 is the share of spruce in stock, %; X7 – inhabited (mined) by bark beetle of spruce trees, %; X8 – medium category of spruce condition)

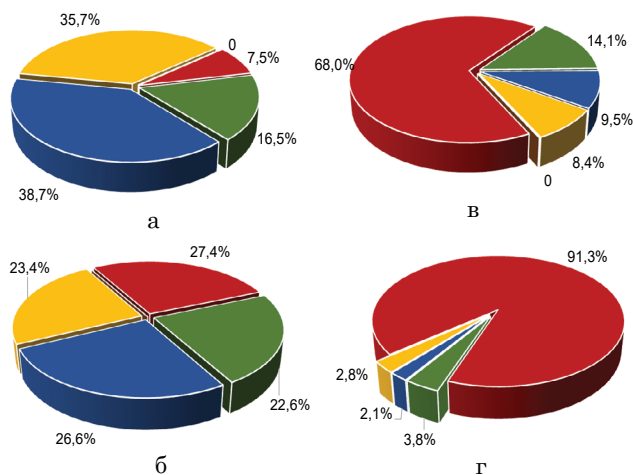


Рис. 3. Распределение числа деревьев ели, %, по категориям санитарного состояния: зеленый цвет – 1 категория санитарного состояния деревьев, синий цвет – 2 категория, желтый – 3 категория, красный цвет – 5 категория; в насаждениях с разной степенью повреждений: а) ослабленные; б) сильно ослабленные; в) усыхающие; г) погибшие

Fig. 3. Distribution of the number of spruce trees (%) by categories of sanitary condition (green color – 1st category of sanitary condition of trees, blue color – 2nd category, yellow – 3rd category; red – 5th category) in plantations with different degrees of damage: a) weakened, b) severely weakened, c) drying out, d) the dead

перестойных еловых насаждений Подмосквья происходит снижение их устойчивости к болезням и вредителям леса [6]. Согласно исследованиям А.С. Леонтьева с соавт. [22] очаги массового размножения короеда-типографа наблюдаются преимущественно в высокопродуктивных еловых насаждениях I-II классов бонитета. Отмечается, что деревья ели, произрастающие в смешанных древостоях единично или небольшими группами, демонстрируют устойчивость к поражению вредителем. В первую очередь погибают деревья, диаметр стволов которых больше или равен среднему диаметру елового элемента насаждения. Наиболее интенсивному воздействию короеда подвергаются крупномерные экземпляры. Однако по мере истощения кормовой базы вредитель переходит на тонкомерные деревья.

Для лесных насаждений Прикамья исследователи Л.А. Иванчина и С.В. Залесов [23]

Список использованных источников

1. Кухта В.Н., Блинов А.И., Сазанов А.А. Короеды ели европейской и мероприятия по регулированию их численности. Минск, 2014. 337 с.
2. Маслов А.Д. Короед-типограф и усыхание еловых лесов. Пушкино: ВНИИЛМ, 2010. 130 с.
3. Павлов И.Н. Биотические и абиотические факторы усыхания хвойных лесов Сибири и Дальнего Востока // Сибирский

выявили, что в одновозрастных еловых насаждениях зеленомошного типа леса короед-типограф преимущественно заселяет деревья ели с диаметром ствола от 16 см. Однако в ельниках-зеленомошниках встречаются деревья с диаметром 20 см, остающиеся неповрежденными вредителем. Авторами получена зависимость между диаметром и активностью короеда: с увеличением диаметра ствола возрастает доля заселенности деревьев вредителем. При этом тонкокорые деревья ели диаметром 8-12 см им не повреждаются, но имеют признаки усыхания, что свидетельствует о наличии других факторов усыхания еловых древостоев.

Риск вспышек массового размножения короеда-типографа значительно зависит от доли ели в составе насаждения, ее возраста и структуры насаждений, что требует контроля за монокультурами и возрастным составом деревьев [24-26]. Устойчивость деревьев к воздействию вредителя определяется их значительной жизнеспособностью, проявляющейся интенсивным приростом до 50-65 лет [24]. Наиболее подвержены воздействию короеда-типографа древостои возрастом 100 лет и более [25, 27]. Кроме возраста, ключевым фактором, влияющим на подверженность еловых лесов воздействию короеда-типографа, являются почвенные условия, особенно уровень содержания питательных веществ [24, 28].

Выводы

Очаги массового размножения вредителя возникают на фоне накопления перестойных насаждений, что служит причиной массового усыхания ельников на территории региона. Результаты анализа таксационных показателей подтвердили зависимость между степенью заселенности деревьев короедом и ухудшением их санитарного состояния ($r = 0,91$). Наиболее уязвимыми оказались высокопродуктивные одновозрастные насаждения с преобладанием ели. Своевременное проведение лесопатологических обследований и назначение санитарно-оздоровительных мероприятий позволят снизить площади очагов стволовых вредителей и станут дополнением для исследования поврежденных короедом участков при использовании дистанционных методов.

References

1. Kukhta V.N. Bark beetles of European spruce and measures to regulate their numbers / V.N. Kukhta, A.I. Blintsov, A.A. Sazanov. Minsk, 2014. P. 337
2. Maslov A.D. The bark beetle and the drying out of spruce forests / A.D. Maslov. Pushkino, 2010. P. 130
3. Pavlov I.N. Biotic and Abiotic Factors as Causes of Coniferous Forests Dieback in Siberia and Far East

экологический журнал. 2015. Т. 22, № 4. С. 537-554. DOI: 10.15372/SEJ20150405. EDN: TZJCUJ

4. Сидоренков В.М., Перфильева О.В. Лямцев Н.И. и др. Аспекты регионального зонирования по устойчивости еловых лесов к воздействию засух (на примере Московской области) // Лесохозяйственная информация. 2021. № 2. С. 29-38. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2021.2.03. EDN: EUANFN

5. Лямцев Н.И., Сидоренков В.М., Ачиколова Ю.С. Изменение климата и массовые размножения короледа-типографа в Московском регионе // Инновации и технологии в лесном хозяйстве: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 95-летию Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, Санкт-Петербург, 16-17 мая 2024 г. СПб.: Санкт-Петербургский НИИ лесного хозяйства, 2024. С. 198-204. DOI: 10.21178/160524.198.

6. Коротков С.А., Стоноженко Л.В., Киселева В.В., Глазун Ю.Б. Влияние экологических и социально-экономических факторов на формирование лесов Подмосковья // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2020. Т. 31, № 1-2. С. 90-115. DOI: 10.21513/0207-2564-2020-1-90-115. EDN: LJAИМ

7. Миртова И.А., Ершов Д.В., Мягкова Д.А. Использование спутниковых данных для оценки повреждения лесов короледа-типографом на примере Московской области // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 6. С. 77-82. EDN: UIYCXH

8. Рожков А.А., Козак В.Т. Устойчивость лесов. Минск: Агропромиздат, 1989. 239 с.

9. Зуева Л.В., Матвеева С.А., Андреева Е.А. Влияние корневой губки на сосновые и еловые насаждения в Тверском лесничестве Тверской области // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Биология и экология». 2022. № 4 (68). С. 84-92. DOI: 10.26456/vtbio281. EDN: LGCVZI

10. Винокуров А.А., Балухта Л.П. Санитарно-патологическое состояние еловых насаждений Смоленского лесничества Смоленской области // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2022. № 62. С. 125-128.

11. Бердинских С.Ю., Соколов Р.А. Динамика распространения очагов стволовых вредителей в Пермском крае // Антропогенная трансформация природной среды. 2015. № 1. С. 82-86. EDN: UNJIXB

12. Селиховкин А.В., Поповичев Б.Г., Осекина Т.А. и др. Динамика состояния популяции короледа-типографа в Ленинградской области в очаге массового размножения // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. № 244. С. 184-199. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.184-199.

13. Гниненко Ю.И., Хегай И.В., Чилахсаева Е.А. Технология комплексной защиты ельников от короледа-типографа с применением энтомофагов и феромонов. Пушкино: Всероссийский НИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства, 2021. 48 с.

14. Мухаметшина А.Р., Шайхразиев Ш.Ш. Изучение состояния ельников Республики Татарстан // Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства. 2019. № 2. С. 71-79. EDN: PCFGSN

15. Шевырѳев И.Я. Опустошительное размножение короедов в Средней России с 1882 по 1894 гг. и попытки борьбы с ним // Сельское хозяйство и лесоводство. 1896. Вып. 3. С. 523-545.

16. Яковенко А.И. Стволовые вредители на ветровальных сосняках Московской области // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2011. № 4. С. 46-53. EDN: NXYRYN

17. Крылов А.М., Соболев А.А., Владимировна Н.А. Выявление очагов короледа-типографа в Московской области с использованием снимков Landsat // Вестник Московского

/ I.N. Pavlov // Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal. 2015. Vol. 22, No. 4. P. 537-554. DOI: 10.15372/SEJ20150405 EDN: TZJCUJ

4. Aspects of Regional Zoning for Spruce Forest Resilience to Drought Impact (Case Study of Moscow Region) / V.M. Sidorenkov, O.V. Perfilieva, N.I. Lyamtsev [et al.] // Forestry Information. 2021. No. 2. P. 29-38. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2021.2.03. EDN: EUANFN

5. Lyamtsev N.I. Climate Change and Mass Outbreaks of the European Spruce Bark Beetle in the Moscow Region / N.I. Lyamtsev, V.M. Sidorenkov, Yu.S. Achikolova // Innovations and Technologies in Forestry: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 95th Anniversary of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, Saint Petersburg, May 16-17, 2024. – Saint Petersburg: Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2024. P. 198-204. DOI: 10.21178/160524.198.

6. Influence of Ecological and Socio-Economic Factors on the Formation of Moscow Region Forests / S.A. Korotkov, L.V. Stonozhenko, V.V. Kiseleva Yu.B. Glazunov // Problems of Environmental Monitoring and Ecosystem Modeling. 2020. Vol. 31, No. 1-2. P. 90-115. DOI: 10.21513/0207-2564-2020-1-90-115.

7. Mirtova I.A. Use of Satellite Data for Assessing Forest Damage by the European Spruce Bark Beetle: Case Study of Moscow Region / I.A. Mirtova, D.V. Ershov, D.A. Myagkova // News of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography. 2013. No. 6. P. 77-82. EDN: UIYCXH

8. Rozhkov A.A. Forest Resilience / A.A. Rozhkov, V.T. Kozak. – Minsk: Agropromizdat, 1989. P. 239

9. Zueva L.V. Influence of Root Rot (Heterobasidion) on Pine and Spruce Stands in Tver Forestry of Tver Region / L.V. Zueva, S.A. Matveeva, E.A. Andreeva // Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology. 2022. No. 4(68). P. 84-92. DOI: 10.26456/vtbio281. EDN: LGCVZI

10. Vinokurov A.A. Sanitary-Pathological Condition of Spruce Stands in Smolensk Forestry of Smolensk Region / A.A. Vinokurov, L.P. Balukhta // Current Problems of the Forest Sector. 2022. No. 62. P. 125-128

11. Berdinskikh S.Yu. Dynamics of Stem Pest Outbreak Spread in Perm Krai / S.Yu. Berdinskikh R.A. Sokolov // Anthropogenic Transformation of the Natural Environment. 2015. No. 1. P. 82-86 EDN: UNJIXB

12. Dynamics of the European Spruce Bark Beetle Population Condition in Leningrad Region within a Mass Outbreak Area / A.V. Selikhovkin, B.G. Popovichev, T.A. Osechkin [et al.] // News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy. 2023. No. 244. P. 184-199. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.184-199

13. Gninenko Yu.I. Technology for Integrated Protection of Spruce Forests from the European Spruce Bark Beetle Using Entomophages and Pheromones / Yu.I. Gninenko, I.V. Khegay, E.A. Chilahsaeva. – Pushkino: All-Russian Research Institute of Silviculture and Mechanization of Forestry, 2021. P. 48. ISBN 978-5-94219-265-5

14. Mukhametshina A.R. Study of the Condition of Spruce Forests in the Republic of Tatarstan / A.R. Mukhametshina Sh.Sh. Shaykhraziev // Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute. 2019. No. 2. P. 71-79 EDN: PCFGSN

15. Shevyryov I.Ya. Devastating Outbreak of Bark Beetles in Central Russia from 1882 to 1894 and Attempts to Control It / I.Ya. Shevyryov // Agriculture and Forestry. 1896. Iss. 3. P. 523-545.

16. Yakovenko A.I. Stem Pests in Windfall Pine Forests of Moscow Region / A.I. Yakovenko // Bulletin of Moscow State Forest University – Forest Bulletin. 2011. No. 4. P. 46-53 EDN: NXYRYN

17. Krylov A.M. Identification of bark beetle outbreaks in the Moscow region using Landsat images / A.M. Krylov, A.A. Sobolev, N.A. Vladimirova // Bulletin of the Moscow State University of Forestry – Forest Bulletin. 2011. No. 4. P. 54-60.

государственного университета леса – Лесной вестник. 2011. № 4. С. 54-60.

18. Лебедев А.В., Гостева Д.Ю. Современная динамика и причины гибели лесов Подмосковья // Фитосанитария. Карантин растений. 2024. № S1 (18). С. 46-47. EDN: ZGEYYU

19. Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостева Д.Ю. Динамика показателей земель лесного фонда и санитарного состояния лесов Московской области // Орошаемое земледелие. 2024. № 2 (45). С. 60-67. DOI: 10.35809/2618-8279-2024-2-10. EDN: GRAEOL

19. Лесной план Московской области. [Электронный ресурс]. URL: http://old.klh.mosreg.ru/wood_plan/2273.html (дата обращения: 20.03.2025).

20. Nardi D., Bozzini A., Morgante G., Gaccione A., Finozzi V., Battisti A. Participatory ground data are complementary to satellite bark beetle detection // *Annals of Forest Science*, 2023. Vol. 80 (1). Pp. 80-46. DOI: 10.1186/s13595-023-01216-5.

21. Леонтьев А.С., Мариичева Т.В., Абрамова Н.И., Мариничев Е.А. Особенности формирования очагов короеда-типографа в северо-западных районах Нижегородской области // *Journal of Agriculture and Environment*. 2024. № 1 (41). DOI: 10.23649/JAE.2024.41.18.

22. Иванчина Л.А., Залесов С.В. Влияние короеда-типографа на усыхание одновозрастных древостоев Прикамья в условиях ельника зеленомошного // *Международный студенческий научный вестник*. 2018. № 4-4. С. 641-644.

23. Grodzki W., Starzyk J.R., Kosibowicz M. Impact of selected stand characteristics on the occurrence of the bark beetle *Ips typographus* (L.) in the Beskid Żywiecki Mountains // *Forest Research Papers / Leśne prace badawcze*, 2014. Vol. 75 (2). Pp. 159-169. DOI: 10.2478/frp-2014-0015.

24. Netherer S., Nopp-Mayr U. Predisposition assessment systems (PAS) as supportive tools in forest management – rating of site and stand-related hazards of bark beetle infestation in the High Tatra Mountains as an example for system application and verification // *Forest Ecology and Management*, 2005. Vol. 207. Pp. 99-107.

25. Grodzki W. Wykorzystanie pułapek fermonowych do monitoringu populacji kornica drukarza w wybranych parkach narodowych w Karpatach // *Sekocin Stary*: IBL, 2007. P. 127 (Prace instytutu badawczego leśnictwa. Rozprawy i monografie; 8).

26. Becker T., Schröter H. Ausbreitung von rindenbrütenden Borkenkäfern nach Sturmschäden // *Allgemeine Forstzeitung*, 2000. Vol. 55. Pp. 280-282.

27. Dutilleul P., Nef L., Frigon D. Assessment of site characteristics as predictors of the vulnerability of Norway spruce (*Picea abies* Karst.) stands to attack by *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae) // *Journal of Applied Entomology*, 2000. Vol. 124. Pp. 1-5.

Информация об авторах

Дарья Юрьевна Гостева, аспирант, ассистент кафедры землеустройства и лесоводства; SPIN-код: 3973-3456, РИНЦ AuthorID: 1144759; <https://orcid.org/0009-0000-1853-4762>, d.gosteva@rgau-mcxa.ru

Александр Вячеславович Лебедев, д-р с.-х. наук, доцент, доцент кафедры землеустройства и лесоводства; SPIN-код: 5789-5540, РИНЦ AuthorID: 738683, <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>; alebedev@rgau-msha.ru

Вклад авторов

Д.Ю. Гостева – систематизация и анализ источников литературы, подготовка текста статьи
А.В. Лебедев – создание окончательной версии (доработка) рукописи и редактирование

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 01.08.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received 08.04.2026

Принята к публикации / Accepted 08.04.2026

18. Lebedev A.V. Modern dynamics and causes of forest death in the Moscow region / A.V. Lebedev D.Yu. Gosteva // *Phytosanitary. Plant quarantine*. 2024. No. S1 (18). P. 46-47. EDN: ZGEYYU

19. Dubenok N.N. Dynamics of forest lands and sanitary condition of forests in the Moscow Region / N.N. Dubenok, A.V. Lebedev, D.Yu. Gosteva // *Irrigated agriculture*. 2024. No. 2 (45). P. 60-67. DOI: 10.35809/2618-8279-2024-2-10.

20. Forest plan of the Moscow region [Electronic resource]. – Access mode: URL: http://old.klh.mosreg.ru/wood_plan/2273.html (date of access: 20.03.2025).

21. Nardi D., Bozzini A., Morgante G., Gaccione A., Finozzi V., Battisti A. Participatory ground data are complementary to satellite bark beetle detection // *Annals of Forest Science*, 2023. Vol. 80(1). P. 80-46. DOI: 10.1186/s13595-023-01216-5

22. Specifics of Eight-Toothed Bark Beetle Foci Formation in North-Western Districts of Nizhny Novgorod Oblast / A. S. LEONTENKOV, T. V. MARINICHEVA, N. I. ABRAMOVA, Y. A. MARINICHEV // *Journal of Agriculture and Environment*. 2024. No. 1(41). DOI: 10.23649/JAE.2024.41.18.

23. Ivanchina L.A. The Impact of Bark Beetle on the Thinning in Even-Aged Stands of the Kama Region in the Conditions of Wet Spruce Forest / L.A. Ivanchina, S.V. Zalesov // *International Student Scientific Bulletin*. 2018. No. 4-4. P. 641-644.

24. Grodzki W., Starzyk J.R., Kosibowicz M. Impact of selected stand characteristics on the occurrence of the bark beetle *Ips typographus* (L.) in the Beskid Żywiecki Mountains // *Forest Research Papers / Leśne prace badawcze*, 2014. Vol. 75(2). P. 159-169. DOI: 10.2478/frp-2014-0015

25. Netherer S., Nopp-Mayr U. Predisposition assessment systems (PAS) as supportive tools in forest management – rating of site and stand-related hazards of bark beetle infestation in the High Tatra Mountains as an example for system application and verification // *Forest Ecology and Management*, 2005. Vol. 207. P. 99-107.

26. Grodzki W. Wykorzystanie pułapek fermonowych do monitoringu populacji kornica drukarza w wybranych parkach narodowych w Karpatach // *Sekocin Stary*: IBL, 2007. P. 127 (Prace instytutu badawczego leśnictwa. Rozprawy i monografie; 8). ISBN 978-83-87647-69-8

27. Becker T., Schröter H. Ausbreitung von rindenbrütenden Borkenkäfern nach Sturmschäden // *Allgemeine Forstzeitung*, 2000. Vol. 55. P. 280-282.

28. Dutilleul P., Nef L., Frigon D. Assessment of site characteristics as predictors of the vulnerability of Norway spruce (*Picea abies* Karst.) stands to attack by *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae) // *Journal of Applied Entomology*, 2000. Vol. 124. P. 1-5.

Information about the authors

Daria Yu. Gosteva, Postgraduate student, Assistant of the Department of Land Management and Forestry; SPIN code: 3973-3456, AuthorID: 1144759, <https://orcid.org/0009-0000-1853-4762>; d.gosteva@rgau-msha.ru

Aleksandr V. Lebedev, DSc (Agro), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Land Management and Forestry; SPIN code: 5789-5540, AuthorID: 738683, <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>; alebedev@rgau-msha.ru

Contribution of the authors

D.Y. Gosteva – systematization and analysis of literature sources, preparation of the text of the article
A.V. Lebedev – creation of the final version (Revision) of the Manuscript and Editing